

工业机器人绝对定位误差补偿技术研究进展

付鹏强, 姜晓灿, 苗宇航, 王义文, 王昭

哈尔滨理工大学先进制造智能化技术教育部重点实验室, 哈尔滨 150080

摘要 针对航空制造业中工业机器人存在实际位姿与理论位姿偏差的问题, 分析了工业机器人绝对定位误差来源, 解析其对飞机零部件连接性能产生的影响, 在工业机器人绝对定位误差补偿原理和主要步骤分析基础上, 阐述运动学建模、位姿测量、运动学参数误差辨识以及误差补偿等关键步骤对工业机器人绝对定位误差补偿的作用及重要性, 对比分析了国内外学者在该步骤中涉及的主流算法和技术, 归纳总结各步骤中存在的问题和可能的解决方案, 探讨了工业机器人离线与在线误差补偿技术中的不足之处, 指出工业机器人绝对定位误差补偿技术的发展趋势。

关键词 工业机器人; 绝对定位误差; 误差分析; 误差补偿技术

随着“工业 4.0”和“中国制造 2025”的提出与推进, 实现飞机制造的智能化、柔性化、数字化已成为当前航空制造领域的必然发展趋势, 在这种趋势下, 工业机器人凭借其高柔性、工作空间较大、人机交互与协同能力强、制造成本较低等显著优势而得到了航空制造业的青睐^[1-2]。

工业机器人是一个复杂而庞大的系统, 是集机械工程、计算机技术、电子技术、自动控制原理等多学科技术成果的综合体^[3], 在工作环境较差、重复性较高、高精度加工等场所具有极大的优越性。以飞机、火箭和高性能军机为代表的航空航天产品, 具

有构件结构复杂、装配工艺难和材料体系多等特点, 对装配精度及加工效率提出了更高的要求, 目前以人工为主的加工方法难以满足研制周期短和装配精度高的综合要求, 采用工业机器人进行加工是解决该难点的有效途径。然而, 工业机器人实际工作过程中重复定位精度往往很高, 通常在 0.1 mm, 相对而言, 绝对定位精度却较低, 精度范围为 2~3 mm^[4-5]。由于机器人在运动过程中产生的关节磨损、连杆变形以及加工振动等因素, 使机器人的绝对定位精度急剧下降。因此, 绝对定位精度在很大程度上限制了机器人在航空制造业中的大幅推广与

收稿日期: 2021-01-22; 修回日期: 2021-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475127); 黑龙江省青年科学基金项目(QC2018064); 黑龙江省普通高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2018196)

作者简介: 付鹏强, 副教授, 研究方向为机器人加工、机器视觉、精密检测技术, 电子信箱: pqfu@hrbust.edu.cn; 姜晓灿(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为机器人加工, 电子信箱: 2961386272@qq.com

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.13.011

应用。

针对航空制造业中工业机器人绝对定位精度不足的问题,梳理与总结了国内外学者提出的绝对定位误差补偿技术,分析了工业机器人绝对定位误差来源及其造成的影响,针对运动学建模、位姿测量、运动学参数误差辨识以及误差补偿等机器人绝对定位误差补偿技术的关键步骤进行详细阐述与对比分析,探讨了工业机器人离线与在线误差补偿技术中有待研究的问题,并在总结国内外专家学者研究成果及分析的基础上对各部分发展方向做出展望。

1 工业机器人绝对定位误差分析

工业机器人以其优越的技术特点和较高灵活性取代了手工制造业,是航空航天等工业领域实现自动化、高效生产的重要设备,定位精度是衡量机器人性能及制约机器人大面积推广应用的关键参数^[6]。工业机器人从生产制造到应用于实际工作中,每一个阶段都存在着影响机器人定位精度的因素。探索机器人绝对定位误差来源,解析其对飞机零部件连接性能产生的影响,对于提高工业机器人定位精度具有重要现实意义。

1.1 工业机器人绝对定位误差来源

由于工业机器人在运动过程中产生振动、关节磨损、连杆变形等多种因素使机器人末端执行器理论位姿与实际位姿产生偏差,称之为绝对定位误差。根据绝对定位误差产生的因素分类,工业机器人绝对定位误差可以分为几何误差和非几何误差因素(图1)。几何误差因素是指机器人在运动过

程中所产生的参数误差,主要包括机械制造误差、装配误差、定位偏差等,而不属于几何误差的其他因素皆称之为非几何误差,其中,几何参数误差约占工业机器人绝对定位误差的80%~90%^[7-8]。

1.1.1 几何误差因素

工业机器人存在几何参数误差会引起机器人各关节参数以及连杆结构参数产生偏差,导致机器人定位精度不足。因此,国内外学者对工业机器人绝对定位误差中几何参数误差产生原因及构成因素进行了深入研究。黄松等^[9]从机械制造误差、装配误差和关节间隙3方面具体分析机器人几何参数误差对定位精度的影响,进一步验证机械制造误差对机器人连杆参数的影响;装配误差限制零件之间的位置、尺寸、配合等约束关系;关节间隙在关节力矩或关节力的作用下使实际位置与理想位置发生偏离等问题。Andrei等^[10]明确提出工业机器人结构中存在的参考定位偏差是影响机器人末端执行器运动精度的因素,该定位偏差包括关节的垂直偏差和连杆的平行度偏差。上述学者对影响机器人定位精度的几何参数误差展开了深入研究,论述了机器人关节参数以及连杆结构参数误差是影响机器人绝对定位误差中几何参数误差的量化指标,由于几何参数误差对机器人定位精度的影响比例较大,仍是制约机器人定位精度的关键要素。

对工业机器人进行误差分析时,各误差因素共同发生作用,这些影响因素通常同时存在,相互联系,需综合考虑各个误差源对机器人定位精度的影响。Cho等^[11]认为几何参数误差是影响机器人实际运动输出值与运动学模型输出值存在偏差的原因,从而难以获得机器人最佳运动平面参数。因此,提出一种基于指数模型的柔性关节机器人运动学描述和运动学标定方法,该方法考虑了关节柔度参数和运动螺杆参数。吴瑞明等^[12]提出工业机器人产生绝对定位误差的因素是由于机器人连杆运动变量误差和连杆结构参量误差引起的,当忽略这两种误差源时所建立的运动学方程难以保证机器人探头在检测时实时对准。基于离线误差补偿原理,充分考虑了运动变量误差和结构参量误差对机器人定位精度的相互影响。通过对各误差源进行论述

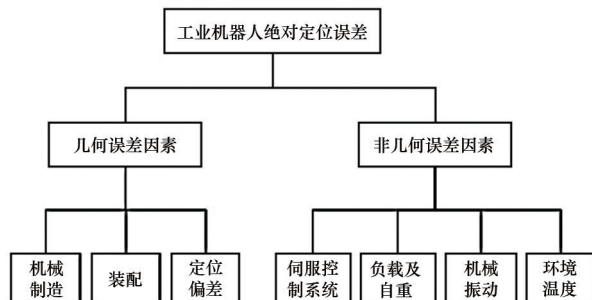


图1 影响工业机器人绝对定位精度的因素

并补偿,在一定程度上提高了机器人定位精度,但还不足以满足航空制造业的精度要求。另外,所提出的方法针对性较强,适用范围较小,不易于大面积推广。

1.1.2 非几何误差因素

部分学者对环境温度和负载等非几何误差因素进行了分析。环境温度的变化会使工业机器人的各连杆长度及硬度发生微小变化,从而降低机器人的定位精度,Li等^[13]提出工业机器人定位精度受2方面温度变化的影响:一是机器人所处环境温度变化对运动学参数影响;二是机器人运动过程中,电机发热和关节间产生的摩擦热对运动学参数影响,充分分析了机器人工作环境温度的变化及自身发热对各连杆运动学参数的影响,提出一种有效的温度补偿策略,保证由温度变化引起的末端绝对定位误差小于0.1 mm。上述研究表明环境温度是导致工业机器人结构显著变化的误差源之一,在进行定位误差补偿时需考虑内外热源对连杆和关节尺寸引起的变化。

工业机器人本体自重及负载的变化会造成机械结构发生扭曲变形,从而产生形变误差,Jawale等^[14]提出负载变化引起的传动间隙和关节间隙是影响机器人定位精度的因素,基于理想关节下的逆运动学分析,给出受关节间隙影响的机械臂连杆性能计算公式,分析传动间隙对机器人末端执行器定位精度的影响。简而言之,考虑机器人自重及负载可有效提高误差补偿精度,为后续非几何误差因素的研究奠定了基础。

此外,机器人的运动主要依赖于伺服控制系统驱动电机实现,在伺服控制系统中,各关节均装有绝对编码器,其反馈精度决定着电机转轴的转角误差,因此,为了使机器人获得较高的绝对定位精度,首先要保证准确识别并控制机器人各关节的实际输出转角。孙峰^[15]指出当关节输出端受到一定的转矩而产生转角偏差时,电机端所感知到的转角偏差小于通过减速比计算得到的理论转角。当机器人负载突然变化时,由于受到关节传动链刚度的影响,机器人末端将发生较大变化,从而丧失定位精度。在2015年控制、自动化和系统国际会议(IC-

CAS)上,韩国学者Choi等^[16]指出工业机器人关节驱动分辨率可以表示为离散的,可使用绝对编码器作为关节驱动的传感装置,此时,机器人的运动被限制在其可达工作空间的离散位置,其末端执行器的绝对定位精度取决于绝对编码器的分辨率。Brethé等^[17]认为限制工业机器人定位精度的一个重要因素是集成在机器人伺服驱动系统中编码器的分辨率,结合绝对编码器的角度分辨率创建空间分辨率模式,并指出空间分辨率取决于机器人的姿态和位置,而姿态和位置决定了每个驱动器上的连杆长度。上述学者以伺服控制系统中编码器分辨率为影响因素分析其对机器人定位误差的影响,对于提高机器人整体定位精度的研究具有十分重要的意义。

综上所述,几何误差与非几何误差因素都将导致工业机器人参数或机械结构发生变化,需充分分析各误差源的来源及影响比例,进行针对性补偿。然而,目前国内外文献对工业机器人绝对定位误差来源的分析多数局限于对单一因素展开,大量的简化导致难以得到综合误差结果,不能充分反应工业机器人在实际工作场所中参数或结构的变化情况。需结合工业机器人工作实际,综合分析引起机器人定位精度较低的多个因素及各因素对误差的贡献率,才能采取有针对性的措施,更好地实现机器人误差补偿技术,提高中国航空制造业自动化水平以及集成度。

1.2 工业机器人绝对定位误差影响

通过分析影响工业机器人定位精度的误差来源因素,进一步揭露了各误差源对机器人定位精度的影响,总结出绝对定位误差对工业机器人在航空制造业中影响的实质是实际位姿与理论位姿存在偏差,主要通过飞机零部件连接性能表现,为提升机器人定位精度做了铺垫。工业机器人对不同的飞机部件进行加工时,每个零部件在世界坐标系下都有各自的坐标值,整个加工过程都依赖于建立精确的坐标系及其准确的坐标转换关系。因此,文献[18]中指出,当工业机器人进行位姿调整时若产生绝对定位误差,相应地就会影响机器人基坐标系标定和机器人末端执行器坐标转换精度。

工业机器人绝对定位误差会对机器人基坐标系的标定及各坐标的转换精度产生不同程度的影响,使被加工材料产生不同的缺陷。这些缺陷和误差对飞机连接件的强度、刚度、垂直度、圆度以及疲劳寿命都可能造成不可避免的损伤,难以保证飞机的使用寿命及人员安全。1988年一架客机在飞行过程中由于零部件连接孔产生疲劳裂纹,造成飞机机身出现20英尺的裂缝,致使1名乘务员死亡^[9]。经调查发现是由于加工过程中工业机器人定位精度较低导致飞机连接孔精度不足从而引发事故,证明了在航空制造业中工业机器人绝对定位精度对飞机零部件加工质量至关重要。

国内外学者对于工业机器人定位精度对复合材料机械连接性能影响方面已经开展了诸多研究,并为航空大型复合材料构件的连接性能分析提供了可行的技术手段参考。高航等^[20]为研究工业机器人绝对定位误差对航空材料连接性能的影响,对连接孔倾斜角度、倾斜方向进行分析,当连接孔倾斜角度从0°增加到4°时,接头弦刚度增大10%~40%,极限承载强度下降9%~12%;连接孔倾斜方向对极限承载强度没有明显影响,却可使接头弦刚度产生20%~30%的变化。Thoppul等^[21]指出工业机器人定位精度会影响零部件的连接性能,为实现复合材料结构的完整性和可靠性,选择合适的几何参数至关重要。Yuan等^[22]结合实际案例针对工业机器人定位精度较低所引起的问题有较深入的分析,指出定位精度所引起铆接孔的垂直度对飞机装配质量有着重要影响,表明飞机机体70%的疲劳失效事故发生接头处,80%的疲劳裂纹来自铆接孔,当铆接孔倾斜超过2°时,螺栓的疲劳寿命将降低47%。

综上所述,采用工业机器人实现航空制造业高精度加工的重点在于各坐标系的精准建立及其精确转换。而工业机器人的绝对定位误差将严重影响机器人基坐标系的标定及各坐标的转换精度,使末端执行器产生定位误差,进而影响零部件连接孔的垂直度和定位精度。工业机器人加工过程中绝对定位误差影响程度的衡量指标主要通过飞机零部件连接性能体现。此外,机器人定位精度对坐标

系标定精度影响的研究还不够深入,且相关文献较少,未来需进一步研究如何提升机器人坐标系标定及坐标转换精度。

2 工业机器人绝对定位误差补偿步骤

对工业机器人绝对定位误差进行补偿是航空制造业实现自动化加工的关键技术之一,这是一个集运动学建模以及参数辨识于一体的过程。如图2所示,工业机器人实现绝对定位误差补偿技术的主要步骤如下:运动学建模、位姿测量、运动学参数误差辨识以及误差补偿^[23]。即首先建立描述机器人运动和控制特性的运动学模型;其次利用外部测量设备和一定的测量手段对机器人末端姿态进行测量,推导出定位误差模型;再次根据定位误差模型采用参数误差辨识算法获取机器人的运动学参数误差;最后通过获得的各参数误差修改控制器中的运动学参数,使控制器内的运动学模型与工业机器人实际运动学模型接近,实现机器人绝对定位误差补偿技术。



图2 绝对定位误差补偿步骤与常用方法

2.1 机器人运动学建模方法

运动学模型的建立是基于机器人的运动学参数,而这些参数的误差将引起机器人的运动误差,影响机器人定位精度。通过上述分析可知,基于运动学模型修改机器人各关节参数即可实现工业机器人绝对定位误差补偿,因此,选择合适的模型建立机器人运动学模型对工业机器人定位误差补偿效果至关重要,Khalil等^[24]指出完备的模型应满足3点特征:完整性、最小性和连续性。

当前,机器人运动学建模常用的模型主要有D-H模型、S模型和指数积模型。其中运用最为广泛的是1955年Danevit和Hartenberg提出的D-H模型^[25]。该模型由连杆长度、连杆扭角、关节变量和关节偏置等参数对机器人正运动学方程和逆运动学方程进行描述。但当相邻两关节轴线平行时,D-H模型存在奇异性。如图3所示,当相邻平行关节的轴线存在微小偏差角 β ,此时两轴轴线相交,机器人关节变量 $\theta_i=0$,关节偏置 $d_i=0$,连杆长度 $a_i=L$,连杆扭角 $\alpha_i=0$ 突变为 $\theta_{i+1}=-90^\circ$, $d_i=-f$, $a_i=0$, $\alpha_i=\beta$ ^[26]。Abderrahim等^[27]采用S模型对机器人进行运动学参数辨识,能够正确表达关节坐标系间任意的旋转变换和平移变换,然而采用S模型将引入冗余参数,使得几何参数不能被精确地辨识出。宫金良等^[28]采用指数积模型求解Delta机器人的工作空间及运动学正解,该模型参数变化平滑,通用性强,但存在不能描述局部坐标系转换关系的缺点。

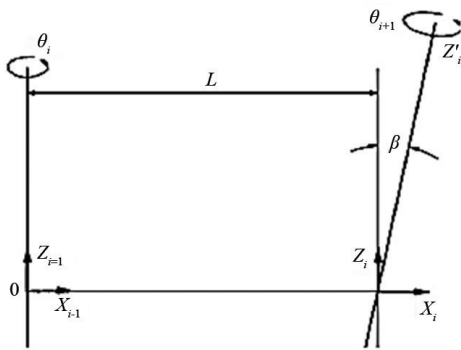


图3 关节平行时的问题

从复杂程度、完整性、最小性和连续性等方面对D-H模型、S模型和指数积模型进行对比(表1)。指数积模型满足以上3个特征,但也存在弊端,在

实际应用中比较复杂。引入的关节旋量存在特定的约束条件,在参数辨识过程中需强制正交化和单位化以满足约束条件。尽管D-H模型不如指数积模型完备,但该模型易于理解,建模简单,通过简单的修正即可弥补该模型的不足之处,目前大部分机器人控制器中所用的正、逆运动学求解模型均采用D-H模型。因此,为了机器人误差补偿重新建立一套新的模型,将会使正、逆运动学控制变得复杂,从而产生其他新的问题。

表1 3种常用建模方法比较

建模方法	复杂程度	完整性	最小性	连续性
D-H模型	一般	不满足	满足	不满足
S模型	复杂	满足	不满足	不满足
指数积模型	复杂	满足	满足	满足

针对D-H模型产生奇异性和突变性的问题,国内外许多学者提出了改进的D-H模型来解决这个问题。Joubair等^[29]、Hayati等^[26]在D-H模型的基础上通过增加1个绕Y轴转动的旋转参数构建5参数的MDH模型(图4)。采用MDH建立机器人运动学模型,根据机器人末端执行器的理论位置与实际位置的差异,建立误差模型。该模型在DH模型的Y轴上增加了旋转参数,变成2个平移和3个旋转的5参数关节坐标变换形式,当相邻连杆轴线平行时,设定关节偏置 $d_i=0$;当相邻连杆轴线不平行时,设定转角 $\beta_i=0$ 。此模型虽然解决了当相邻连杆Z轴平行时所带来的奇异问题,却带来了两轴相互垂直时所带来的奇异问题。面对MDH模型带来的问题,有学者提出了其他的改进D-H方法。张旭等^[30]在机器人标定中采用轴线测量法识别D-H模型,将D-H参数转化为最小完整连续运动学模型参数,并进行非线性优化,从而解决D-H模型奇异和冗余带来的非线性优化不易收敛的问题,并对理论D-H、单轴识别D-H、优化D-H进行比较,实验表明定位误差从补偿前的最大/标准差2.03 mm/0.876 mm降低到0.652 mm/0.319 mm,使机器人定位精度提升70%。这说明采用轴线测量法识别D-H参数并通过非线性优化比理论D-H模型更接近真实值。

尽管不少学者对D-H模型进行了部分改进并

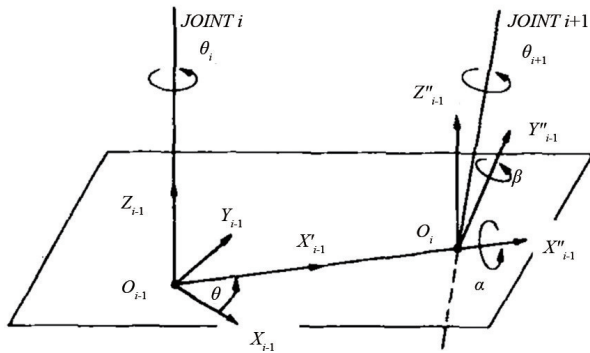


图4 关节轴线平行MDH模型

获得了许多技术成果,却一直没有提出一种统一解决D-H模型根本问题的标准方法。为了得到准确、

直观及统一的建模方法,郭发勇等^[31]提出了坐标系固定在实体上的D-H表示法(CFDH法),分别用CFDH法和D-H法对一个6自由度的机械臂进行建模,采用Newton-Raphson计算方法求解逆运动学参数。改进的方法可对所有关节连杆进行建模,且满足所建立模型与实体一致的优点,但也因增加参数而增大了运动学计算的复杂程度。将标准D-H模型与各种改进D-H模型进行比较可知(表2),采用改进的D-H模型在不同程度上弥补了标准D-H模型的缺陷,可以建立更加准确和直观的机器人运动学模型,对机器人产品的研究与设计具有较好的理论指导。

表2 D-H法与改进D-H法比较

比较项目	物理概念	标准建模方法	建模效果	不能建模关节	参数数量	复杂程度
D-H法	有	有	可能与实体不一致	存在	4	一般
MDH法	有	有	可能与实体不一致	存在	5	一般
优化D-H法	有	有	与实体一致	不存在	5	一般
CFDH法	有	有	与实体一致	不存在	6	复杂

建立运动学模型的目的是描述机器人末端位姿与机器人运动学参数之间的函数关系,一旦确定其函数关系,即可通过改变机器人运动学模型的内部参数来控制机器人在工作空间内的运动精度。当前,机器人运动学建模方法较多且在各自应用领域都取得了良好效果,但多数存在计算复杂或缺乏对误差耦合考虑、适应性单一的弊端。此外,对于机器人运动学模型的建立多数只考虑到机器人几何误差影响,而没有对非几何误差进行分析,后续的研究需考虑如何将这些因素融合到运动学建模中,提供一种适用性更广的算法。

2.2 机器人位姿测量技术

运动学模型的建立和位姿测量是工业机器人绝对定位误差补偿技术的基础,对机器人补偿精度有着重要影响。其中,位姿测量的作用是基于测量设备测量机器人末端位姿在机器人基坐标下的实际位姿,根据实际位姿与理论位姿的差值推导出绝对定位误差模型。在后续的运动学参数辨识中需根据绝对定位误差模型辨识出机器人各运动学参数误差。位姿测量的质量与所使用的测量设备密

切相关,常见的测量设备主要有激光跟踪仪^[32]、球杆仪^[33]、三坐标测量仪^[34]等。

激光跟踪仪在使用过程中无需接触即可对测量目标的三维坐标进行实时测量,可广泛应用于机器人位姿标定及绝对定位误差补偿技术领域。部分学者因激光跟踪仪具有测量精度高、效率高、测量范围广等特点而提出激光跟踪仪误差测量系统。杜亮等^[35]针对工业机器人绝对定位误差的问题,提出了激光跟踪仪定位误差测量系统,根据测量数据标定出各个坐标系,为机器人误差测量及补偿提供了参考。Posada等^[36]认为基于传感器补偿可有效弥补模型误差补偿不能达到预期精度的不足,该方案利用激光跟踪仪对机器人进行位姿测量以消除所有可能的误差源,并与基于顺应性模型补偿方法进行对比,机器人钻孔实验表明基于激光跟踪仪补偿后的平均误差为0.285 mm,而基于模型补偿后的平均误差为1.13 mm。

测量设备的误差与位姿测量精度息息相关,激光跟踪仪存在失调、刻度偏心和轴偏移等缺陷。这些缺陷在机器人位姿测量过程中可能导致测量角

度和距离的误差,若不加以修正,这些误差将在机器人测量坐标中引起系统误差。Hughes 等^[37]提出了一种高精度确定激光跟踪器的所有几何误差模型。此技术基于确定激光跟踪仪的几何模型参数,利用激光跟踪仪对机器人多个目标位置进行测量,将模型参数与观测数据拟合后,对激光跟踪仪原始数据进行误差修正。该模型不仅确定了轴偏移和位移,也确定了与角度相关的误差,可作为一种简单的技术,通过改进目标位置的角度测量,即可改善激光跟踪仪的测量精度。

有学者针对激光跟踪仪成本高、受环境因素影响大的缺点,提出一种球杆仪的高精度测量方法。Oh 等^[38]分别研究了球杆仪对工业机器人进行运动学标定的问题并取得良好效果。通过对机器人运动学参数进行误差辨识,将辨识结果与机器人目标位姿进行补偿,以满足机器人实际工作场所中的定位精度要求。值得指出的是,因球杆仪属于间接测量,故在运动学标定中存在的问题有:(1) 几何参数误差和球杆仪测量值间的关系不明确;(2) 不能有效预估和评价补偿前后机器人绝对定位精度。洪振宇等^[39]提出一种球杆仪检测的运动学标定法,建立球杆仪测量值与几何误差源的映射关系,根据误差参数辨识条件合理安装球杆仪,并探讨设置球杆仪安装位置和数目的方法。通过计算机反复执行“误差测量—参数辨识—补偿”的步骤,直至精度不再提高,表3为补偿前后静磁座安装坐标为(0, -400, 200) mm的圆周测量轨迹的圆度误差,由补偿前的0.372 mm降低为补偿后的0.060 mm,使其误差减小了85%。采用此方法需注意的是,在补偿误差降低到一定水平后,所测得的数据差异较为突出。产生该现象的主要原因是铰链摩擦力、主动支链回程死区等不确定因素,因此必须在铰链结构设计、加工装配以及控制器设计等方面采取必要的改

表3 静磁座测量轨迹圆度误差补偿结果

补偿前误差 Δ_0/mm	一次补偿 误差 Δ_1/mm	二次补偿 误差 Δ_2/mm	三次补偿 误差 Δ_3/mm
0.372	0.115	0.072	0.060

进措施。

也有学者针对三坐标测量仪具有高精度且技术成熟的优点,进一步采用三坐标测量仪进行机器人位姿测量。Kolyubin 等^[40]研究工业机器人定位误差补偿问题时,采用尼康 K610 三坐标测量仪测量机器人末端执行器位姿,对实际测量的实验数据与预处理的实验数据进行处理,辨识出机器人连杆相邻坐标系相对位置的各参数误差,实验证明可显著地改进机器人的工作性能。该学者采用三坐标测量仪对机器人进行测量,可有效地提高位姿测量精度,为机器人运动学参数辨识提供精确数据,由于该测量方式在操作过程中人工干预较多,操作繁琐,且需要接触工件,容易损伤被测物体表面,在采集数据时花费时间较长。

综上所述,常见的机器人位姿测量设备及特点整理如表4所示。滤除部分不足之处,在位姿测量过程中使用的外部测量设备都可满足所需的测量精度,提供合理有效的数据,实现机器人运动学参数识别,为提升机器人补偿精度做出了贡献。但其测量结果是相对于测量设备自身的坐标系,要获得基坐标系下的实际位姿,还需得到基坐标系与测量坐标系之间的转换关系。各种测量方法对工作人员的操作水平要求较高,且主要适合于实验室场景下进行研究,不易于将其全面推广于实际工程应用。因此,如何提升外部测量设备的测量效率及适用性是改进位姿测量技术的一个关键步骤,需考虑如何将外部测量设备与机器人实际工作过程进行更合理地融合,提高机器人位姿测量的精度。

表4 常见的机器人位姿测量设备及特点

测量设备	适用范围	应用场所	测量精度	测量效率	测量方式	成本	操作程度
激光跟踪仪	动静态测量	实验室	较高	较高	非接触测量	较高	复杂
球杆仪	动静态测量	实验室	较高	一般	间接测量	一般	一般
三坐标测量仪	静态测量	实验室	较高	较低	接触测量	较高	复杂

2.3 机器人运动学参数辨识

机器人各运动学参数误差的大小共同决定着机器人定位精度的高低,因此在辨识各运动学参数误差时,选择不同的运动学模型及测量方式对参数辨识的效果有很大影响,它们是运动学参数辨识的前提。所谓运动学参数辨识即基于位姿测量中定位误差模型的建立,选择合适的参数辨识算法,求解出相关运动学参数误差,将所得参数误差应用于运动学模型中以实现模型的修正,以此提高机器人在实际工作场所中的定位精度要求。求解运动学参数误差的算法较多,如模拟退火法、极大似然估计法、扩展卡尔曼滤波法、最小二乘法等。

Haznedar 等^[41]基于模拟退火算法对自适应神经模糊推理系统(ANFIS)的前提参数和后置参数进行

优化,将其应用于参数辨识问题中,该算法能取得较好的全局效果,但对初始条件的选择有一定的依赖性。Sun 等^[42]利用极大似然估计法对非线性参数辨识进行了研究,并与基于扩展卡尔曼滤波法的方法进行了比较,发现其辨识精度和收敛速度有明显的优势。但该算法易导致局部收敛,缺乏全局精度。Park 等^[43]采用扩展卡尔曼滤波法对机器人几何参数误差进行辨识,可有效解决模型的不确定性和不完整性的问题,但存在着线性化误差,使得辨识得到的几何参数误差精度较低。Yier 等^[44]利用最小二乘法对机器人的几何参数误差进行辨识。该算法无需考虑机器人系统或外界扰动信息,但使用时容易陷入广义逆矩阵奇异性问题,因此有一定的局限性。常用参数辨识算法对比,如表5所示。

表5 常用参数辨识算法及优缺点

辨识算法	辨识精度	优缺点
模拟退火算法	较低	对初值敏感,辨识过程简单
极大似然估计法	较低	缺乏全局精度,计算简单,对初值敏感
扩展卡尔曼滤波法	较低	可解决参数不确定性和不完整性问题,存在线性误差
最小二乘法	一般	无需考虑外界扰动因素,实施简单,收敛快,计算量大,奇异性

由表5可知,机器人运动学参数辨识最简单、辨识精度相对较好的方法是最小二乘法,其收敛速度较快,且易于操作。但该算法也存在不足之处,针对该算法的局限性,许多学者都采用改进的最小二乘法对运动学参数进行辨识。

在改进最小二乘法的算法中,Levenberg-Marquardt^[45]算法在机器人误差补偿中被广泛地使用。Lightcap 等^[46]提出在 MATLAB 中实现两级 Levenberg-Marquardt 非线性最小二乘优化算法对机器人关节柔性参数和几何参数进行识别,建立参数柔性几何模型并应用于三菱 PA10-6CE 机器人。实验表明 44 N 载荷下的平均/峰值位置误差从 1.80/2.45 mm 降低到 0.33/0.71 mm,机器人末端执行器定位精度显著提高。该算法有效地解决了标准最小二乘法奇异性问题,具有很强的局部收敛性能、收敛速度快、鲁棒性强等优势。但与其他方法相比,相同误差收敛条件下所需内存大。另外,刘湛

基等^[47]提出结合最小二乘法的 RANSAC 快速转换算法,将机器人的坐标值精确地变换到测量坐标系下,有效地降低了模型误差对机器人坐标转换的影响。该算法解决了测量误差造成的模型拟合失败的问题,减少了对高精度标定板的依赖。将常规最小二乘法和 RANSAC 算法求解得到的变换误差进行对比(图5),基于 RANSAC 算法比常规算法求解所得的变换关系精度可提高3倍。该方法适用于求解不同设备间的坐标系变换,为机器人进行坐标系转换需求提供了一种低成本、稳定准确的方法,但 RANSAC 是一种不确定的算法,为提高取得合理结果的概率需增加迭代次数。

根据机器人位姿测量数据进行相应的处理而实现对运动学参数辨识与修正是机器人定位误差补偿技术的关键环节。运动学参数辨识结果将直接影响机器人定位误差补偿精度,而增强运动学参数辨识效果的关键在于求解参数算法的优越性是

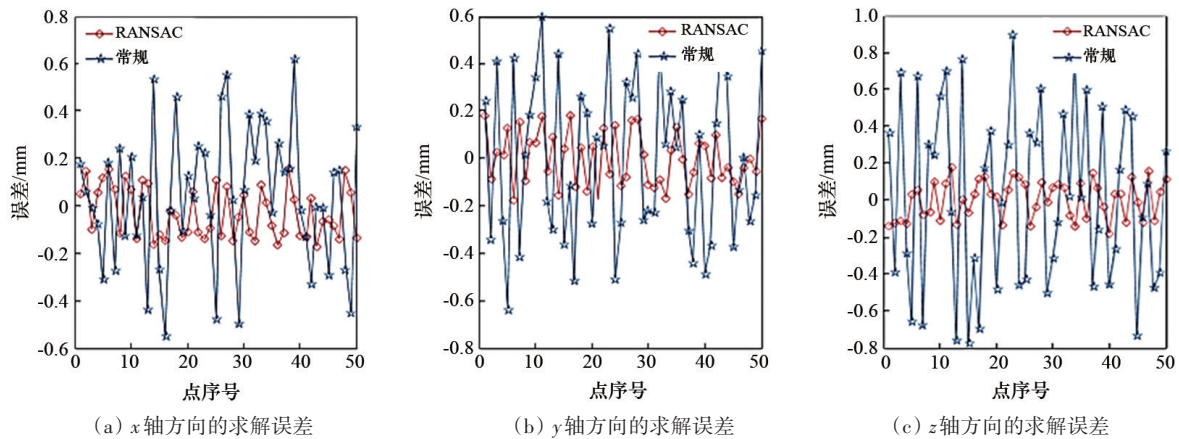


图5 机器人运动参数误差辨识比较

否足够。针对参数算法的改进,未来可从以下2个方面进行:(1)从参数算法的本身出发,寻求合理的方法矫正算法中存在的局限,使其满足参数辨识的需求;(2)对参数辨识效果较好的算法进行深入研究,探讨它们的优点与缺点,利用这些算法的特点将多个算法进行混合优化,形成适用性更加普遍的高效算法,使其相辅相成,从而有效增强运动学参数辨识效果。

2.4 工业机器人绝对定位误差补偿技术

误差补偿是工业机器人绝对定位误差补偿技术的最后一个步骤,是建立机器人运动学模型、进行位姿测量、运动学参数辨识的最终目的。当辨识出机器人各运动学参数误差后,通过修改机器人原有的控制系统参数来提高机器人定位精度,参数辨识精度决定着机器人定位误差补偿效果。目前,常用于工业机器人绝对定位误差补偿的方法主要分为机器人定位误差离线补偿和机器人定位误差在线补偿。

2.4.1 定位误差离线补偿技术

工业机器人定位误差离线补偿通常是指在工业机器人工作之前,采用一定的数学方法对机器人的运动参数进行修改,补偿其由于运动和机构参数等造成的误差。进行离线补偿时不需要给工业机器人添加任何反馈装置,易于在复杂场所实现误差补偿。

对于工业机器人定位误差离线补偿技术,部分学者提出运动模型参数补偿法。Santolaria等^[48]、

Nubiola等^[49]基于改进的D-H运动模型,建立机器人误差补偿模型,在此基础上采用最小二乘法识别出所需参数并对其误差进行补偿修正,实现对机器人定位误差的离线补偿。王一等^[50]基于MDH运动学模型,建立机器人工具中心点的定位误差补偿模型,该补偿模型避免了坐标在不同坐标系转换过程中产生精度损失。与机器人定位精度有关的柔度误差分解为外加负载柔度误差和机械臂自重柔度误差并进行针对性补偿。如图6所示,经过补偿后,标定点处的均方根误差由之前的1.2302 mm降至0.4288 mm。上述误差补偿方法有效提高了机器人定位精度,解决了由于机器人控制系统不开放而无法直接修改机器人控制参数以提高定位精度的问题。但是,该方法缺乏对机器人非几何误差因素的全面考虑,且在动态变化的环境中补偿技术缺少柔性,因此在后续的研究中还需进一步探索适用性更高更全面的离线补偿方法。

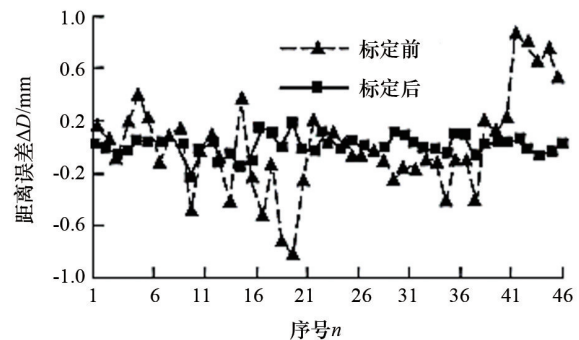


图6 标定点处柔度误差补偿

使用运动学参数模型标定时仅对机器人几何参数误差进行补偿,经过参数修正后仍遗留残差,因此有必要对残差进行补偿。何晓煦等^[51]、Tian等^[52]提出基于误差相似度的残差补偿法,利用运动学参数标定方法进行参数误差辨别,在此基础上基于误差相似度对残差进行补偿。将此补偿方法与仅使用修正参数的补偿方法进行对比,结果显示基于参数标定和误差相似度的补偿效果优于运动学参数模型补偿法,可用于飞机钻铆技术等对机器人精度要求较高的场所。文中因采用回归模型和随机误差来表达机器人关节转角与末端位置残差之间的关系,对机器人奇异位姿的情况缺乏考虑,因此还需进一步研究机器人在奇异位姿处如何保证位姿控制的精确性。

也有部分学者认为运动模型参数补偿法存在一定的劣势,诸如对非几何参数误差欠缺探究、计算过程复杂、柔性较低等,因此有专家将目光转向神经网络方法。神经网络在解决非线性映射方面问题时有强大的逼近能力,在机器人领域中可处理运动学参数模型的自动辨识障碍回避与路径优化等一系列问题,利用神经网络具有很强的容错性、鲁棒性以及模拟客观规律的能力来增强机器人误差补偿精度,为机器人研究领域奠定了一定基础^[53]。Vosniakos等^[54]提出了一种测量、预测和补偿机器人末端执行器位姿误差的方法。通过控制工业机器人沿着指定的点创建一条特定的轨迹,在此基础上,利用人工神经网络的训练建立误差预测模型,并用预测模型对末端执行器位姿进行补偿验证,实验结果证明了该误差补偿方法的合理性和有效性。也有学者采用将机器人几何参数误差和非几何参数误差使用不同的方法进行补偿以达到补偿所有误差源的效果。Nguyen等^[55]采用卡尔曼滤波算法对机器人几何参数进行建模和识别,利用人工神经网络补偿非几何误差源的误差,有效地解决了机器人所有误差源的校正问题,使得机器人定位精度显著提高,优于使用机器人运动学模型标定获得的精度。综上所述,神经网络的优点是不依赖于特定的运动学模型,便可直接辨识构成机器人运动学模型的各个参数和待补偿点的位姿误差,缺点是

为了保证神经网络的训练精度,需要大量的测量数据。目前,神经网络的研究还停留在仿真测试阶段,缺乏成熟的应用技术支持,还没有形成系统化、实用化的机器人定位误差补偿方法。

工业机器人定位误差离线补偿方法能够辅助机器人实现较为快速准确的绝对定位,具有较强的通用性和适用性,补偿过程中无需引入测量设备且易于实现参数修正,但需花费大量时间进行计算,补偿精度稍低。针对机器人定位误差离线补偿存在的瑕疵,国内外学者进行了大量卓有成效的研究,尤其在基于神经网络补偿的方法上。利用该方法可直接辨识机器人运动学模型和参数变量,且考虑多种误差来源因素的优势,将其与其他补偿技术相结合,如与扩展卡尔曼滤波的搭配,在一定程度上提高了机器人工作过程中的定位精度。但仍存在一定的局限性,譬如,在标定过程中没有研究机器人奇异位姿的情况,计算量较大等,因此,未来需进一步研究奇异位姿对机器人工作过程中定位精度的影响。

2.4.2 定位误差在线补偿技术

定位误差在线补偿是指利用外界高精度的测量设备对工业机器人的运动进行实时反馈,使机器人在工作过程中可以不断调整末端姿态直至理想状态。图7为工业机器人在线误差补偿系统结构,主要由机器人、机器人控制设备、外界测量设备和上位机构成。利用上位机接收外界测量设备和机器人的数据,将机器人理论位姿和实际位姿进行比较,通过计算参数误差并反馈给机器人,从而实现机器人在线误差补偿。

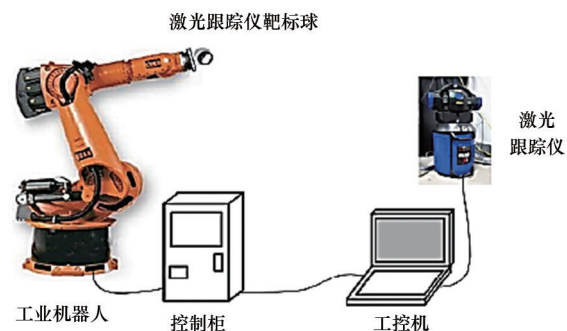


图7 机器人在线定位误差补偿系统结构

剖析离线补偿技术和在线补偿技术的原理,相对而言,在线补偿技术的补偿精度和实时性较高。因此,为弥补离线补偿技术的缺陷,有学者利用辨识出的运动学参数通过一定的算法在线修改机器人控制器中的参数值来补偿误差。Santiago等^[56]针对机器人路径修正的问题,提出采用激光跟踪仪进行路径在线补偿的方法。利用D-H模型来计算笛卡尔坐标空间中的修正值,并映射到机器人关节上,实现快速路径修正算法,该方法无需依赖于机器人运动学模型精度即可实现路径补偿。与标准配置相比,自定义校准反映了25%的改进,而修正的算法将补偿精度提高了62%,将实验结果与均方根值进行比较,修正算法的均方根值仅0.11 mm,提高了87%。但该误差补偿方法只针对关节误差中的几何参数误差进行研究,却不宜用于关节间隙等典型的非几何参数误差。

关节空间补偿法是常见的在线误差补偿方法,即在完成运动学参数辨识的基础上,对机器人运动学模型直接在线修正,通过机器人运动学逆解,将机器人待补偿点在笛卡尔坐标空间中的位姿转化到机器人关节空间,直接将计算得到的关节运动值修正控制系统。例如Russell等^[57]、Todd等^[58]针对机器人定位精度不足的问题,基于关节空间补偿法,利用二级编码器对机器人各轴转角进行精确控制,通过优化运动学模型实现误差补偿,该在线补偿技术解决了关节间隙引起的误差,机器人末端精度大幅提高,但是在实际工程中,操作人员难以获得在线修改控制参数的权限。

有学者提出基于末端反馈的全闭环补偿技术,即通过传感器直接对各误差源测量而实现机器人末端位姿的在线修正,常见的测量设备包括机器视觉和激光跟踪仪等。Wu等^[59]根据单目视觉测量原理建立了运动学模型,对引起机器人产生绝对定位误差的温度因素进行补偿。此测量系统结构简单,但测量区域较小,对机器人运动位姿限制较大,影响机器人系统最终的补偿精度。面对单目测量系统的不足,郑继贵等^[60]提出了一种基于双目立体视觉的温度误差在线补偿方法,采用双目视觉原理和微分运动学构建了误差补偿模型,分析机器人各关

节参数随时间变化的规律,筛选出符合温度漂移规律的显著性参数进行补偿。结果显示,其补偿效果均在90%以上且优于传统补偿方法。采用双目条纹投影测量系统在扩大测量范围的同时可提高特征点的测量精度,能够显著改善机器人定位精度。Morozov等^[61]提出一种基于激光跟踪仪对机器人末端位姿进行测量的方法,并构建机器人误差测量与在线补偿系统,该方法不必经过复杂的计算过程且能够实时在线补偿由机器人几何参数和非几何参数引起的误差,弥补了对机器人各误差源缺乏考虑所带来的不足。上述文献表明全闭环补偿技术在理论上可满足航空领域机器人定位精度要求,但是采用的位姿测量设备价格昂贵,不满足可持续发展的需求。

在现有工业机器人定位误差在线补偿技术的研究中,通过在机器人末端执行器上安装反馈装置,使机器人在实际工作中通过不断进行位姿调整直至理想状态,获取较高的定位精度。因末端执行器上引入反馈装置的限制,在复杂场所中不易实现机器人误差补偿。另外,机器人在线误差补偿技术有一定的局限性,在面临在线修改机器人控制参数的技术问题上,要求机器人的控制系统具备较高的开放性。但是,多数情况下工作人员难以获得修改权限,此外,若需要对机器人进行改造,其成本也相当高。

与离线补偿技术相比较,在线补偿是利用外部测量设备实时测量存在的误差,在线修改运动学模型参数来提高机器人的精度。对机器人定位误差离线补偿技术与在线补偿技术对比分析,如表6所示。离线与在线误差补偿技术都是通过特殊方式对运动学参数进行修改,对各误差源引起的绝对定位误差实施补偿。而离线补偿技术是在机器人工作前预判末端位姿产生的误差,进行运动学参数辨识,将获取的补偿数据预置到控制算法中实现离线补偿。由于在线补偿技术补偿精度较高、实时性较好,未来机器人厂商可尝试放开机器人控制器修改权限,以降低定位误差在线补偿技术操作要求及成本,为普及工业机器人定位误差在线补偿技术做出重大贡献。

表6 离线与在线误差补偿技术对比

补偿技术	补偿精度	补偿方式	优缺点
离线补偿技术	取决于辨识精度	离线修改运动学参数	成本低,精度一般,通用性好,实时性差,受建模精度影响大
在线补偿技术	由外部测量设备决定	在线修改运动学参数	成本高,精度高,通用性好,实时性好,操作要求高

3 结论

将工业机器人应用于航空制造业是提高飞机产品自动化生产的一个发展趋势。在航天航空产品加工过程中,由于工业机器人在运动过程中产生振动、关节磨损、连杆变形等多种因素使机器人存在绝对定位误差,导致末端执行器实际位姿与理论位姿产生偏差而影响飞机零部件的加工精度,从而难以保证飞机零部件连接性能。因此对工业机器人绝对定位误差进行分析与补偿以提升飞机产品加工精度。针对工业机器人定位精度问题,国内外学者从研究机器人绝对定位误差来源到实现误差补偿技术取得了重大进展,主要涉及到运动学建模、位姿测量、运动学参数辨识以及误差补偿,正是因为这些关键技术的突破,提高了工业机器人定位精度以保证飞机零部件的加工精度,提升了飞机零部件连接性能,使飞机的寿命得以保障。

在近年国内外研究成果基础上,总结了该领域的难点问题以及发展趋势如下。

1) 解析工业机器人绝对定位误差来源及其产生的影响对定位误差补偿尤为重要,根据各误差的影响比例建立合理的误差补偿模型以达到更精准的补偿精度。目前,对机器人绝对定位误差的来源局限于通过单一因素分析,没有全面考虑误差源综合效应,忽略各个误差源在机器人运动过程中的耦合特性,导致机器人绝对定位误差得不到全面补偿。因此,未来还需思索如何将影响机器人定位精度的各误差源进行有效叠加以实现高精度与高效化的机器人加工技术,对推进工业机器人在航空制造业中的应用具有重要促进作用。

2) 工业机器人运动学模型的建立和位姿测量是定位误差补偿的基础,运动学参数辨识是定位误差补偿的目的,每个步骤都决定着机器人定位误差补偿效果。因此,未来还需综合考虑各步骤中的弊

端对补偿精度的影响。可从以下几方面对各步骤进行完善:将几何误差与非几何误差融入机器人运动学建模中;采用视觉测量技术代替激光跟踪仪进行位姿测量以降低测量成本;进行参数辨识时探究如何将多种算法进行混合,使各个算法的搜索能力得到相互补充,提升机器人误差补偿精度且可应用于实际加工场所。

3) 在线误差补偿技术通常是引入外部测量设备对待加工目标信息进行准确识别与提取,使机器人末端执行器的位姿得到实时快速反馈,从而提高机器人定位精度。采用全闭环控制方式可提升机器人定位精度,但这种补偿技术投入成本昂贵,操作人员难以获得较高的机器人参数修改权限。采用离线补偿技术则克服了在线补偿技术中不易获取参数修改权限的困难,但其补偿效果及实时性稍差,因此,可结合在线与离线两种补偿技术对工业机器人定位误差进行补偿。

参考文献(References)

- [1] Ceriani N M, Zanchettin A M, Rocco P, et al. A constraint-based strategy for task-consistent safe human-robot interaction[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, Japan: IEEE, 2013: 4630-4635.
- [2] 沈建新, 田威. 基于工业机器人的飞机柔性装配技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(2): 181-189.
- [3] 张红霞. 国内外工业机器人发展现状与趋势研究[J]. 电子世界, 2013(12): 5, 7.
- [4] 吴锦辉, 陶友瑞. 工业机器人定位精度可靠性研究现状综述[J]. 中国机械工程, 2020, 31(18): 2180-2188.
- [5] Ulrich M, Lux G, Piprek T. Analysis and visualisation of the positioning accuracy and underlying effects of industrial robots[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1018(3): 15-22.
- [6] Sulzer J, Kova I. Enhancement of positioning accuracy of industrial robots with a reconfigurable fine-positioning

- module[J]. Precision Engineering, 2010, 34(2): 201-217.
- [7] Lim H K, Kim D H, Kim S R, et al. A practical approach to enhance positioning accuracy for industrial robots[C]//Iccas-sice. Fukuoka, Japan: IEEE, 2009: 2268-2273.
- [8] Jean-Michel R, Eric R, Marc B, et al. Kinematic calibration and geometrical parameter identification for robots[J]. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 1991, 7(6): 721-732.
- [9] 黄松, 胡晓兵, 周飞, 等. 关节机器人定位精度影响因素分析[J]. 机械, 2014, 41(4): 70-74.
- [10] Andrei L, Stan G. The influence of reference position deviation on industrial robots positioning precision[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 400(5): 052003.
- [11] Cho Y, Kim M, Cheong J, et al. Simultaneous identification of kinematic screw and joint compliance of elastic robot manipulators using deflected circular trajectories [C]//2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics(AIM). Munich, Germany: IEEE, 2017: 382-387.
- [12] 吴瑞明, 周晓军, 徐志农. 超声检测机器人误差补偿技术[J]. 传感技术学报, 2005(2): 198-201.
- [13] Li R, Zhao Y. Thermal effect model analysis and dynamic error compensation of industrial robot[J]. Measurement, 2015, 44(8): 2382-2388.
- [14] Jawale H P, Thorat H T. Positional error estimation in serial link manipulator under joint clearances and backlash[J]. Journal of Mechanisms & Robotics, 2013, 5(2): 021003.
- [15] 孙峰. 基于双编码器设计的机器人关节定位精度分析[J]. 仪表技术, 2020, 371(3): 37-39.
- [16] Choi Y H, Sun D H, Kwon O S. Analysis of precision positioning of multi-axis robot system[C]//International Conference on Control. Busan, Korea (South): IEEE, 2015: 2087-2090.
- [17] Brethé J F. Innovative kinematics and control to improve robot spatial resolution[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. Taipei: IEEE, 2010: 3495-3500.
- [18] 董辉跃, 周华飞, 尹富成. 机器人自动制孔中绝对定位误差的分析与补偿[J]. 航空学报, 2015, 36(7): 2475-2484.
- [19] Eastin R. 'WFD'-What is it and what's 'LOV' got to do with it[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 31(6): 1012-1016.
- [20] 高航, 王建, 杨宇星, 等. 垂直度误差对复合材料单钉连接性能的影响[J]. 航空学报, 2017, 38(2): 280-288.
- [21] Thoppul S D, Finegan J, Gibson R F. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures: A review[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(3-4): 301-329.
- [22] Yuan P J, Wang Q S, Shi Z Y, et al. A micro-adjusting attitude mechanism for autonomous drilling robot end-effector[J]. Science China Information Sciences, 2014, 57(12): 1-12.
- [23] 陈勋漫, 黄沿江, 张宪民. 基于轴线法与卡尔曼滤波的Baxter 机器人标定[J]. 振动测试与诊断, 2017, 37(5): 970-977, 1066-1067.
- [24] Khalil W, Dombre E. Modeling, identification and control of robots[J]. Applied Mechanics Reviews, 2003, 56(3): B34-B50.
- [25] Denavit J, Hartenberg R S. 54 kinematic parametered[J]. Journal of Applied Mechanics, 1955, 77(2): 215-221.
- [26] Hayati S, Mirmirani M. Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators[J]. Journal of Field Robotics, 2010, 2(4): 397-413.
- [27] Abderrahim M, Whittaker A R. Kinematic model identification of industrial manipulators[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2000, 16(1): 1-8.
- [28] 宫金良, 黄风安, 张彦斐. 基于指数积的Delta 机器人运动学正解建模[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(6): 581-585.
- [29] Joubair A, Bonev I A. Kinematic calibration of a six-axis serial robot using distance and sphere constraints[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(1-4): 515-523.
- [30] 张旭, 郑泽龙, 齐勇. 6 自由度串联机器人D-H模型参数辨识及标定[J]. 机器人, 2016, 38(3): 360-370.
- [31] 郭发勇, 梅涛, 赵江海. D-H法建立连杆坐标系存在的问题及改进[J]. 中国机械工程, 2014, 25(20): 2710-2714.
- [32] Filion A, Joubair A, Tahan A S, et al. Robot calibration using a portable photogrammetry system[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2018, 49: 77-87.
- [33] Matej L. Measuring inspection of CNC milling machine accurate by means of Ballbar QC10 system[J]. Journal of Biological Chemistry, 2010, 274(36): 25260-25265.
- [34] Icli C, Stepanenko O, Bonev I. New method and portable measurement device for the calibration of industrial robots[J]. Sensors, 2020, 20(20): 5919-5933.
- [35] 杜亮, 张铁, 戴孝亮. 激光跟踪仪测量距离误差的机器人运动学参数补偿[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8):

- 2351–2357.
- [36] Posada J, Schneider U, Pidan S, et al. High accurate robotic drilling with external sensor and compliance model-based compensation[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Stockholm, Sweden: IEEE, 2016: 3901–3907.
- [37] Hughes B, Forbes A, Lewis A, et al. Laser tracker error determination using a network measurement[J]. *Measurement Science & Technology*, 2011, 22(4): 045103.
- [38] Oh Y T. Robot accuracy evaluation using a ball-bar link system[J]. *Robotica*, 2011, 29(6): 917–927.
- [39] 洪振宇, 梅江平, 赵学满, 等. 基于球杆仪检测信息的并联机构运动学标定[J]. *机械工程学报*, 2007(7): 16–22.
- [40] Kolyubin S, Paramonov L, Shiriaev A. Robot kinematics identification: KUKA LWR4+ redundant manipulator example[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2015, 659(1): 012011.
- [41] Haznedar B, Kalinli A. Training ANFIS structure using simulated annealing algorithm for dynamic systems identification[J]. *Neurocomputing*, 2018, 302(9): 66–74.
- [42] Sun Z, Yang Z Y. Study of nonlinear parameter identification using UKF and Maximum Likelihood method[C]//2010 IEEE International Conference on Control Applications. Yokohama, Japan: IEEE, 2010: 671–676.
- [43] Park I W, Lee B J, Cho S H, et al. Laser-based kinematic calibration of robot manipulator using differential kinematics[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(6): 1059–1067.
- [44] Yier W, Alexandr K, Stéphane C, et al. Geometric calibration of industrial robots using enhanced partial pose measurements and design of experiments[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2015, 35: 151–168.
- [45] Marquardt D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. *Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics*, 1963, 11(2): 431–441.
- [46] Lightcap C, Hamner S, Schmitz T, et al. Improved positioning accuracy of the PA10-6CE robot with geometric and flexibility calibration[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(2): 452–456.
- [47] 刘湛基, 王晗, 陈籽, 等. 机器人与激光跟踪仪的坐标系转换方法研究[J]. *中国测试*, 2017, 43(11): 102–107.
- [48] Santolaria J, Conte J, Manuel G. Laser tracker-based kinematic parameter calibration of industrial robots by improved CPA method and active retroreflector[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 66(9–12): 2087–2106.
- [49] Nubiola A, Bonev I A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. *Robotics & Computer Integrated Manufacturing*, 2013, 29(1): 236–245.
- [50] 王一, 刘常杰, 任永杰, 等. 工业坐标测量机器人定位误差补偿技术[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(15): 31–36.
- [51] 何晓煦, 田威, 曾远帆, 等. 面向飞机装配的机器人定位误差和残差补偿[J]. *航空学报*, 2017, 38(4): 292–302.
- [52] Tian W, Mei D Q, Li P C, et al. Determination of optimal samples for robot calibration based on error similarity[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(3): 946–953.
- [53] 田国良, 卜昆, 邱飞, 等. 基于BP神经网络的熔模铸件收缩率预测研究[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(9): 47–51.
- [54] Vosniakos G C, Angelidis A. Prediction and compensation of relative position error along industrial robot end-effector paths[J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2014, 15(1): 63–73.
- [55] Nguyen H N, 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(3): 996–1005.
- [56] Santiago D. Real time path correction of industrial robots with direct end-effector feedback from a laser tracker[J]. *Sae International Journal of Aerospace*, 2014, 7(2): 222–228.
- [57] Russell D V, Todd S. Improved accuracy of unguided articulated robots[J]. *Sae International Journal of Aerospace*, 2009, 2(1): 40–45.
- [58] Russell D, Todd S. Applied accurate robotic drilling for aircraft fuselage[J]. *Sae International Journal of Aerospace*, 2010, 3(1): 180–186.
- [59] Wu B, Zhang Y. Reference sphere positioning measurement based on line-structured light vision sensor[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, doi: 10.1155/2013/587904.
- [60] 郝继贵, 张楠楠, 任永杰, 等. 基于双目立体视觉的工业机器人在线温度补偿[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(9): 2139–2149.
- [61] Morozov M, Riise J, Summan R, et al. Assessing the accuracy of industrial robots through metrology for the en-

hancement of automated non-destructive testing[C]//
IEEE International Conference on Multisensor Fusion &

Integration for Intelligent Systems. Kongresshaus Baden-
Baden, Germany: IEEE, 2017: 335-340.

Summary of absolute positioning error compensation technology for industrial robots

FU Pengqiang, JIANG Xiaocan, MIAO Yuhang, WANG Yiwen, WANG Zhao

Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Intelligent Technology (Harbin University of Science and Technology), Ministry of Education, Harbin 150080, China

Abstract According to the problem that the actual position of an industrial robot has deviation from its theoretical position in aviation manufacturing industry, the source of absolute positioning error of industrial robot is explored and its influence on the connection performance of aircraft components is analyzed. Based on the principle of absolute positioning error compensation of industrial robot, the role and importance of kinematic modeling, pose measurement, kinematic parameter error identification and error compensation on absolute positioning error compensation of industrial robot are described. The mainstream algorithms and techniques developed by domestic and foreign scholars in this field are compared, and problems and possible solutions existing in each step are summarized. After discussions on shortcomings of industrial robot offline and online error compensation technologies, a development trend of industrial robot absolute positioning error compensation technology is presented.

Keywords industrial robot; absolute positioning error; error analysis; error compensation technology ●



(责任编辑 傅雪)