

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.03.01

工业机器人校准技术与补偿方法发展现状及趋势

宫思远, 赵子越, 刘倩岷

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 工业机器人因具有自动化程度高、定位精度好等优势, 已成为我国工业智能化的攻关方向之一, 并将逐步替代人工, 在智能制造领域发挥不可替代的作用。在使用过程中, 造成工业机器人准确度下降的因素众多, 将直接影响其在叶片研磨、高精度钻铆等高精尖领域中的应用。文章在总结工业机器人通用校准模型的基础上, 分析了工业机器人校准技术与误差补偿方法的现状及存在的问题, 阐述了工业机器人校准方法未来的发展趋势, 为后续工业机器人在线校准与误差补偿方法和规范标准的制定提供借鉴。

关键词: 工业机器人; 校准技术; 校准模型; 绝对定位精度

中图分类号: TB9; TP242.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)03-0001-08

Development Status and Trend of Industrial Robot Calibration Technology and Compensation Method

GONG Siyuan, ZHAO Ziyue, LIU Qiandi

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Industrial robots have become one of the key research directions of industrial intelligence in China because of their high degree of automation and positioning accuracy. Industrial robots would gradually replace manual labor and play an irreplaceable role in the field of intelligent manufacturing. However, in the process of use, many factors may reduce the accuracy of industrial robots, which would directly affect their application in high-precision fields, such as blade grinding and high-precision drilling and riveting. In response to the above problems, on the basis of summarizing the common calibration model of industrial robots, the current situation and problems of calibration technology and error compensation methods for industrial robots are analyzed, and the future development trend of calibration methods for industrial robots is elaborated, which provides reference for the subsequent development of online calibration and error compensation methods and specification standards for industrial robots.

Key words: industrial robot; calibration technology; calibration model; absolute positioning accuracy

0 引言

工业机器人是工业自动化、智能化的主力军^[1-2], 能够解放劳动力, 极大提高生产效率。随着智能制造的高速发展^[3], 国家陆续出台新政策, 目的是为工业机器人营造更好的发展环境。随着生产和制造工艺需求的不断提高, 对工业机器人的精度要求也越来越高, 国内外各研究机构针对工业机器人的精度及性能保障特别是补偿方法和校准技术方面开展了深入研究^[4]。

工业机器人的长期使用可能导致其精度因磨损而降低, 另外连杆长度、连杆工具坐标系的定义偏差等因素会导致工业机器人的位姿产生偏移, 也会对工业机器人的使用精度造成极大影响。目前, 解决上述问题的主要方法是通过构建工业机器人的误差模型对工业机器人进行误差补偿, 并完成工业机器人的校准^[5]。但是, 目前国内工业机器人标准与校准规范尚不完善,

仅制定了 GB/T 12642-2013《工业机器人性能规范及其试验方法》, 该标准主要定义了工业机器人的性能规范及其试验方法。目前国内还没有针对工业机器人末端执行器绝对定位精度的相关校准规范, 因此开展工业机器人末端执行器的校准与补偿方法研究十分重要。

本文首先介绍了工业机器人的校准模型, 在分析和总结工业机器人的几何参数误差及运动学模型的基础上, 从校准方法和补偿方法两个方面对工业机器人的校准技术进行梳理, 并总结未来工业机器人校准技术的发展趋势, 为未来工业机器人在线校准与误差补偿规范标准的制定提供参考。

1 工业机器人校准模型

工业机器人的校准过程包括系统建模、数据测量、参数辨识和误差补偿^[6], 即: 通过建立工业机器人的校准模型, 应用校准方法获取机器人末端执行器的实

际位姿,然后应用参数辨识方法获得具体的参数变化规律^[7-8],之后进行参数补偿以达到提高其末端定位精度的目的。

在笛卡尔坐标系(6D 坐标系)中,需要 6 个参数(三个位置坐标、三个角度坐标)确定工业机器人末端执行器的具体位姿。设 x, y, z 为末端执行器的位置坐标, a, b, c 为末端执行器的角度坐标,因此工业机器人的通用校准模型可写为

$$\mathbf{e} = \mathbf{P}_{\text{mes}} - \mathbf{P}_{\text{theory}} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{e} = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta a, \Delta b, \Delta c]^T$ 为末端执行器的位姿误差; $\mathbf{P}_{\text{mes}} = [x_i, y_i, z_i, a_i, b_i, c_i]^T$ 为末端执行器的实际测量位姿; $\mathbf{P}_{\text{theory}} = [x_0, y_0, z_0, a_0, b_0, c_0]^T$ 为末端执行器位姿的约定真值,该值可通过机器人运动学模型得出。工业机器人校准模型如图 1 所示。

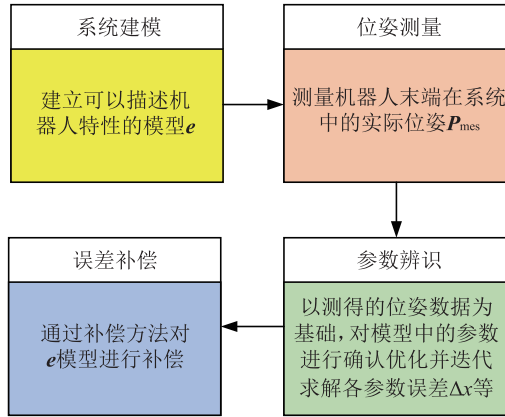


图 1 工业机器人校准模型

工业机器人校准模型的建立规范了操作流程,提高了工作效率,且在极大程度上保障了机器人的校准精度。

2 工业机器人校准几何参数误差及运动学模型

据统计,目前影响机器人绝对定位精度的误差因素中,几何参数误差约占 90%。针对几何参数误差,可以建立机器人的运动学模型^[9]。常用的工业机器人运动学模型有 D-H (Denavit-Hartenberg) 模型、MDH (Modified Denavit-Hartenberg) 模型、POE 模型等。

1) D-H 模型

D-H 模型的原理为:在 n 轴机器人各连杆上建立关节坐标系,然后通过几何参数(杆件扭角 α_i 、关节距离 d_i 、杆件长度 a_i 、关节转角 θ_i)将第 $i-1$ ($i=1, 2, \dots, n-1$) 个连杆与第 i 个连杆坐标系通过齐次变化矩阵相连,从而建立联系^[10]。相邻连杆之间的模型参数及坐标系如图 2 所示。

以 6 轴机器人为例, D-H 模型建立的过程为:①为

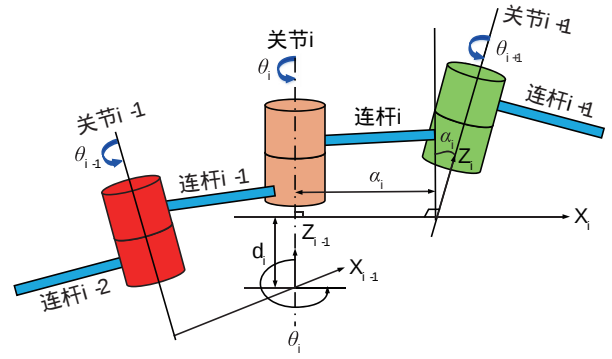


图 2 D-H 模型参数及坐标系

每个关节建坐标系:以 z_i 与 z_{i-1} 的公垂线的交点作为关节坐标系原点 o_i , z_i 轴的方向为关节 $i+1$ 的轴线方向,以同时垂直于 z_i 轴和 z_{i-1} 轴且方向为由 z_{i-1} 指向 z_i 的直线作为 x_i 轴,然后根据右手定则得出 y_i ;②引入 4 个参数,建立第 $i-1$ 与第 i 个连杆坐标系之间的旋转矩阵

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i^{i-1} &= \text{Trans}(Z_{i-1}, d_i) \cdot \text{Rot}(Z_{i-1}, \theta_i) \cdot \\ &\quad \text{Trans}(X_{i-1}, a_i) \cdot \text{Rot}(X_{i-1}, \alpha_i) = \\ &\quad \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i\sin\theta_i & \sin\alpha_i\sin\theta_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i\cos\theta_i & -\sin\alpha_i\cos\theta_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

则 6 轴机器人末端执行器间的齐次变换矩阵为

$$\mathbf{T} = \mathbf{A}_1^0 \mathbf{A}_2^1 \mathbf{A}_3^2 \mathbf{A}_4^3 \mathbf{A}_5^4 \mathbf{A}_6^5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:矩阵 $\mathbf{T}$ 的前三列分别为机器人末端执行器坐标系 $x(n$ 列), $y(o$ 列), $z(a$ 列)轴在机器人基坐标系 x, y, z 的分量,第四列(p 列)为机器人末端执行器坐标系原点在基坐标系下的位置。当机器人运动学模型参数已知时,可根据不同关节转角值得其末端位姿的具体值。

但是 D-H 运动学模型存在坐标系定义奇异性问题,当相邻两关节处于平行或接近平行状态时,连杆坐标系参数受连杆参数的影响很大,即使连杆参数的微小变化也会引起连杆坐标系参数的较大变化。如图 3 所示,连杆的两端是平行旋转关节,由模型规则可知,连杆坐标系的各参数为 $\theta_i = 0, d_i = 0, \alpha_i = 0, a_i = L$ 。但一旦出现加工装配误差,即 z_i 轴出现微小偏移角 β ,导致 z_i 轴偏移到 z'_i 轴, z'_i 轴与 z_i 轴将会相交于连杆 $i-1$ 的坐标系,并与该坐标系原点存在距离偏差,因此连杆坐标系参数变为 $\theta_i = -90^\circ, d_i = -f$ (f 为 $0 \sim z'_i$ 轴与 z_i 轴交点的一个正标量), $\alpha_i = -\beta, a_i = 0$ 。由此可见, z_i

轴轴线方向的微小误差对参数 θ_i, α_i, d_i 有很大影响。

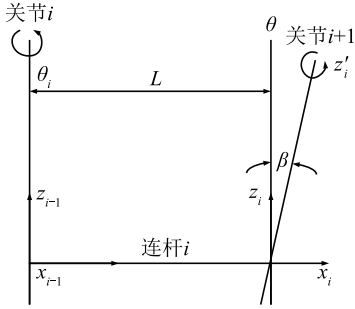


图3 相邻为平行关节的连杆示意图

为了辨识机器人运动学参数，需要对机器人末端执行器位姿的雅克比矩阵参数进行辨识。由数学知识可知，对于给定的一组函数，如果每个函数有相同的且相互独立的一组自变量，则对每一个函数的每一个自变量求导即可得到一组雅克比矩阵，而该雅克比矩阵可用来描述各自变量的微小变化与函数微小变化之间的关系，对于六自由度的机器人，已知其运动学参数，可求其末端执行器的位姿值，即

$$\begin{aligned} p_x &= f_{px}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) \\ p_y &= f_{py}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) \\ p_z &= f_{pz}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) \\ \omega_x &= f_{\omega x}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) \\ \omega_y &= f_{\omega y}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) \\ \omega_z &= f_{\omega z}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) \end{aligned} \quad (4)$$

式中： p_x, p_y, p_z 为机器人末端执行器位置 p 在 x, y, z 方向的构成分量， $p = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ ； $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 为机器人末端执行器姿态欧拉角 ω 的构成分量， $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ ； f 为映射函数； $X_n = [\theta_n \ \alpha_n \ d_n \ a_n]^T$ ， $n = 1, 2, \dots, 6$ 为机器人第 n 个关节的DH参数。因此，雅克比矩阵为

$$J = [J_1 \ J_2 \ J_3 \ J_4] \quad (5)$$

其中， $J_n (n = 1, 2, \dots, 6)$ 的具体表达式为

$$J_n = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_x}{\partial \theta_n} & \frac{\partial p_x}{\partial \alpha_n} & \frac{\partial p_x}{\partial d_n} & \frac{\partial p_x}{\partial a_n} \\ \frac{\partial p_y}{\partial \theta_n} & \frac{\partial p_y}{\partial \alpha_n} & \frac{\partial p_y}{\partial d_n} & \frac{\partial p_y}{\partial a_n} \\ \frac{\partial p_z}{\partial \theta_n} & \frac{\partial p_z}{\partial \alpha_n} & \frac{\partial p_z}{\partial d_n} & \frac{\partial p_z}{\partial a_n} \\ \frac{\partial \omega_x}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \omega_x}{\partial \alpha_n} & \frac{\partial \omega_x}{\partial d_n} & \frac{\partial \omega_x}{\partial a_n} \\ \frac{\partial \omega_y}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \omega_y}{\partial \alpha_n} & \frac{\partial \omega_y}{\partial d_n} & \frac{\partial \omega_y}{\partial a_n} \\ \frac{\partial \omega_z}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \omega_z}{\partial \alpha_n} & \frac{\partial \omega_z}{\partial d_n} & \frac{\partial \omega_z}{\partial a_n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

因此，机器人末端执行器的几何误差参数与机器人D-H运动学模型参数微小偏差的关系为

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \Delta X_3 \\ \Delta X_4 \\ \Delta X_5 \\ \Delta X_6 \end{bmatrix} \quad (7)$$

工业机器人校准可按校准需求分为空间长度校准(简称 D_i 法)、空间坐标校准(简称 P_{i3} 法)与空间位姿校准(简称 P_{i6} 法)三类。以6自由度工业机器人采用D-H运动学模型进行校准与补偿为例，此时需要考虑24个参数， D_i 法每次测量可得到1个长度值，故至少应进行24次测量； P_{i3} 法每次测量可以得到3个值，故至少应选取8个测量点； P_{i6} 法每次测量可得到6个值，故至少应选取4个测量点。不同的运动学模型需要考虑的初始参数情况不同，应针对具体问题具体分析。

2) MDH 模型

4参数的D-H模型无法避免奇异的产生，当相邻的两个关节处于平行或接近平行的状态时，连杆参数的变化与连杆坐标系参数的变化是负相关的，即使连杆参数的变化极其微小，仍可能导致连杆坐标系参数产生较大变化，即参数 d_i 会产生很大的变化。针对此问题，Hyati引入绕 y 轴旋转的转角参数 β 作为附加项，形成了包含5参数的MDH模型^[11]。相邻平行关节之间的变换模型如图4所示。

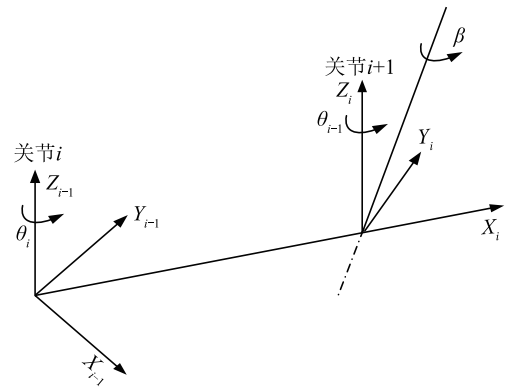


图4 MDH 相邻平行关节的变化

通过引入 β 参数，可使 z_{i-1} 轴变换到 z_i 轴，以避免出现微小偏差问题。该模型其它参数的定义与D-H模型一致，当相邻杆轴线处于平行状态时， $d_i = 0$ ，当相邻杆轴线处于非平行状态时， $\beta_i = 0$ 。因此第 $i-1$ 与第 i 个关节之间的旋转矩阵如下

$$A_{i-1}^{i-1} = \text{Trans}(Z_{i-1}, d_i) \cdot \text{Rot}(Z_{i-1}, \theta_i) \cdot \text{Trans}(X_{i-1}, a_i) \cdot \text{Rot}(X_i, \alpha_i) \cdot \text{Rot}(Y_i, \beta_i) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_i \cos \beta_i - \sin \alpha_i \sin \theta_i \sin \beta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \cos \theta_i \sin \beta_i + \sin \alpha_i \sin \theta_i \cos \beta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \cos \beta_i + \sin \alpha_i \cos \theta_i \sin \beta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & \sin \theta_i \sin \beta_i - \sin \alpha_i \cos \theta_i \cos \beta_i & a_i \sin \theta_i \\ -\cos \alpha_i \sin \beta_i & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \cos \beta_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3) POE 模型

针对 D-H 模型以及 MDH 模型中的奇异性问题,应用旋转变代数理论建立指数积公式法——POE 法。应用 POE 模型,可以捕捉到机器人在旋量角度作用下末端执行器的实时变换,且末端执行器的表达式由相邻关节之间通过刚体运动构成,通过采集并分析大量的末端执行器数据,可以辨识并补偿机器人参数^[12]。设机器人的基坐标系为{B}、工具坐标系为{T},机器人的全局 POE 正向运动学模型如图 5 所示。

设 $g_{BT}(0)$ 为机器人处于 0 位时{B}, {T}之间的变换, $\hat{\xi}_i$ 为第 i 个关节处的关节旋量, q_i 为第 i 个关节的旋转角度,则 n 自由度的串联机器人的正向运动学公式为

$$g = \exp[\hat{\xi}_1 q_1] \exp[\hat{\xi}_2 q_2] \cdots \exp[\hat{\xi}_n q_n] g_{BT}(0) \quad (9)$$

假设测量坐标系为{M},则基于测量坐标系的机

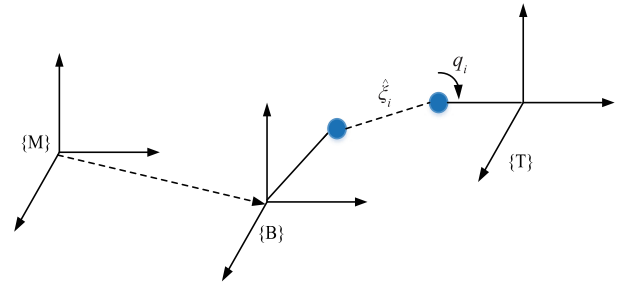


图 5 全局 POE 模型正向运动学模型

器人正向运动学模型为

$$g = g_{MB}(0) \exp[\hat{\xi}_1 q_1] \exp[\hat{\xi}_2 q_2] \cdots \exp[\hat{\xi}_n q_n] g_{BT}(0) \quad (10)$$

上述三种模型是目前国内外学者使用频率较高的工业机器人运动学模型,可基本满足对工业机器人校准的模型构建需求。对上述三种模型进行总结,如表 1 所示。

表 1 工业机器人运动模型对比说明

模型名称	模型特点	模型优点	模型缺点
D-H 模型	4 参数模型	参数少,建立过程简单	存在奇异性,不满足完整性与连续性
MDH 模型	5 参数模型	具有更好的正向解和反向解,能解决相邻关节平行关系的奇异问题	不能完全解决奇异问题,当相邻关节垂直或近似垂直时,仍会产生奇异
POE 模型	需要建立两个坐标系:基坐标系与工具坐标系	无冗余性,参数具有完整性及连续性	实现比较复杂

3 工业机器人校准方法及补偿方法研究现状

3.1 工业机器人校准方法研究现状

根据环境场景不同,可选择不同方法得出工业机器人校准模型中的末端位姿测量值 P_{mes} ,具体方法可分为三类,下面分别进行介绍。

1) 空间长度校准法

空间长度校准法应用球杆仪对机器人末端执行器进行测量,高精度径向距离线性传感器安装在球杆仪伸缩杆中,能够在较小空间环境中实现工业机器人的校准^[13]。球杆仪配合一个已知参数结构的三角板 BCD (以三角板的一个点为圆心,可建立用户坐标系,进而可求得三个点的坐标),一端连接在机器人末端 A ,另一端分别与三角板的三个顶点连接,可测量得出长度

l_1, l_2, l_3 , 由这三个长度间接求得机器人末端执行器在此处的空间坐标,如图 6 所示。

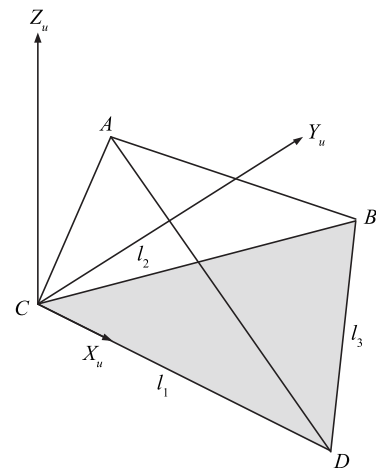


图 6 球杆仪校准示意图

具体方程组为

$$\begin{cases} l_1 = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2} \\ l_2 = \sqrt{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2} \\ l_3 = \sqrt{(x_A - x_D)^2 + (y_A - y_D)^2 + (z_A - z_D)^2} \end{cases} \quad (11)$$

式中： x_A, y_A, z_A 为待求的机器人末端执行器位置； x_B, y_B, z_B 为三角板 B 坐标； x_C, y_C, z_C 为三角板 C 坐标； x_D, y_D, z_D 为三角板 D 的坐标。

2) 空间坐标校准法

空间坐标校准法根据三坐标测量机、激光跟踪仪测量得到机器人末端执行器的位置。

三坐标测量机法：三坐标测量机是一种颇具代表性的坐标测量仪器，其测量准确度可达微米级别。吴德烽^[14]等人应用三坐标测量机，采用 Levenberg-Marquardt^[15]优化方法对工业机器人的运动学模型进行补偿，并最终将机器人的绝对定位精度提升了一倍。

激光跟踪仪法：光学传感器校准系统在工业机器人校准领域中应用十分广泛，激光跟踪仪作为一种高端型光学精密测量仪器，具有灵敏度高、精度高、效率高、安装调整方便、柔性高、可操作性强等优点，在光学传感器领域中占据主导地位。利用激光跟踪仪可确定机器人的基坐标系，进而求解机器人的连杆扭

角，然后测量机器人末端执行器的坐标值，通过串口获得工业机器人各个轴的角度值以建立校准方程。

采用空间坐标校准法进行空间坐标测量得出的 P_{mes} 具体表示为

$$P_{mes} = [x \ y \ z]^T \quad (12)$$

3) 空间姿态校准法

空间姿态校准法基于激光跟踪仪六自由度测量和视觉组合测量的方式，可对机器人进行全参数校准。首先，在机器人末端工具上安装六自由度激光靶标，跟踪仪发出探测激光入射到靶标上，利用空间球坐标进行测距和测角，以配合激光六自由度靶标同步进行光束入射角、俯仰角和滚转角测量，进而实现机器人末端工具位置和姿态的实时跟踪测量^[16]。同时采用视觉测量系统^[17]对靶标进行全局测量。实时通信与数据处理系统同步获得机器人、跟踪仪、视觉测量系统和六自由度激光靶标的的数据，将数据汇总后传至上位机，利用上位机进行实时校准。 P_{i6} 法是最受欢迎的方法，具有测量范围大的优势，但其难度相对较高，容易受运动学模型内部参数标定的影响，且成本昂贵。采用 P_{i6} 法获得的机器人末端执行器位姿单次测量结果是一个 6D 值， P_{mes} 的具体表示为

$$P_{mes} = [x_i, y_i, z_i, a_i, b_i, c_i]^T \quad (13)$$

表 2 是对上述工业机器人校准方法的总结。

表 2 工业机器人校准方法对比说明

校准方法分类	校准方法特点	校准方法优点	校准方法缺点
空间长度校准法	单次测量所得的结果是一个长度值	小巧便捷，操作简单	不适用于大空间校准，不适用于对校准准确度要求高的场合
空间坐标校准法	单次测量所得的结果是一个三维空间值	校准效率与准确度较高，适用于大空间校准	不适用于微小、易变型的工件校准
空间姿态校准法	单次测量所得的结果是一个 6D 值，包括末端执行器的位置与姿态	测量次数少，测量范围大	难度高，成本昂贵

3.2 工业机器人误差补偿方法研究现状

工业机器人在工业生产中发挥着巨大作用，其绝对定位精度直接影响生产效率和质量，而影响机器人定位精度的主要因素包括几何参数误差和非几何参数误差，因此，可采用基于运动学模型的误差补偿方法^[18-19]与基于非运动学模型的误差补偿方法^[20]针对上述两类误差进行补偿，以提高机器人的定位精度。

3.2.1 基于运动学模型的误差补偿方法

基于运动学模型的误差补偿方法主要解决由几何参数误差导致的工业机器人绝对定位精度低的问题，

通过辨识影响定位精度的运动学的具体参数并对其进行补偿以提高机器人绝对定位精度。基于运动学模型的误差补偿方法主要包括拉线传感器法、几何约束法和粒子群优化法。

1) 拉线传感器法

通过一站法、二站法或多战法进行工业机器人标定，之后使用如最小二乘法等算法对运动学模型中的参数进行辨识，根据辨识结果对机器人模型进行补偿，最终达到提高机器人的绝对定位精度的目的^[21]。拉线传感器法能够对机器人的运动学参数进行补偿，且其

迭代次数较低,但使用该方法容易产生局部最优解问题。

2)几何约束法

几何约束法基于空间几何约束原理,利用激光和若干靶标以及一些辅助设备即可实现工业机器人的标定与补偿。其中双 PSD(Position Sensing Device)法是几何约束校准方法中比较主流的方法,该方法采用两个 PSD 配合工作,机器人末端执行器上的激光指针从一个 PSD 中心反射到另一个 PSD 中心,可以在线估算机器人坐标系与 PSD 坐标系之间的转换关系^[22]。采用激光跟踪仪校准^[23]是几何约束校准中的另一种常见方法,该方法在工具坐标系和基坐标系之间构建一种稳定的转换关系,之后基于转换关系使用算法对几何参数误差进行辨识,然后对机器人的运动学模型进行补偿,以提高其定位精度。几何约束校准方法能够实现在线工业机器人补偿,实时性较高,但成本也较高。

3)粒子群优化法

粒子群算法由 Kennedy 等人通过研究种群的自然规律得出的,可通过建立机器人运动学模型(D-H 模型等),将对集合误差的补偿转换成对高维非线性方程的求解。近年来,针对机器人绝对定位精度低的问题,普遍采用改进的粒子群优化算法与量子粒子群优化算法,改进的粒子群方法可选择最优姿态,量子粒子群算法将机器人的运动学模型参数进行转化,最终使之成为非线性的系统优化问题,可较好地对模型进行补偿,从而有效提高定位精度^[24]。粒子群校准方法能够提高机器人的精度,且能够得到全局最优解,但其求解系数的数学模型相对复杂,且收敛速度较慢。

3.2.2 基于非运动学模型的误差补偿方法

基于非运动学模型误差补偿方法主要解决由非几何参数误差引起的工业机器人绝对定位精度低的问题,

包括支持向量机回归算法、神经网络法、空间插值法。

1)支持向量机回归算法

支持向量机回归算法由统计学理论发展而来,可以采用较少的样本进行算法收敛迭代。机器人运动过程中,实际位姿可能与理想位姿存在偏差,因此可以通过激光测距仪测量机器人位置偏差值,然后采用支持向量机算法针对机器人的末端执行位置进行误差补偿^[25]。该方法的自动优化结构能够克服局部最小、过学习等缺点,且适用于小样本学习。

2)神经网络法

首先使用学习样本(机器人运动学模型所求出的解)对神经网络进行训练,训练完成后,将机器人末端执行器的具体位姿数据输入输入层,经神经网络计算后在输出层输出机器人的各关节转角结果。神经网络可以通过不断地迭代更新对输入的样本进行训练^[26],可通过收敛后的输出层辨识影响机器人定位精度的参数,然后对误差进行补偿。但是采用神经网络法进行误差补偿存在过拟合、收敛性差且不适用于小样本迭代的缺点。

3)空间插值法

将机器人工作空间按照一定长度划分为 n 个网格单元,利用校准设备管理机器人的定位误差库,可得到机器人工作空间中任意位置处的定位误差。关节空间网格划分^[27]以扇形结构为最小单元,对机器人前三个关节的工作空间进行划分,配合使用激光跟踪仪,捕获机器人末端实际抵达的网格空间,以计算各网格处的机器人定位误差。采用空间插值法对误差进行补偿可以解决机器人温度漂移问题,且无需建立复杂的运动学模型,但需针对不同的应用环境划分不同的网格比例,算法的可移植性略低。

对工业机器人误差补偿方法进行总结,如表 3 所示。

表 3 工业机器人误差补偿方法对比

方法类别	方法名称	优点	缺点
运动学模型 误差补偿方法	拉线传感器法	迭代次数低	容易陷入局部最优问题
	几何约束法	在线校准,实时性高	成本高
	粒子群优化法	可获得全局最优解	数学模型复杂,且收敛速度慢
非运动学模型 误差补偿方法	支持向量机回归算法	可避免局部最优与过学习	仅适用于小样本
	神经网络法	适用于大样本校准环境	存在过学习情况,收敛慢
	空间插值法	可解决温度漂移问题	可移植性低

4 总结及展望

工业机器人的校准与补偿在工业自动化、智能化中发挥着越来越重要的作用,高精度作业对机器人末端执行器定位精度提出了高要求。本文以“中国制造 2025”全面推进实施制造强国的战略为背景,对工业机器人末端执行器定位精度的影响因素进行梳理,针对国内外工业机器人校准与补偿技术的现状,以工业机器人校准模型为导向,介绍了 D-H, MDH, POE 三种工业机器人运动学模型的原理及应用特点,并具体分析了不同其几何参数误差与运动学模型的关系。对空间长度校准法、空间坐标校准法、空间姿态校准法三种工业机器人校准方法的数学原理、应用特点进行对比与总结,并阐述了基于运动学模型以及基于非运动学模型的工业机器人误差补偿方法的工作原理、典型代表及使用时的优缺点。最后,将从工业机器人校准方法、校准模型、校准装置、校准软件平台四个维度对工业机器人校准技术的发展趋势进行分析与展望,以更好地助力智能制造在我国工业领域的推广。

1) 工业机器人在线校准方法研究

目前工业机器人的校准主要是在出厂前对其绝对定位精度进行校准并出具报告,部分型号的机器人可根据数据进行模型补偿。但是,工业机器人的精度损失往往是在使用过程中伴随摩擦等现象逐渐出现的,出厂前的一次性校准及补偿难以满足要求。因此,需要研究面向工业机器人应用现场的实时在线校准方法,将工业机器人的校准融入全使用周期,规定在固有时间段内或出现固有状况时,工业机器人即进入自我在线校准程序,完成在线校准。

2) 优化工业机器人校准模型

目前工业机器人的校准模型难以实现全参数校准,在今后的研究中,需要对工业机器人的各种参数误差来源进行更加全面的分析,构建面向大多数机器人的全参数误差补偿模型,实现全参数补偿。

3) 研究多系统协同的大尺度校准装置

随着“工业 4.0”的发展,越来越多的行业将需要多个机器人共同协作以高效完成工作,特别是大型作业现场,往往需要多机器人协同配合,因此,单一的校准装置很可能无法满足校准需求,需要将校准装置进行有效组合,相互配合,以达到高效校准的目的。多个校准装置相互配合的场景中,各装置的站位布局也是影响工业机器人绝对定位精度校准准确性的重要

因素之一,通过有效的站位布局优化方法,可以提高工业机器人的校准精度。考虑到校准系统的智能化,未来可以应用人工智能方法(例如:深度强化学习等)解决站位布局优化问题。开展针对多机器人协同系统的在线校准技术研究对保障多机器人系统的高精度、高可靠性具有重要意义。

4) 研建自主可控的工业机器人校准软件平台

目前的工业机器人校准软件平台大都由国外软件公司开发。这些软件可对部分型号的工业机器人进行部分参数和性能的检测和校准,但由于知识产权的原因,难以在这些国外软件的基础上进行升级和改造,所以亟需研制具备自主知识产权的软件。研制软件平台时应考虑以下要求:①软件平台应与被校对象、校准装置高效通信,并具有方便快捷的人机交互界面;②软件平台应具备全参数性能测试与补偿、三维实时校准布局与显示、校准数据的融合与分析以及报告管理等功能;③软件平台应是动态的,可针对多种设备进行校准,并能够满足不同环境下的校准需求;④校准软件应考虑设计针对多机器人协作系统的校准模块,提高校准的灵活性与可靠性。

伴随智能制造的快速发展,高精度的工业机器人将在工业制造领域占据主导地位。开展工业机器人在线校准方法研究、优化工业机器人校准模型、研究工业机器人多系统协同的大尺度校准装置、研建自主可控的工业机器人校准软件平台,形成一套柔性高精度在线校准体系将成为我国工业机器人发展的必然趋势。

参考文献

- [1] 陈巍,叶松涛,张海洋,等.一种基于激光位移传感器的机器人工具校准方法[J].控制与信息技术,2020(3):29-32.
- [2] 何学军.大型结构件数控加工在位计量检测技术研究[J].计测技术,2019,39(3):51-54.
- [3] 周斌斌,马骊群,赵子越.目标引导系统模型研究[J].计测技术,2018,38(5):59-64.
- [4] 张学涛,田阳,叶威,等.三自由度柔性并联机器人运动参数检测系统开发[J].计测技术,2010,30(3):25-28.
- [5] Messay T, R Ordóñez, Marcil E. Computationally efficient and robust kinematic calibration methodologies and their application to industrial robots[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2016, 37: 33-48.
- [6] Sun T, Lian B, Zhang J, et al. Kinematic calibration of a 2-DoF over-constrained parallel mechanism using real inverse kinematics[J]. IEEE Access, 2018: 1.

- [7] 陆艺, 沈添秀, 罗哉, 等. 基于线结构光传感器的工业机器人运动学参数标定[J]. 计量学报, 2021, 42(1): 66–71.
- [8] 陆艺, 葛文琦, 郭斌. 基于标准球距离约束的工业机器人参数标定[J]. 计量学报, 2020, 41(9): 1048–1054.
- [9] 赵艺兵, 温秀兰, 乔贵方, 等. 基于几何参数标定的串联机器人精度提升[J]. 计量学报, 2020, 41(12): 1461–1467.
- [10] Jingfu P, Ye D, Gang Z, et al. An Enhanced Kinematic Model for Calibration of Robotic Machining Systems with Parallelogram Mechanisms[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2019, 59: 92–103.
- [11] Jiang Z, Zhou W, Li H, et al. A New Kind of Accurate Calibration Method for Robotic Kinematic Parameters Based on the Extended Kalman and Particle Filter Algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017.
- [12] A distance error based industrial robot kinematic calibration method[J]. Industrial Robot, 2014, 41(5): 439–446.
- [13] 魏进. 基于球杆仪的立式数控铣床反向间隙检测[J]. 内燃机与配件, 2020(17): 137–138.
- [14] 吴德峰, 李爱国, 马孜, 等. 三维表面扫描机器人系统本体标定新方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(17): 9–14.
- [15] 赵子越, 甘晓川, 马骊群. 一种基于多传感系统协同测量的联合平差组网方法[J]. 传感技术学报, 2019, 32(1): 104–109.
- [16] 刘凯. Leica 绝对激光跟踪仪在工业机器人校准及检测中的应用[J]. 智能制造, 2018(5): 43–46.
- [17] De Smet P. Robot-cell calibration[M]. Google Patents. 2005.
- [18] Wu L, Yang X, Chen K, et al. A Minimal POE-Based Model for Robotic Kinematic Calibration With Only Position Measurements[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2015, 12(2): 758–763.
- [19] 张馨龙, 田光宇, 黄勇. 三轴正交机器人运动误差的建模与分析[J]. 计量学报, 2017, 38(4): 396–401.
- [20] 任永杰, 尹仕斌, 郑继贵. 面向现代柔性制造的工业机器人高精度控制方法[J]. 航空制造技术, 2018, 61(5): 16–21.
- [21] Gan Y, Duan J, Dai X. A calibration method of robot kinematic parameters by drawstring displacement sensor[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(5).
- [22] 邓志辉, 张西良, 程宇. 双 PSD 工业机器人标定系统多目标位置控制研究[J]. 机械设计与制造, 2019(10): 242–245, 250.
- [23] 甘晓川, 赵子越, 马骊群. 大尺寸测量系统运动目标测量能力校准现状[J]. 计测技术, 2018, 38(5): 36–41.
- [24] 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.
- [25] 王闯闯, 何智成, 成艾国. 基于机器视觉和支持向量机的汽车焊点定位研究[J]. 汽车工程学报, 2019, 9(1): 13–20.
- [26] Jiang Z H, Ishida T, Sunawada M. Neural Network Aided Dynamic Parameter Identification of Robot Manipulators[J]. 2007.
- [27] 任永杰, 尹仕斌, 郑继贵. 面向现代柔性制造的工业机器人高精度控制方法[J]. 航空制造技术, 2018, 61(5): 16–21.

收稿日期: 2021-02-02; 修回日期: 2021-03-26

基金项目: 工信部民用飞机技术基础科研项目(MJ-2017-J-83); 国家“十四五”技术基础科研项目(JSJL2020205A001)

引用格式: 宫思远, 赵子越, 刘倩頔. 工业机器人校准技术与补偿方法发展现状及趋势[J]. 计测技术, 2021, 41(3): 1–8.