

铣削工业机器人数字孪生驱动模型的构建与验证

马创业,田威,胡俊山,康瑞浩,何晓煦
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要:针对工业机器人智能装备服役状态感知检测手段、智能控制能手段有限的问题,以工业机器人智能铣削装备为研究对象,设计一种数字孪生驱动模型构建方法。采用 L-M 算法对关键参数进行修正,使孪生模型对装备铣削轨迹的映射准确度从 1.32 mm 提高到 0.15 mm,提高了近 80%,验证了孪生驱动模型建立的正确性和关键参数修正的必要性。

关键词:数字孪生;工业机器人;建模参数修正;铣削加工

中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)04-0160-04

Construction and Validation of Digital Twin Drive Model for Milling Industrial Robots

MA Chuangye, TIAN Wei, HU Junshan, KANG Ruihao, HE Xiaoxu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: For the limited means of existing industrial robot intelligent equipment service state perception and detection and intelligent control energy, taking industrial robot intelligent milling equipment as the research object, designs a digital twin drive model construction method. L-M algorithm is applied to correct the key parameters, so that to increase the twin model mapping accuracy of the equipment milling trajectory to 0.15 mm from 1.32 mm, with an increase of nearly 80%, which verifies the correctness of twin-driven model building and the necessity of key parameter correction.

Keywords: digital twin; industrial robot; modelling parameter correction; milling machining

0 引言

随着机器人技术的快速发展,工业机器人在航空航天领域的应用愈加广泛,如在飞机翼面钻铆、型面铣削、部件装配中的应用等^[1]。航空航天产品的研制与批产对制造精度与加工质量要求较高,现有工业机器人装备由于其本身结构特性导致绝对定位精度不高、加工质量不稳定,而相关感知检测手段、智能控制能手段缺乏导致难以实现对工业机器人装备的在线监测、闭环反馈控制,这也是当前全球工业实现智能制造所面临的关键问题之一。数字孪生技术(digital twins, DT)的出现为信息-物理空间的交互融合提供了解决方案,可实现对生产装备、产线甚至整个工厂进行实时、有效的监测和控制。因此为航空航天智能制造装备建立数字孪生系统对我国建设航空航天强国具有重要的意义。

目前,数字孪生技术应用研究大都围绕工厂、车间、产线等宏观生产数据的可视化,对实际物理装备的数字孪生建模技术展开的研究较少。爱沙尼亚 KUTS V 等基于 AR/VR 技术构建了 MotomanGP8 虚拟模型和虚拟操控界面,可以通过 AR/VR 头盔实现对虚拟机械臂的运动控制^[2];挪威 ØVERN A 使用 Visual Components 建立可视化模型,探究了 OPC UA 协议下信息-物理空间内工业机器人运行的同步性^[3];山东大学王春晓等基于系统工程建

模软件 M-Works 构建了三轴数控铣床的综合机械、电气等学科的多领域模型,进行了虚拟调试验证,但并未实现物理-信息世界的信息交互融合^[4]。当前的研究成果多数对装备的运行机理和运动状态进行了研究,对装备的生产效率和产品加工质量有所忽视。由于工业机器人存在机械加工误差、装配误差、磨损等,导致其工作性能与理论设计性能不一致^[5]。因此,使用理论参数建立的孪生模型,不能准确反映出工业机器人实时加工信息。本文设计了基于参数修正的数字孪生驱动模型构建方法,从设备本身运动机理出发,并结合其他传感器实时采集机器人装备加工和运行数据,可以更加真切地反映工业机器人的作业效果,实施更有效的控制策略。

1 工业机器人孪生驱动模型构建

六自由度关节型工业机器人主要由连杆臂、关节或其他形式的运动副组成的一个多自由度的机械执行系统^[6]。孪生驱动模型规定了工业机器人各个关键运动部件之间的绝对和相对运动关系,是数字孪生模型的核心。KR500 M2830MT 型工业机器人是库卡公司专门为高负载领域铣削加工设计的多功能机器人,各个连杆臂通过转动副连接在一起,前 3 个关节由单独的伺服电机驱动,后 3 个关节运动存在相互耦合的关系,结构运动组合为 RBR 型。

本文根据所使用的工业机器人结构和各关节臂运动组合状况进行分析,采用描述简单、最广泛的 D-H^[7]模型

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB1707403)

第一作者简介:马创业(1994—),男,河南太康人,硕士研究生,研究方向为制造业信息化,machuangye@nuaa.edu.cn。

在各连杆上建立连杆坐标系,以此确定各连杆臂之间相应的位姿关系,有效保证数字孪生模型对实际机器人铣削装备加工轨迹的完整映射。在 D-H 模型中,任意连杆之间关系由关节转角 θ_i 、连杆偏距 d_i 、连杆长度 a_i 和扭角 α_i 这 4 个参数表示(其中 i 为机器人第 i 个关节),且通过右手法则确定正负。六轴工业机器人全部为旋转关节,只有关节转角 θ_i 为变量,其余均为常量。前后两连杆坐标系之间的齐次变换矩阵为

$${}^i T_{i+1} = \text{Rot}(z, \theta_i) \cdot \text{Trans}(0, 0, d_i) \cdot \text{Trans}(a_i, 0, 0) \cdot \text{Rot}(x, \alpha_i) \quad (1)$$

进而,机器人正向孪生驱动模型可表示为

$${}^0 T_n = {}^0 T_1 {}^1 T_2 \cdots {}^{n-1} T_n = \begin{bmatrix} {}^0 n_n & {}^0 o_n & {}^0 a_n & {}^0 p_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0 R_n & {}^0 p_n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: ${}^0 R_n$ 为坐标系 $\{n\}$ 相对坐标系 $\{0\}$ 姿态矩阵; ${}^0 p_n$ 为坐标系 $\{n\}$ 的原点在坐标系 $\{0\}$ 中的位置。

图 1(a) 为 KR500 M2830MT 型工业机器人结构示意图;根据前文所述的连杆臂坐标系建立方法构建了连杆臂坐标系,如图 1(b) 所示,坐标系的主要技术参数如表 1 所示。根据机床坐标系的建立方法,将刀具坐标系建立在电主轴鼻尖的中心处,并使用激光跟踪仪和 SA 软件获取连

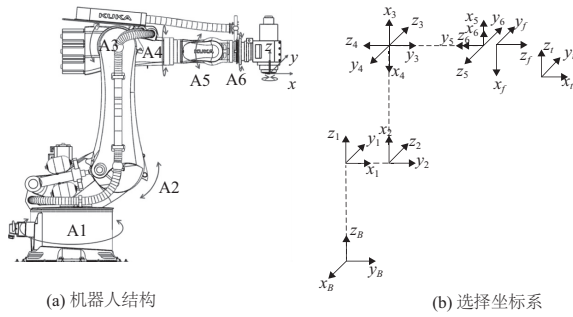


图 1 工业机器人结构示意图及连杆坐标系

杆坐标系 6 与工具坐标系的转换关系,并输入到机器人本身 KR C4 控制系统内。

表 1 连杆臂坐标系连杆变换参数

变换	关节转角 $\theta_i / (^\circ)$	关节偏置 d_i / mm	连杆长度 a_i / mm	连杆扭角 $\alpha_i / (^\circ)$
B-1	$\theta_0 + 90$	d_0	0	0
1-2	$\theta_1 - 90$	0	a_1	-90
2-3	θ_2	0	a_2	0
3-4	$\theta_3 + 180$	0	0	90
4-5	$\theta_4 + 180$	d_4	0	-90
5-6	θ_5	0	0	-90
6-f	θ_6	d_6	0	180

2 工业机器人铣削装备孪生驱动关键参数修正

2.1 关键参数修正模型构建

误差的存在是绝对的,工业机器人本身结构参数误差对使用效能影响最大,约占 90%^[8]。机器人结构复杂紧凑,传动机构主要包括减速器和轴承,在机器人自身质量以及惯性力的影响下会造成一定的变形,加上关节在反向运动时会出现齿轮间隙,加大关节转角的误差,造成机器人关节转角误差的影响因素较多,很难用算法和单一的模型去描述。

对机器人的结构和运动原理分析可知,机器人末端位姿是与机器人结构参数(关节转角 θ_i 、关节偏置 d_i 、连杆长度 a_i 、连杆扭角 α_i , $i = 1, 2, \dots, n$)有关的多元函数。当各项几何参数误差较小时,其与机器人末端位姿误差之间的关系可以近似为线性变换,对工业机器人运动规则模型各项依次进行全微分可以得到

$$dP = \begin{bmatrix} dP_x \\ dP_y \\ dP_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_x}{\partial a_1} & \cdots & \frac{\partial P_x}{\partial a_n} & \frac{\partial P_x}{\partial \alpha_1} & \cdots & \frac{\partial P_x}{\partial \alpha_n} & \frac{\partial P_x}{\partial d_1} & \cdots & \frac{\partial P_x}{\partial d_n} & \frac{\partial P_x}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial P_x}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial P_y}{\partial a_1} & \cdots & \frac{\partial P_y}{\partial a_n} & \frac{\partial P_y}{\partial \alpha_1} & \cdots & \frac{\partial P_y}{\partial \alpha_n} & \frac{\partial P_y}{\partial d_1} & \cdots & \frac{\partial P_y}{\partial d_n} & \frac{\partial P_y}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial P_y}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial P_z}{\partial a_1} & \cdots & \frac{\partial P_z}{\partial a_n} & \frac{\partial P_z}{\partial \alpha_1} & \cdots & \frac{\partial P_z}{\partial \alpha_n} & \frac{\partial P_z}{\partial d_1} & \cdots & \frac{\partial P_z}{\partial d_n} & \frac{\partial P_z}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial P_z}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta a_1 \\ \vdots \\ \Delta a_n \\ \Delta \alpha_1 \\ \vdots \\ \Delta \alpha_n \\ \Delta d_1 \\ \vdots \\ \Delta d_n \\ \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

上式左侧为雅克比矩阵,右侧用 Δq 表示,则可以简化为 $Ax=b$ 的形式:

$$\Delta P(q) = J(q) \Delta q \quad (4)$$

2.2 铣削工业机器人建模参数修正算法

传统的工业机器人运动学标定仅对几何误差参数的修正有效,修正范围和效果难以达到数字孪生建模的要

求。关键建模参数的修正是一个不断迭代、寻求最优解的过程,所以本节利用 Levenberg-Marquardt (L-M) 算法对建模误差进行修正。相较于最小二乘法, L-M 算法引入了自适应阻尼系数 μ , 以修正相应变量的步长和方向, 计算公式见式(8), 对高斯牛顿算法中逆矩阵不存在的短板进行了完善, 也可有效避免雅克比矩阵的奇异性问题, 完美融合了高斯牛顿算法与梯度下降算法的特点。

$$\Delta q = (J(q)^T J(q) + \mu I)^{-1} J(q)^T \Delta P(q) \quad (5)$$

对机器人实际建模参数进行修正的具体执行流程为:

1) 首先计算铣削工业机器人的雅克比矩阵 $J(q)$, 也是参数的修正矩阵作为算法执行第 k 次迭代的矩阵 $J(q_k)$;

2) 将第 k 次的参数修正矩阵 $J(q_k)$ 、自适应阻尼系数 μ_k 和位置误差 $\Delta P(q_k)$ 代入 L-M 算法计算公式可得

$$\Delta q_k = (J(q_k)^T J(q_k) + \mu_k I)^{-1} J(q_k)^T \Delta P(q_k) \quad (6)$$

3) 计算参数误差 q_{k+1} :

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (7)$$

4) 自动更新获取第 k 次自适应阻尼系数 μ_k :

$$\begin{cases} \mu_0 = 0.001 \\ \mu_{k+1} = \begin{cases} 0.001\lambda & \text{如果 } \|\Delta P(q_{k+1})\| \geq \|\Delta P(q_k)\| \\ \frac{0.001}{\lambda} & \text{如果 } \|\Delta P(q_{k+1})\| < \|\Delta P(q_k)\| \end{cases} \\ 2.5 < \lambda < 10 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\|\Delta P(q_{k+1})\|$ 和 $\|\Delta P(q_k)\|$ 分别为第 $k+1$ 次和第 k 次迭代的位置误差的二范数, 为确定自适应阻尼系数 μ_{k+1} 的约束条件, 当满足 $\|\Delta P(q_{k+1})\| - \|\Delta P(q_k)\| \leq \varepsilon$ ($\varepsilon = 0.0001$) 条件时, 相邻迭代过程的位置误差范数之差趋于 0, 认为已经收敛; λ 为无量纲迭代参数, 根据经验法确定其取值范围为 2.5~10.0 之间。

基于 KR500 R2830MT 的理论结构参数, 以激光跟踪仪作为采样点坐标测量工具, 在工业机器人的工作空间内任选 60 个点作为待修正参数的采样样本, 进行参数修正试验, 得到相关参数的修正值, 结果见表 2, 以保证孪生模型与机器人物理实体参数的一致性。

表 2 机器人建模参数修正结果

连杆臂序号	$\Delta a/\text{mm}$	$\Delta \alpha/(\circ)$	$\Delta d/\text{mm}$	$\Delta \theta/(\circ)$
1	-0.900	+0.000 1	-1.020 0	-0.020
2	+0.233	+0.030 0	+0.135 0	—
3	+0.503	-0.002 0	-0.005 7	—
4	+0.800	-0.004 0	+0.100 2	+0.280
5	+0.200	+0.050 0	+0.000 3	+0.019
6	-0.105	+0.010 0	+0.050 0	-0.601

3 机器人关节转角数据实时采集

由于伺服电机、减速器之间和内部传动的齿轮存在间隙, 加之机器人各连杆自身质量、负载和运动过程自身的惯性力作用会导致在关节处产生柔性变形, 导致通过编码

器间接得到的关节转角值与实际关节转角值之间存在角度偏差, 且该部分偏差难以通过简单的算法模型进行拟合, 所以本文通过在工业机器人各个关节处安装高精度光栅尺位移传感器构建实时测量反馈系统(图 2), 直接测量各关节转角, 实时映射驱动机器人数字孪生模型。

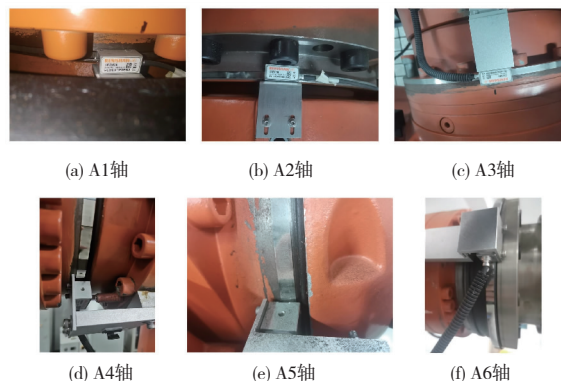


图 2 工业机器人各关节光栅尺安装图

为验证建立数字孪生模型的准确性, 分别利用理论参数和修正参数建立驱动模型, 对比两种参数下数字孪生模型对机器人铣削运动轨迹的准确度。

4 实验验证

工业机器人铣削加工系统试验平台如图 3 所示, 主要由 KR500 M2830MT 型工业机器人本体、机器人控制柜、铣削末端、工装台、工件、激光跟踪仪及其他附件组成, 采用 API Radian 激光跟踪仪对机器人制孔位置进行实时测量。

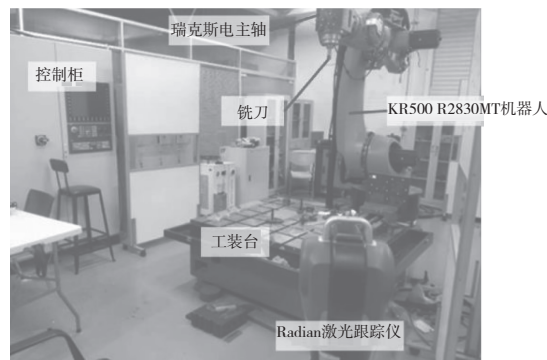


图 3 工业机器人铣削加工系统试验平台

本文在铣削过程中连续采集了 150 个点位数据, 验证所建立数字孪生驱动模型和参数修正方法的正确性。为便于分析数据, 对坐标数据进行了简化处理, 即统一将采集到的点位坐标数据与工艺设计理论点位坐标进行求差。将根据理论参数所建立的模型、修正参数所建立的模型与激光跟踪仪采集到的刀具运动轨迹从 x 、 y 、 z 方向和综合偏差角度对数字孪生模型建立的精度和可靠性进行分析, 综合偏差的计算公式为

$$\Delta P = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (9)$$

式中 Δx 、 Δy 、 Δz 分别表示相应点位数据与工艺设计时刀位点理论坐标数据的差值。

图4—图7表示根据理论参数、修正参数分别建立的数字孪生驱动模型反映的刀具运动轨迹和激光跟踪仪采集到的刀具运动轨迹与工艺设计时理论刀具点位之间的差值(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。通过对比发现,采用机器人销售方所给相关理论参数建立的数字孪生模型所反映的与采用激光跟踪仪实时监测到的机器人末端TCP点轨迹数据差别较大,两者差值最大时可达1.32 mm;而采用修正之后的关键参数所建立的数字孪生模型与激光跟踪仪所检测到的结果保持相对一致,两者差值最大时仅仅只有0.15 mm,与理论参数建立的数字孪生模型相比能够更准确地映射出机器人铣削的实时加工轨迹。

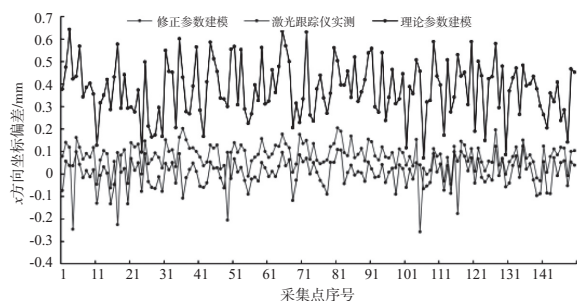
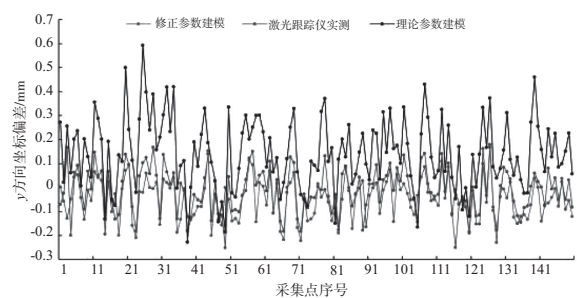
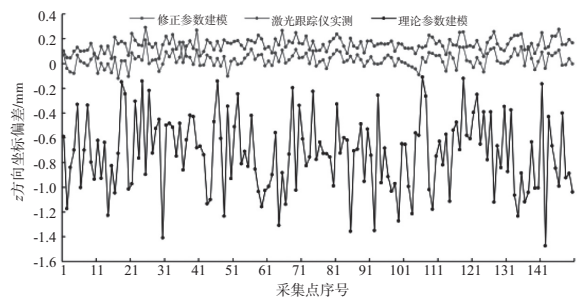
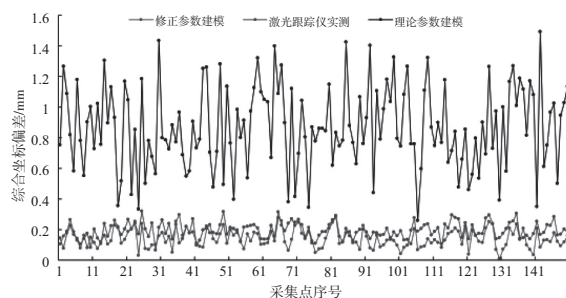
图4 x 方向上坐标偏差对比图5 y 方向上坐标偏差对比图6 z 方向上坐标偏差对比

图7 综合坐标偏差对比

5 结语

本文采用D-H模型建立连杆坐标系,确定机器人铣削系统各连杆之间相互运动关系,进而建立数字孪生驱动模型,建立了驱动模型关键参数修正模型,并提出用L-M算法对关键参数进行修正。在实际加工实验中,参数修正后孪生驱动模型较参数修正前驱动模型对工业机器人加工轨迹的映射准确度从1.32 mm提高到了0.15 mm,提高了近80%,验证了孪生驱动模型建立的正确性和关键参数修正的必要性。

参考文献:

- [1] 田威,焦嘉琛,李波,等. 航空航天制造机器人高精度作业装备与技术综述[J]. 南京航空航天大学学报,2020,52(3): 341-352.
- [2] KUTS V, OTTO T, TÄHEMÄ T, et al. Digital twin based synchronised control and simulation of the industrial robotic cell using virtual reality[J]. Journal of Machine Engineering, 2019, 19(1): 128-144.
- [3] ØVERN A. Industry 4.0—digital twins and OPC UA (master's degree) [D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2018.
- [4] 王春晓,骆伟超,刘日良,等. 基于Modelica的数控机床多领域建模与虚拟调试[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(10): 102-105, 110.
- [5] 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.
- [6] 蒋刚,龚迪琛,蔡勇. 工业机器人[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2011.
- [7] DENAVIT J, HARTENBERG R S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices[J]. Journal of Applied Mechanics, 1955, 22(2): 215-221.
- [8] LIM H K, KIM D H, KIM S R, et al. A practical approach to enhance positioning accuracy for industrial robots [C]//2009 ICCAS-SICE. Fukuoka, Japan: IEEE, 2009: 2268-2273.

收稿日期:2022-03-01