

基于模型的工业机器人误差参数标定技术研究进展

崔正杰¹, 刘厚才¹, 康辉民^{1*}, 左国才^{2*}, 胡胜巧¹, 刘志诚¹

1. 湖南科技大学机电工程学院, 湘潭 411201

2. 湖南软件职业技术大学, 湘潭 411100

摘要 为提高机器人末端控制精度, 围绕基于模型的工业机器人误差参数标定技术, 总结了其应用在高精度机械加工制造领域时存在的误差参数不完整、标定成本高和标定精度不满足工业需求等关键问题; 综述了误差参数标定模型建模方法、机器人末端位姿测量技术、误差参数辨识技术和误差补偿技术4个方面的进展, 分析了处理复杂标定任务时基于模型的误差参数模型标定技术的主要难点进行总结, 针对传统建模方法不再满足标定需求、现有自标定技术测量精度不够、传统线性辨识算法在辨识矩阵奇异或存在冗余参数时无法得到准确的辨识结果、如何高效获得和处理测量得到的误差数据等难题, 提出了可行性解决方案及发展方向。

关键词 工业机器人; 误差模型; 参数标定; 参数测量; 参数辨识; 误差补偿

在电机技术、计算机技术、控制技术、数字化技术的推动下, 工业机器人自1959年面世以来历经60余年的发展, 由单机生产发展到由多机协同联动控制的机器人生产线, 并成为现代智能制造的核心技术, 被广泛应用于焊接、搬运、装配等领域^[1-4]。同时, 专用精密机床环境适应性差、加工模式固定、加工周期长等缺陷, 无法满足现代工业装配精度

高、型号多变、研制周期短的加工要求, 而工业机器人凭借其重复定位精度高、任务柔性高、制造和维护成本较低等优势^[5], 可有效地弥补机床加工的缺陷, 为大型复杂零件的加工提供了新思路^[6-9]。美国Electroimpact公司为波音公司研制出用于F/A-18E/F战斗机襟翼装配的机器人自动制孔系统, 其空间定位精度经补偿后可达 ± 0.5 mm(图1)^[10]。德

收稿日期: 2022-03-28; 修回日期: 2022-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875198); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ7007); 湘潭市联合基金项目(2021JJ50118)

作者简介: 崔正杰, 硕士研究生, 研究方向为铣削机器人, 电子信箱: demjoker@163.com; 康辉民(通信作者), 教授, 研究方向为磁悬浮轴承技术、机器人技术、数字化与智能制造技术, 电子信箱: xykanghm@163.com; 左国才(共同通信作者), 教授, 研究方向为机器视觉、深度学习, 电子信箱: zuoguocai@hnssoftedu.com

引用格式: 崔正杰, 刘厚才, 康辉民, 等. 基于模型的工业机器人误差参数标定技术研究进展[J]. 科技导报, 2022, 40(13): 36-49; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.13.004

国 Fraunhofer IFAM 研究所成功研发了移动式数控加工机器人系统,该系统利用双目视觉伺服控制技术和关节转角反馈控制技术,使机器人末端轨迹精度达到 ± 0.35 mm,轨迹重复控制精度达到 ± 0.063 mm,并已应用于空客 A350 机身及翼面部件的修配(图 2)^[11]。而华中科技大学丁汉团队^[12]、南京航空航天大学廖文和团队^[13-14]以及天津大学郑继贵团队^[15-16]等则重点研究将工业机器人应用于航天发动机叶片的智能磨抛作业、航天工业的钻铆/装配作业以及制造现场的在线测量系统等高端制造领域。



图1 机器人自动制孔系统

图2 移动机器人系统
加工 A320 机翼

尽管国内外对工业机器人的研究内容广泛,并逐步向控制精度要求更高的机械加工领域发展(如修边、去毛刺、磨削和铣削等),但由于工业机器人自身绝对定位精度不足、刚度低等缺陷,导致机械加工时所产生的时变切削力和振动造成工业机器人在高精度加工中出现较大的制造误差,无法达到加工精度需求,从而限制了工业机器人的推广和应用^[17]。为进一步提高机器人末端的控制精度,国内外研究者常采用机器人误差参数标定技术,即通过建立机器人控制参数与末端位姿误差参数之间的映射关系,预测或测量机器人末端误差来进行误差补偿,可分为在线辨识补偿和离线辨识补偿。在线辨识补偿通过传感器实时检测机器人末端位姿误差,并不断实时调整控制参数对末端轨迹误差进行修正,主要应用于未知误差源干扰下的整体实时补偿;而离线辨识补偿则主要针对具体任务空间中的已知主要误差源进行补偿,如基于误差参数模型的误差补偿、基于误差-补偿数据库的误差补偿等。其中基于误差-补偿数据库的误差补偿方法需要在机器人的工作空间内进行大量数据训练和学习,对于特定工况下的具体机器人有着更高的综合补

偿精度。但当机器人工况改变时,数据库便失去参考性,因此不具有普适性。而基于误差参数模型的误差标定技术则通过机器人运动学、动力学控制算法进行建模,能够更好地根据不同的标定需求调整模型,因而得到了广泛应用。

当前基于模型的误差参数标定技术在应用于机械加工领域时,因机器人末端负载的增大、加工轨迹连续性要求和标定精度要求的提高,无法满足复杂标定任务需求。因此,本文从当前基于模型的误差参数标定技术的主要问题出发,从标定模型的建模、机器人末端位姿测量技术、误差参数辨识技术和基于模型的误差补偿技术等方面对现有研究成果进行回顾和分析,总结基于模型的误差参数标定技术的难点,探讨其未来发展趋势。

1 基于模型的误差参数标定技术的主要问题

为了提高机器人末端的位姿控制精度以满足机械加工应用中的高精度、高效、实时性好等要求,当前基于模型的误差参数标定技术的主要问题体现在以下 4 个方面。

1) 误差参数标定模型的模型复杂度和精度问题。为得到准确标定结果,误差参数标定模型要满足完整性(能充分反映各类参数误差对末端位姿误差的影响)、连续性(参数变化是连续的,不存在参数奇异问题)和无冗余性(误差参数之间相互独立)要求^[18]。针对几何误差参数的标定模型主要通过运动学模型的微分得到,无法满足连续性和无冗余性要求。针对非几何参数的辨识模型通过动力学方程的线性化对机器人惯性参数进行辨识,忽略了机器人结构柔性、关节摩擦和末端负载对动力学控制精度的影响,导致辨识模型不满足完整性要求。

2) 机器人末端位姿测量技术的测量成本和效率问题。尽管商用测量仪器能够取得较为准确的机器人末端位姿误差信息,但对操作人员和环境要求较高,测量成本高昂,使其无法在工业现场得到广泛应用。此外,测量信号存在噪声干扰,也降低了测量结果的可信度。

3) 参数辨识技术的辨识效率和局部最优问题。以最小二乘法(least squares, L-S)为代表的线性参数辨识方法在应用于辨识矩阵奇异或存在冗余参数时,无法得到满意的辨识精度;而以智能算法为代表的非线性优化方法则较为复杂,存在对计算初值敏感、可能陷入局部最优等问题。此外,参数整体辨识策略使得辨识过程复杂且收敛较慢,无法满足工业标定上快速、准确的辨识需求。

4) 误差补偿技术的残余误差和补偿实时性问题。通过关节空间或操作空间的误差补偿方法必然会改变机器人的构型,产生新的残余误差。而对于复杂的加工环境而言,机器人末端的误差补偿需要满足实时性,因此对补偿算法的效率和计算复杂度有更高的要求。

2 误差参数标定模型建模

基于模型的误差参数标定技术的首要任务就是建立参数标定模型。其中,对于几何误差参数主要是通过建立误差参数标定模型,该模型的本质是几何误差参数与机器人末端位姿误差之间的映射关系^[19];而对于非几何参数则主要通过建立参数辨识模型,该模型本质是关节角位移、角速度、角加速度与关节力、末端负载之间的映射关系^[20-21]。而为了提高模型的标定精度,误差参数标定模型需要满足完整性、连续性、无冗余性要求。

2.1 几何参数标定模型建模

由机器人构件的加工、装配、磨损导致的几何误差参数,是轻载工况下工业机器人的主要误差源。针对几何误差参数标定模型的建模主要通过机器人运动学模型参数的微分化得到,选择合适的机器人运动学模型的建模方法是误差参数建模的首要任务。常用的机器人运动学建模方法有D-H(denavit-hartenberg)模型法、S(stone)模型法、CPC(complete and parametrically continuous)模型法、指数积(product of exponential, POE)模型法等^[19]。

D-H模型法因其结构简洁、无冗余参数、易于理解的特点,被广泛应用于机器人运动学控制系统中^[22]。但当相邻关节轴线接近平行时,关节轴线的

任意微小姿态变化都会导致误差模型中参数突变,不满足标定模型的连续性要求。为了解决这一问题, Hayati等^[23-24]提出的M-DH参数法通过引入绕y轴转动的转角,将突变的长度参数转化为角度参数描述,使得两轴线平行与非平行2种情况下标定参数连续变化。陈新渡^[22]、李楠^[25]应用M-DH(modified-DH)参数法建立了机器人的运动学误差参数模型,实现了机器人几何误差参数的标定。但该模型无法描述相邻关节轴线垂直时的相对位姿,仍不满足连续性要求^[26]。此外,上述方法都依赖严格的局部坐标系建立规则,无法准确描述任意基坐标系与1关节坐标系间的相对位姿关系,不满足标定模型的完整性要求。因此, Stone等^[27-29]在D-H模型局部坐标系的基础上,建立了一种新的S模型法。该方法通过增加沿关节轴线移动的直线坐标参数和绕关节轴线旋转的角度坐标参数描述机器人构件在空间的6个自由度。在弥补D-H模型法系统参数不完整的同时,避免了D-H模型法局部坐标系的原点必须是z轴与x轴正交的缺陷。但该方法也引入了D-H模型法的建模方式,导致模型参数的不连续问题仍然存在,而新引入的参数也使得模型不满足无冗余性参数的要求。

为了满足标定模型的连续性要求, Zhuang等^[30-31]引入新的非奇异空间直线表征方法,提出了CPC模型法。该方法通过3个参数描述相邻连杆坐标系之间的空间姿态关系,2个长度参数描述相邻连杆坐标系原点之间的相对位置关系,使关节参数和连杆参数相互独立,有利于标定过程中运动学解耦和线性化,常用于特殊构型(2轴相互平行或垂直)串联机构的运动学标定建模。在满足机器人工具坐标系轴线与最末关节轴线方向不相反的前提下,通过额外增加2个冗余参数描述坐标系原点和方向的改变,实现任意设定机器人末端坐标系^[30]。此外, CPC模型法中的冗余参数可在标定过程中消除,满足标定模型的无冗余性要求。但因该方法建模时将关节轴线方向向量作为标定参数,当机器人工具坐标系轴线与最末关节轴线垂直时,仍存在参数奇异性问题^[31]。基于此, Modified-CPC(MCPC)模型法通过2个角度参数代替关节轴线方

向向量,满足标定模型的完整性、连续性、无冗余性要求,更容易推导和编程,并可通过相应变换避免解决该方法建立的误差参数模型的奇异性问题。陈钢等^[32]通过MCPC模型法建立了8自由度模块化机器人的运动学误差参数标定模型并验证其算法的可行性。

Mooring等^[33-34]借助Rodrigues公式,通过定义关节轴线单位方向向量、关节之间的连杆向量和固定在末端执行器的2个垂直单位向量定义机器人的初始构型,并引入关节变量表征不同坐标系之间的相对位姿关系,提出了满足完整性和连续性要求的零位基准法。相对于DH模型法,该方法不需要建立连杆坐标系,能更加灵活地建立机器人的初始构型。但缺少严密证明误差标定模型中的冗余参数可通过忽略特定方向上的旋转和平移误差进行消除,因此限制了该方法在机器人误差参数标定模型建模上的应用^[26]。在此基础上,Okamura等^[35-36]利用李代数的指数积公式易于微分求导的特点,建立了将结构零位误差参数和转角误差参数相区分的指数积模型法。该方法通过关节旋量、关节角度、零位旋量坐标描述机器人末端相对于机器人基坐标系的位姿关系,并微分化得到误差参数标定模型,具有参数完备、表达简洁、物理意义清晰的特点。但模型存在微分隐式形式复杂^[37-41]、运动旋量单位正交化产生冗余参数^[42-46]等问题,限制了其广泛应用。Selig等^[37-38]虽然给出了全局POE公式的显式形式,但其标定模型无法描述关节转角误差,不满足标定模型的完整性要求;He等^[39-41]在其基础上进一步推导出满足误差完整性要求的串联机构运动学全局POE公式的通用显式,并分析了模型中3类旋量误差的可辨识性。而陈根良^[42]则将关节旋量误差分解为关节角度误差和零位旋量坐标误差,通过关节运动旋量的零化空间和象空间的标准正交基的解析分离算子,得到无冗余参数的全局POE误差参数标定模型。Qiao等^[43-44]提出的公垂线变换法,虽然解决了关节旋量的单位正交化问题,但其建立的误差参数与末端位姿的映射关系复杂。白海龙^[45]则将关节角度误差和关节旋量误差统一为伴随误差,提出改进全局POE模型。谷乐丰^[46]采

用局部POE模型,通过关节零位旋量坐标误差代替关节运动旋量,避免了运动旋量的单位正交化。

2.2 非几何参数辨识模型建模

在对几何参数进行误差参数标定后,为了进一步提高工业机器人连续运行的轨迹精度,往往还需要进一步对非几何参数(惯性参数、关节摩擦系数、结构柔性系数)进行辨识以获取准确的动力学控制模型,有利于设计误差补偿算法从而改善机器人轨迹跟踪精度^[19-20],相关建模方法如下。

2.2.1 针对惯性参数的建模

由于忽略了摩擦的机器人刚体动力学特性是其惯性参数的线性函数,因此可通过机器人刚体动力学方程的线性化获得惯性参数辨识模型,并用测量得到的关节力矩、角位移、角速度、角加速度线性估计得到实际连杆惯性参数。常用机器人刚体动力学的建模方法有拉格朗日法、牛顿-欧拉法、凯恩方法、高斯法、虚功原理等^[47-53]。

拉格朗日法基于系统能量守恒定律,在获得关节速度信息后通过拉格朗日方程建立各关节及连杆处集中质量的动能和势能能量方程,并转化为机器人动力学模型的矩阵形式,其结构简单、物理意义明确,有利于动力学原理的理解和分析^[47-49]。但当机器人系统关节较多时,动力学方程中项数的增多导致计算量急剧增大。此外,由于动力学方程通过系统总能量对状态变量及时间的微分而获得,不易于计算机编程。而牛顿-欧拉法则基于矢量力学原理的力平衡,通过沿机器人关节的前向迭代公式和后向迭代递推公式分别得到机器人每部分的力、力矩信息和速度、加速度信息,消去其中的内作用力并通过力矩平衡方程推导得到动力学方程。该方法能够获得较为全面的机器人动力学特性信息,形式简单且计算效率高、易于编程。

而凯恩法保留了牛顿-欧拉法中循环迭代计算的特点,通过偏速度矢量、偏角速度矢量和广义主动力、广义惯性力在外部坐标系中建立系统动力学方程,不需要对系统内部约束力和求导能量函数进行分析,使得算法简洁高效^[50-53]。高斯法则以机器人的关节加速度为系统变量,通过变分原理构造微分方程,适用于结构复杂、约束条件多样的机器

人系统。而虚功原理法将动力学问题用虚功和虚位移将动力学问题转化为静力问题,适用于简单结构的机器人系统。

此外,随着工业机器人末端负载与机器人自重的比值趋于1,末端负载不能再视为最末连杆的一部分,相关研究者针对末端负载参数进行独立建模分析^[54]。丁亚东^[21]在基础动力学参数辨识的基础上对负载参数进行建模,得出负载参数与基础动力学参数之间不存在耦合关系,有利于负载参数的单独辨识。

2.2.2 针对关节摩擦力矩的参数建模

末端负载的增大导致近25%的关节电机力矩用于克服机器人关节摩擦对机器人系统动力学特性的影响,因此高精度控制还需要对机器人关节摩擦力矩系数进行建模。针对机器人关节摩擦力矩的模型主要有基于摩擦机理的数学模型和基于数据库的经验模型^[55-62]。

基于摩擦机理的数学模型有经典静态摩擦模型^[55-56]、Stribeck摩擦模型^[57-58]、LuGre动态模型^[59-60]等。孙玉阳^[52]通过经典静态摩擦模型描述重载机器人的关节摩擦并通过动力学参数的整体辨识得到各关节滑动摩擦系数和黏滞摩擦系数。Fu等^[55]基于李代数提出了包含库伦摩擦和黏滞摩擦模型的通用串联机器人动力学参数辨识模型。胡智宇^[57]通过分析Stribeck摩擦模型参数与负载力矩间的关系,建立了关于关节速度和负载力矩的摩擦模型。吴晓敏^[58]通过对Stribeck模型进行测量辨识,得到静摩擦力矩、库伦摩擦力矩、黏性摩擦系数、Stribeck速度与温度之间的关系,并对摩擦模型进行改进。陈良波^[59]通过2步法分析得到2自由度机器人2转动关节的LuGre摩擦模型静力参数动力学参数辨识的目标函数。

而基于数据库的经验模型则以Daemi-Heimann摩擦模型^[49-62]为代表。涂晓^[49]综合考虑关节速度和负载大小对摩擦的影响,结合数据样本构建了基于3层BP(back-propagation)神经网络的摩擦模型网络结构描述非线性关节摩擦。贺苗等^[61]引入Daemi-Heimann摩擦模型来解决一般摩擦模型不连续造成的控制力变化过大问题。

2.2.3 针对机器人结构刚度参数的建模

随着工业机器人的末端负载增大,其自身结构柔性引起的末端位置误差量可达毫米级,由此机器人标定技术需要对机器人的结构柔性系数进行建模辨识以设计更加准确的末端误差补偿算法。而相对于机器人的柔性杆,机器人柔性关节对末端控制精度的影响更大,研究者将引起大于机器人重复定位精度量级的末端定位误差的关节视为柔性^[26]。Spong^[63]于1987年将柔性关节简化为线性扭转弹簧,其关节刚度等效为扭转弹簧的弹性系数,提出了Spong模型。杨坤^[26]针对柔性关节建立了机器人刚柔耦合动力学模型,证明了Spong模型的有效性。Khorasani等^[64]进一步考虑电机转子和机器人关节处的黏滞阻尼,建立了更完善的柔性关节模型。Bridges等^[65]、Ailon等^[66]则考虑了关节摩擦、关节柔度的非线性、外界扰动以及连杆与电机的耦合和不确定干扰,进一步完善了柔性关节模型(图3^[60])。然而完善的柔性关节模型过于复杂而不利于线性化,因此当前较少应用在动力学参数辨识建模中。而由于柔性系统的动力学模型是非线性、时变和强耦合的偏微分方程,通常不易得到精确的解析解,研究者通过离散方法将柔性系统的偏微分方程转化为常微分方程近似求解,主要方法有假设模态法、有限段法、有限元法和集中质量法等^[63,67-68]。方五益^[68]通过假设模态法描述柔性杆变形,并通过矩阵递推方法建立了柔性多杆多铰机器人的高次刚柔耦合动力学方程。但当该方法处理较大形变的复杂结构动力学问题时,获取机器人模态较为困难,离散的仿真结果误差较大。陈健^[63]利用Spong模型建立柔性关节模型以及利用集中参数法建立柔性连杆模型后,通过拉格朗日方程建立了更加精确的刚柔耦合动力学模型。

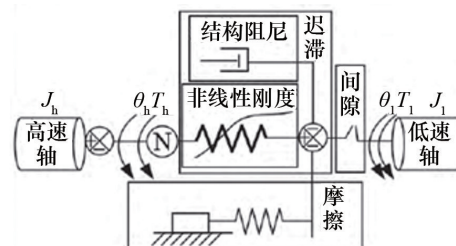


图3 关节柔度示意

3 机器人末端位姿测量技术

当前机器人末端位姿测量技术主要以降低测量的系统误差、提高测量信号的抗噪性为研究目标,此外对于工业测量还需要满足易操作、低成本等要求^[26]。下面分别从测量仪器和测量信号的优化处理进行论述。

3.1 测量仪器

当前国内外应用于机器人标定上的测量方式大致可分为开环法和闭环法^[19]。其中开环法是通过高精度外部测量仪器测量机器人末端安装的靶目标,获得其在测量系统坐标系中的位姿并通过坐标系变换到机器人基坐标系下,从而得到机器人参数标定所需信息。常用测量仪器主要包括激光测量仪^[45]、三坐标测量机、激光扫描仪^[69-70]、LaserLAB、DynaCal、球杆仪^[71-72]等,其各类特点见表1。虽然通过开环法测量能取得较好的参数标定结果,但上述商用测量仪器通常存在价格昂贵、对操作人员和测量环境要求高等问题而无法在工业生产中推广应用。

而闭环法(即自标定技术)不依赖于外部测量仪器,通过冗余传感器或物理约束获取参数标定所需信息,具有低成本、易操作的优势,其根据测量形式大致可分为非接触式测量和接触式测量^[73-82]。非接触式自标定方案主要是通过激光传感器、摄像机等测量仪器测量机器人末端与传感器之间的距离信息^[73-75]。Guo等^[73]将3个激光位移传感器正交放置构建测量装置(图4^[73])。该测量机构可用远低于激光追踪仪的测量成本对6轴工业机器人进行运动学误差参数标定,得到与基于激光追踪仪的测量方案相近的标定精度。Wang等^[74]运用相机对机器人运动学参数进行标定(图5^[74])。该方法通过高精度标定球和相机图像处理算法实现了高精度测量,使末端平均距离误差从2.05 mm缩小至0.24 mm、重复定位精度从1.637 mm降低至0.139 mm。然而此类非接触型自标定方案都存在测量范围和测量精度的矛盾,同时环境因素(如灰尘、温度、光线强弱程度)对测量结果也有影响^[75]。因此还有部分研究者基于接触式传感器对机器人末端误差进行低成本标定研究。

表1 工业机器人标定仪器性能对比

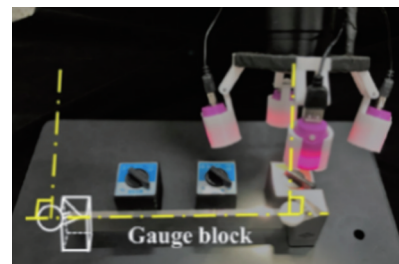
标定仪器	测量精度	测量范围	是否接触	价格/万元
激光追踪仪	15 $\mu\text{m} \pm 6 \mu\text{m}/\text{m}$	整个机器人工作空间	非接触	80
K-Series Optical CMM	0.09 mm	17 m×17 m×17 m	非接触	>60
扫描仪	$\pm 0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$	0.6~350 m	非接触	>40
LaserLAB	0.1 mm	39.5 mm×38.5 mm×36.5 mm	非接触	>40
Dynacal	0.15 mm	1.5 m×1.5 m×1.5 m	接触	>40
球杆仪	$\pm(0.7+0.3\%L) \mu\text{m}$ (L为球杆仪长度)	$\pm 1.0 \text{ mm}$	接触	>0.6



图4 基于激光传感器的机器人测量装置



(a) 点约束测量



(b) 距离约束测量

图5 基于机械视觉的测量方法

基于接触式传感器的自标定方案则主要通过机器人末端与接触式传感器的物理约束获取已知接触式传感器相对于机器人的实际空间位置,从而实现机器人末端位置的准确测量^[76-82]。Du等^[76]提出了基于多传感器的自标定,通过位置标记器和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)实时追踪机器人末端位姿,并通过UFK(unscented kalman filter)算法辨识得到其运动学参数。Gaudreault等^[77]通过TriCal进行机器人末端位姿的测量,标定后的位置精度与球杆仪的结果相似,但成本大幅降低。蔡煜野^[78]通过平板设备对机器人进行运动学参数的二重标定,降低了因平板测量精度带来的测量误差影响,将机器人的绝对定位精度提高到0.2 mm以上。谷乐丰^[79]设计了一类基于双球约束的便携式测量装置(图6^[79]),有利于实现更大空间内的误差参数测量任务。成世良^[80]、洪伟松^[81]、朱煜^[82]通过拉线编码器构成了工业机器人标定系统(图7^[82]),使得标定后的机器人绝对定位精度提高。但传感器精度、结构设计和装配精度影响着测量机构的精度。

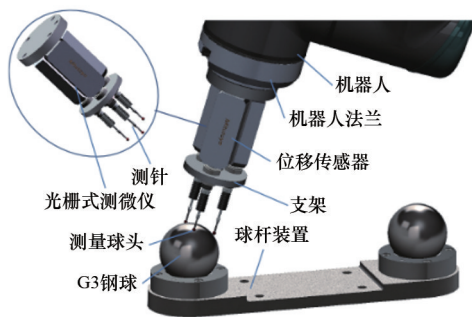


图6 基于双球约束的便携式测量装置

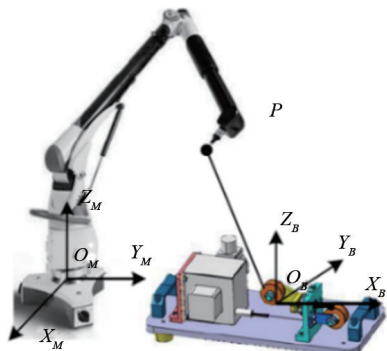


图7 基于拉线传感器的测量方案原理

3.2 测量信号的优化方法

为了提高测量效率,实际测量往往选择有限组数的机器人末端位型进行测量。而为了用更少地测量位型组获得抗噪能力更强、全局表征性更好的测量结果,通常需要对测量信号进行优化筛选和处理。当前针对测量信号优化的研究主要从测量位型/轨迹优选和测量噪声过滤等方面进行。

测量信号的优化筛选通过相应的优化算法确定机器人工作空间内抗噪性较好的几组测量位型或轨迹,由此得到的测量信号全局表征性更好、更容易得到更精确稳定的辨识结果。

对于几何误差参数标定而言,测量信号的优化主要通过测量位型优选,主要的优化指标有条件数和可观测指标^[83-87]。王坤^[83]基于条件数设计了标定位姿优化的图形用户接口(graphical user interface, GUI)程序,其优化标定的结果相对于随机姿态的标定结果更加准确,使修正后机器人末端最大误差降低了26%。但不同量纲下条件数的变化不一致,无法准确表述机器人的位型特点。Tandirci等^[84]、Ma等^[85]、Gosselin^[86]、张文静^[87]通过特征长度、多点替换、乘加权矩阵等方法对雅可比矩阵进行归一化。将参数辨识视为非线性优化问题的求解,即求解一组参数使得控制模型计算得到的机器人末端位姿与实际测量位姿值差值最小^[88]。陈宵燕^[5]结合可观测指标和辨识精度指标通过自适应粒子群优化算法对测量位型进行优化,降低了人为误差和环境误差的影响。此外还有一些辅助指标用于综合指标优化,如各向同性指标^[87]、参数精度指标^[5]等。在确定了优化指标后,测量位型的优选则本质上是非线性优化问题,因此常通过智能算法进行求解,如模拟退火算法、粒子群算法、人工蜂群算法^[25]、遗传(genetic algorithm, GA)算法^[89-90]、浮动前向/后向搜索(sequential forward/backward floating search, SFFS/SBFS)算法^[91]、DETMEX方法^[92]等。陈宵燕^[5]采用改进的自适应粒子群(improved adaptive particle swarm optimisation, IAPSO)算法,通过设定粒子寻优的空间设置和路径奇点约束,提高粒子群算法的收敛速度,同时以辨识矩阵的可观测指标和参数辨识精度指标为双优化目标,得到全局表征性更好

的测量结果。李楠^[25]则以位型组合的条件数为优化指标,通过人工蜂群算法得到辨识所需的最优位型组合。汤怀艳^[89]采用遗传算法求出具有较强鲁棒性的全局最优解。

而对于非几何参数辨识,测量位型优化问题则转化为连续的激励轨迹优化问题^[93-94]。合理的激励轨迹不仅可以充分对动力学参数进行激励,同时提高了测量信号的抗噪性。Gautier等^[93]通过由非线性优化算法确定了5次多项式的辨识轨迹。而相对于基于多项式的激励轨迹,傅里叶级数轨迹具有避开机器人固有频率设置关节运动频率、便于在数据处理中选择合适的滤波频率、正余弦高阶可导等特点,使得基于此的激励轨迹更能体现机器人动力学特性。Swevers等^[94]通过基于有限傅里叶级数的优化激励轨迹,相对于基于多项式的激励轨迹提高了参数的辨识精度。

为了降低测量噪声对测量结果的影响,常用的降噪方法就是重复测量取平均值。陈宵燕^[5]通过测量噪声的模拟实验得到可靠的实验结果需要最小重复次数为100,因此,每组实验均在随机测量噪声作用下重复200次以获得更加可靠的统计数据。然而,该方法并没有针对具体误差进行过滤,因此降噪效率较低。而针对机器人关节电机中驱动器中的高频谐波产生的测量误差,孙玉阳^[52]在通过GA算法得到测量位型解集后,用快速傅里叶变换筛掉测量信号中由驱动器电流环调整产生的高频谐波。涂骁^[49]通过均值滤波以及“五点三次平滑法”提高对力矩贡献率低的参数的抗噪性。

4 误差参数辨识技术

将测量数据导入到误差参数标定模型进行数值分析或优化方法进行求解得到误差参数的过程即为误差参数辨识。其中,辨识算法的选择和辨识策略的设计都影响着参数辨识精度和收敛速度。

对于线性方程参数的辨识,L-S算法因其迭代过程简单、收敛速度快、计算过程中可忽略系统扰动因素影响而被广泛应用。熊刚^[91]通过线性L-S算法对修正POE公式中的参数进行辨识并通过逆

雅可比迭代算法进行误差补偿,使得机器人末端的平均误差处于(0.316 mm, 0.324 mm)。但当辨识矩阵奇异或存在冗余参数时,L-S算法无法取得准确的辨识值,因此研究者通过引入阻尼系数,提出L-M(Levenberg-Marquardt)算法。该方法具有更强的局部收敛性、收敛速度快、鲁棒性强等特点,解决了L-S算法的奇异性问题。李博文^[95]采用L-M算法,通过不断调整阻尼系数的值进行有限次迭代,提高了参数辨识的准确性。但该算法由于增加了额外参数导致计算量较大;同时应用到高阶非线性方程时,辨识矩阵奇异会导致算法不收敛^[5]。而另一种常用辨识算法则是卡尔曼滤波算法,该方法基于协方差对每个迭代值进行最优估计,具有计算简单、有效防止噪声影响的优点。扩展卡尔曼滤波算法则在最优点附近进行泰勒级数展开从而将非线性方程转化为线性方程进行参数辨识。高贯斌等^[96]通过扩展卡尔曼滤波(extended kalman filter, EKF)算法解决了传统算法在噪声影响较大且不符合高斯分布时收敛慢的问题,实现了机器人运动学参数的快速辨识。而若将辨识过程视为非线性优化问题时,还可以通过智能算法处理复杂数据,常用的有遗传算法^[97]、粒子群算法^[98-99]、人工蜂群算法^[99]、模拟退火算法^[100]、序列二次规划算法^[87]等。王琪^[98]在传统粒子群优化算法上结合遗传算法的特点,提出了自适应粒子群遗传算法,该算法能够更快地获得更优解。邓朋^[99]在量子粒子群优化算法的基础上进行改进,提高了算法的计算精度和收敛速度。覃志奎^[97]则采用遗传算法对误差模型进行仿真辨识,证明了辨识方法的有效性。向启均^[100]通过结合常规遗传算法和模拟退火算法的特点提出了改进模拟退火优化遗传算法,该算法具有更快的收敛速度、更好的稳定性和较高的寻优精度。

上述针对辨识算法的研究虽然可以提高辨识效率和准确性,但主要采用整体辨识法的辨识策略,而没有考虑具体参数的变化特性和不同参数影响之间的耦合干扰。针对这一问题,涂骁^[49]基于“高位统一,低位辨识”的辨识思想,对小惯性关节采用统一辨识以减少高位累积误差,对大惯性关节则进行逐一辨识。相对于传统的6轴整体辨识法,

有效减少了关节之间的耦合干扰;相对于6轴逐一辨识法则减少了高位参数辨识误差向低位方向的辨识误差累积。并且提出了“空载与带载力矩差值辨识策略”,通过插值重构负载线性化动力学模型,避免了本体参数误差的引入和动力学在线计算,提高了负载参数的辨识精度和效率。陈新渡^[22]则基于残余误差进行关节柔度系数的2步辨识,避免了刚度辨识时需要额外实验。Jiang等^[101]则以几何误差的灵敏度大小为分界点,分2步分别对高灵敏度参数、低灵敏度参数进行参数标定。与之类似,文科等^[102]通过先辨识角度参数后辨识长度参数的辨识策略达到比整体辨识更加准确的辨识结果,同时提高了辨识速度。

5 基于模型的误差补偿技术

在辨识得到准确的控制模型参数后,误差参数标定技术尚需进一步通过误差补偿算法修正参数误差所带来的影响,基于模型的误差补偿主要可分为离线误差预测补偿和在线误差测量补偿^[103-107]。其中离线误差预测补偿通过修正的控制模型预测机器人末端到达理论值时实际产生的位姿误差,并在关节空间或笛卡尔空间内进行前馈补偿来实现,关键在于控制模型的准确程度。Carriere等^[103]采用镜像矫正原理,通过在笛卡尔空间内的误差反向偏置设定机器人末端位置,有效减少铣削机器人末端约80%的初始误差。Zhao等^[104]对预测的非线性误差在关节空间进行离线误差补偿,有效降低了焊接机器人的平均误差和最大误差。王毅^[105]通过修正运动学参数并将误差预测值合理补偿到轨迹点,有效提高了工业机器人的铣孔精度。

而在线误差测量补偿则是通过实时测量机器人末端力、位姿等数据计算当前的补偿量,进而通过基于末端反馈的全闭环补偿技术或基于关节的半闭环补偿技术实现误差补偿^[6]。全闭环补偿技术通过测量机器人末端的实际位姿获取实时位姿误差进行补偿,而半闭环补偿技术则通过测量机器人关节角度的实际转角进行误差补偿^[106-107]。基于传感器的补偿技术在理论上拥有最高补偿精度,但其

实际补偿效果取决于补偿算法的计算效率和测量仪器的测量精度。Jiang等^[106]通过集成的6自由度测量系统T-mac对机器人末端进行实时测量跟踪,并结合测量数据进行迭代补偿和前馈补偿,使装配中平均位置误差减少到0.021 mm、姿态误差减少到0.008°。王龙飞^[107]通过工业相机和激光传感器的距离和方向测量实现在钻孔过程中对机器人末端进行定位误差补偿,将制孔误差平均值降低至0.25 mm、0.17°以内。

6 结论

当前国内外针对工业机器人在机械加工领域应用化进行了广泛研究,而基于模型的误差参数标定技术作为提高机器人末端位姿控制精度的有效手段,在处理机械加工应用中复杂的标定任务时出现标定模型不准确、测量成本昂贵且不适应工业生产环境、参数辨识效率低以及误差补偿算法效率低等问题,导致经标定结果修正后的机器人末端精度达不到加工精度要求,从而难以保证零件加工的表面加工质量。针对基于模型的机器人误差参数标定技术,国内外相关研究主要从误差参数标定模型的建模方法、末端位姿的测量技术、参数辨识技术和误差补偿技术4个方面展开研究,有效提高了误差参数的标定精度和效率,提高了机器人末端的位姿控制精度。

在近年国内外研究成果基础上,当前该领域存在的问题及其可行性解决方案如下。

1) 由于应用软件、开发环境较为成熟,以DH模型为基础的传统几何误差参数标定模型被广泛应用于处理简单的误差参数标定问题。而当机器人末端负载增大、运动连续性要求提高时,标定模型的复杂度增大,导致传统建模方法不再满足标定需求。MCPC模型法和POE模型法虽然满足完整性和连续性要求,但存在标定模型复杂、冗余参数不易剔除、缺乏相应软硬件应用环境等问题。而机器人末端负载的增大导致非几何误差对末端的影响增大,传统非几何参数辨识仅针对连杆惯性参数,无法实现对结构刚度、关节摩擦系数和末端负

载参数的辨识,无法量化其对机器人末端位姿误差的影响程度,导致机器人动态控制中无法对其造成的位姿误差进行准确补偿,使得末端的动态定位精度得不到提高;此外,还存在模型精度和可辨识性之间的矛盾。因此,考虑工业标定精度需求,从标定模型的3个基本要求出发,解决现有M-DH模型法在奇异位型处的连续性问题;针对MCPC模型、POE模型进行深入研究,设计更加简便的冗余参数筛选方法,完善相应的开发环境,建立其与DH模型间的转换方法,设计高效的运动学、动力学逆解算法以及机器人控制系统。结合机器人末端的控制精度要求和测量精度,合理选择非几何参数辨识模型的复杂度、设计更简洁高效的建模方法、多种建模方法有效结合、模型中冗余参数的判别和去除方法、非线性模型的线性化方法等都有利于提高非几何参数的辨识精度和可辨识性,这些需要进一步研究。

2) 测量技术依赖昂贵的商用测量仪器,虽然能在实验室条件下取得准确的测量结果,但对于测量操作人员、测量环境的要求较高,不利于工业推广应用;而现有工程实践常用的自标定技术虽然可有效降低测量成本,但存在测量精度不够、测量信息较为单一等问题。而测量位型/激励轨迹优选则存在位型优化指标与实际精度需求无法结合、优化算法的收敛较慢和易陷入局部最优、激励轨迹优选过程复杂等问题。此外,对于测量噪声需要设计相应的滤波算法。因此,针对当前自标定技术存在的问题,以降低测量噪声和提高测量精度为目标,优化现有测量机构,结合多种测量方式,设计新型测量机构。同时结合优化指标与标定精度需求,改进现有测量位型的优化指标和优选算法、优化激励轨迹和筛选过程,设计更有效的噪声滤波方法,提高测量信号的准确性。

3) 传统线性辨识算法在处理多误差参数辨识问题时,若辨识矩阵奇异或存在冗余参数,则无法得到准确的辨识结果。传统整体辨识策略辨识效率低且忽略辨识参数的空间分布特性,当前智能算法存在计算量大、收敛速度慢、易陷入局部最优等问题。因此,考虑辨识参数的空间分布特性和辨识

矩阵的奇异性,优化现有线性辨识算法,提高收敛速度;在避免陷入局部最优的前提下,改进现有智能算法、多种智能算法的结合以提高算法的收敛速度和准确性。同时,根据加工子空间内辨识参数特性设计高效的辨识策略。

4) 基于模型的离线误差预测补偿技术,虽然可通过关节误差补偿或者微分误差补偿提高机器人末端的轨迹精度,但因补偿过程中关节转角必然改变而存在残余误差;而在线误差测量补偿则需要通过对测量信息的处理获得误差补偿量,因此如何高效获得和处理测量得到的误差数据需要进一步研究。考虑到误差补偿的实时性和准确性,可从误差前馈补偿、误差反馈补偿、力反馈补偿、残余误差补偿等方面出发,多种补偿方法结合,改进现有误差补偿算法,设计分步补偿算法,能有效地提高误差补偿的准确度和实时性。

参考文献(References)

- [1] International Federation of Robotics. Robot History[EB/OL]. [2022-04-12]. <https://ifr.org/robot-history>.
- [2] 田涛, 邓双城, 杨朝岚, 等. 工业机器人的研究现状与发展趋势[J]. 新技术新工艺, 2015(3): 92-94.
- [3] Asada H, Kanade T. Design of direct-drive mechanical arms[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1983, 105(3): 312-316.
- [4] 韩峰涛. 工业机器人技术研究与发展综述[J]. 机器人技术与应用, 2021(5): 23-26.
- [5] 陈宵燕. 工业机器人多模式标定及刚柔耦合误差补偿方法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- [6] 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.
- [7] 郑法颖. 基于二级反馈的机器人精度补偿技术及应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [8] 岳超. 工业机器人加工系统刚度特性分析及铣削稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [9] 陈钦韬, 殷参, 张加波, 等. 面向铣削任务的工业机器人刚度位姿优化[J]. 机器人, 2021, 43(1): 90-100.
- [10] 丰飞, 杨海涛, 唐丽娜, 等. 大尺度构件重载高精加工机器人本体设计与性能提升关键技术[J]. 中国机械工程, 2021, 32(19): 2269-2287.

- [11] Devlieg R. High-accuracy robotic drilling/milling of 737 inboard flaps[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2011, 4(2): 1373-1379.
- [12] Xu X H, Zhu D H, Wang J S, et al. Calibration and accuracy analysis of robotic belt grinding system using the ruby probe and criteria sphere[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 51: 189-201.
- [13] Jiao J C, Tian W, Liao W H, et al. Processing configuration off-line optimization for functionally redundant robotic drilling tasks[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 110: 112-123.
- [14] 曾远帆, 田威, 廖文和. 面向飞机自动钻铆系统的工业机器人精度补偿技术[J]. 航空制造技术, 2016(18): 46-52.
- [15] Yin S B, Ren Y J, Zhu J G, et al. A vision-based self-calibration method for robotic visual inspection systems [J]. Sensors, 2013, 13(12): 16565-16582.
- [16] 杨守瑞, 尹仕斌, 任永杰, 等. 机器人柔性视觉测量系统标定方法的改进[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3239-3246.
- [17] Wu Q, Liu Y J, Wu C S. An overview of current situations of robot industry development[C]//ITM Web of Conferences. Paris: EDP Sciences, 2018: 03019.
- [18] Schröer K, Albright S L, Grethlein M. Complete, minimal and model-continuous kinematic models for robot calibration[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1997, 13(1): 73-85.
- [19] Xuan J Q, Xu S H. Review on kinematics calibration technology of serial robots[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(8): 1759-1774.
- [20] 耿令波. 工业机器人动力学参数辨识方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [21] 丁亚东. 工业机器人动力学参数辨识[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [22] 陈新渡. 基于误差模型的机器人定位精度补偿技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [23] Hayati S, Mirmirani M. Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators[J]. Journal of Field Robotics, 1985, 2(4): 397-413.
- [24] Hayati S A. Robot arm geometric link parameter estimation[C]//The 22nd IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ: IEEE, 1983: 1477-1483.
- [25] 李楠. 机械臂一键自标定的运动学参数辨识研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- [26] 杨坤. 基于李代数的工业机器人误差建模、参数辨识与误差补偿研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [27] Stone H, Sanderson A, Neuman C. Arm signature identification[C]//1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 1986, 3: 41-48.
- [28] Stone H, Sanderson A. A prototype arm signature identification system[C]//1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 1987, 4: 175-182.
- [29] Stone H W. Kinematic modeling, identification, and control of robotic manipulators[M]. Boston: Springer Science & Business Media, 1987.
- [30] Zhuang H, Roth Z S, Hamano F. A complete and parametrically continuous kinematic model for robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(4): 451-463.
- [31] Zhuang H Q, Wang L K, Roth Z S. Error-model-based robot calibration using a modified CPC model[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1993, 10(4): 287-299.
- [32] 陈钢, 贾庆轩, 李彤, 等. 基于误差模型的机器人运动学参数标定方法与实验[J]. 机器人, 2012, 34(6): 680-688.
- [33] Mooring B, Tang G. An improved method for identifying the kinematic parameters in a six-axis robot[C]//Proceedings of the International Conference and Exhibit on Computers in Engineering. Las Vegas, NV: American Society of Mechanical Engineers, 1984: 79-84.
- [34] Kazerounian K, Qian Z. Kinematic calibration of robotic manipulators[J]. ASME Journal of Mechanisms, Transmission and Automation in Design, 1989, 111: 482-487.
- [35] Okamura K, Park F C. Kinematic calibration using the product of exponentials formula[J]. Robotica, 1996, 14(4): 415.
- [36] Park F C, Bobrow J E. Geometric optimization algorithms for robot kinematic design[J]. Journal of Robotic Systems, 1995, 12(6): 453-463.
- [37] Selig J M. Geometric fundamentals of robotics[M]. New York: Springer, 2005.
- [38] Selig J M. Lie groups and lie algebras in robotics[M]//Computational Noncommutative Algebra and Applications. Dordrecht: Springer, Dordrecht, 2004: 101-125.
- [39] He R, Zhao Y, Yang S, et al. Kinematic-parameter identification for serial-robot calibration based on POE formula[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(3): 411-423.

- [40] He R B, Li X W, Shi T L, et al. A kinematic calibration method based on the product of exponentials formula for serial robot using position measurements[J]. *Robotica*, 2015, 33(6): 1295–1313.
- [41] 何锐波. 基于指数积公式的串联机构运动学标定方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [42] 陈根良. 操作机构尺寸与变形误差传递的统一建模方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [43] Qiao Y, Chen Y P, Yang J X, et al. A five-axis geometric errors calibration model based on the common perpendicular line (CPL) transformation using the product of exponentials (POE) formula[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 118: 49–60.
- [44] Qiao Y, Chen Y P, Chen B, et al. A novel calibration method for multi-robots system utilizing calibration model without nominal kinematic parameters[J]. *Precision Engineering*, 2017, 50: 211–221.
- [45] 白海龙. 基于POE方法的工业机器人运动学标定研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [46] 谷乐丰. 工业机器人自标定方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院宁波材料技术与工程研究所), 2020.
- [47] 王翼丰. Ethercat 工业机器人参数辨识与鲁棒性控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [48] 汪岳. 柔性关节机器人建模与学习控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [49] 涂骁. 基于动力学前馈的工业机器人运动控制关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [50] 屈艺丹. 工业机器人动力学参数辨识及软件系统开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [51] Jia J D, Zhang M L, Zang X Z, et al. Dynamic parameter identification for a manipulator with joint torque sensors based on an improved experimental design[J]. *Sensors*, 2019, 19(10): 2248.
- [52] 孙玉阳. 重载机器人动力学建模及前馈控制方法研究与实现[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [53] 田莉莉. 串联机器人动力学特性及结构优化设计研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [54] 陈友东, 胡澜晓. 工业机器人负载动力学参数辨识方法[J]. *机器人*, 2020, 42(3): 325–335.
- [55] Fu Z T, Pan J B, Spyrakos-Papastavridis E, et al. A lie-theory-based dynamic parameter identification methodology for serial manipulators[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 26(5): 2688–2699.
- [56] 赵帅. 六自由度工业机器人动力学参数辨识与控制系统设计[D]. 湖州: 浙江工业大学, 2020.
- [57] 胡智宇. 基于冲击最优的弧焊机器人轨迹规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [58] 吴晓敏. 六轴工业机器人控制器设计与摩擦补偿研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- [59] 陈良波. 2自由度机器人转动关节 LuGre 摩擦模型参数辨识[D]. 泉州: 华侨大学, 2013.
- [60] 张明明. 柔性关节机械臂的位置控制及振动抑制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [61] 贺苗, 吴晓敏, 邵桂芳, 等. 基于RBFNN的机器人关节摩擦建模与补偿研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(11): 278–284.
- [62] 刘丽兰, 刘宏昭, 吴子英, 等. 机械系统中摩擦模型的研究进展[J]. *力学进展*, 2008(2): 201–213.
- [63] 陈健. 面向动态性能的工业机器人控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [64] Khorasani K. Nonlinear feedback control of flexible joint manipulators: A single link case study[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1990, 35(10): 1145–1149.
- [65] Bridges M M, Dawson D M. Redesign of robust controllers for rigid-link flexible-joint robotic manipulators actuated with harmonic drive gearing[J]. *IEEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 1995, 142(5): 508–514.
- [66] Ailon A, Gil M I, Choi E S, et al. Stabilizing robots with uncertain parameters actuated by DC motors with flexible coupling shafts[C]//*Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications*. Piscataway, NJ: IEEE, 1998, 2: 877–881.
- [67] 范纪华, 章定国. 基于变形场不同离散方法的柔性机器人动力学建模与仿真[J]. *力学学报*, 2016, 48(4): 843–856.
- [68] 方五益. 考虑较阻尼的柔性杆柔性铰机器人动力学研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [69] Borikov V N, Galtseva O V, Filippov G A. Method of noncontact calibration of the robotic ultrasonic tomograph[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 671(1): 012014.
- [70] Xu X H, Zhu D H, Zhang H Y, et al. TCP-based calibration in robot-assisted belt grinding of aero-engine blades using scanner measurements[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(1/2/3/4): 635–647.
- [71] 张国强. 工业机器人运动学参数与动态行为辨识技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [72] 马琛. 6轴关节型工业机器人平面圆度误差标定技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.

- [73] Guo Y X, Song B, Tang X Q, et al. A calibration method of non-contact R-test for error measurement of industrial robots[J]. *Measurement*, 2021, 173: 108365.
- [74] Wang R, Wu A W, Chen X, et al. A point and distance constraint based 6R robot calibration method through machine vision[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 65: 101959.
- [75] 王一. 面向测量的多关节运动机构误差模型及标定技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [76] Du G L, Shao H K, Chen Y J, et al. An online method for serial robot self-calibration with CMAC and UKF[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, 42: 39-48.
- [77] Gaudreault M, Joubair A, Bonev I A. Local and closed-loop calibration of an industrial serial robot using a new low-cost 3D measuring device[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 4312-4319.
- [78] 蔡煜野. 面向高精度应用的工业机器人系统误差建模与标定[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- [79] 谷乐丰. 工业机器人自标定方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院宁波材料技术与工程研究所), 2020.
- [80] 成世良. 基于拉线传感器的工业机器人标定系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [81] 洪伟松. 基于拉线编码器的工业机器人标定与测量系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [82] 朱煜. 基于拉线编码器的测量系统与机器人标定算法研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [83] 王坤. 工业机器人运动学参数标定及误差补偿研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [84] Tandirci M, Angeles J, Ranjbaran F. The characteristic point and the characteristic length of robotic manipulators[C]//International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Las Vegas, NV: American Society of Mechanical Engineers, 1992, 9396: 203-208.
- [85] Ma O, Angeles J. Optimum architecture design of platform manipulators[C]//Fifth International Conference on Advanced Robotics' Robots in Unstructured Environments. Piscataway, NJ: IEEE, 1991: 1130-1135.
- [86] Gosselin C M. Dexterity indices for planar and spatial robotic manipulators[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 1990: 650-655.
- [87] 张文静. 基于位移传感器的工业机器人运动学标定技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [88] Sun Y, Hollerbach J M. Observability index selection for robot calibration[C]//2008 IEEE international conference on robotics and automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 831-836.
- [89] 汤怀艳. 基于测量位形的工业机器人运动学标定研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [90] 杜亮. 六自由度工业机器人定位误差参数辨识及补偿方法的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [91] 熊刚. 机器人铣削加工的误差补偿和力控制方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [92] Wang H B, Gao T Q, Kinugawa J, et al. Finding measurement configurations for accurate robot calibration: Validation with a cable-driven robot[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(5): 1156-1169.
- [93] Gautier M, Poignet P. Extended Kalman filtering and weighted least squares dynamic identification of robot[J]. *Control Engineering Practice*, 2001, 9(12): 1361-1372.
- [94] Swevers J, Ganseman C, De Schutter J, et al. Experimental robot identification using optimised periodic trajectories[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1996, 10(5): 561-577.
- [95] 李博文. 大型工业机器人自动化装配定位误差标定与补偿[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [96] 高贯斌, 张石文, 那靖, 等. 基于标定和关节空间插值的工业机器人轨迹误差补偿[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(21): 55-67.
- [97] 覃志奎. 6自由度机器人位姿误差建模与补偿方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [98] 王琪. 柔性关节机器人参数辨识及轨迹跟踪控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- [99] 邓朋. 3-UPU 并联机构的运动学标定研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [100] 向启均. 改进模拟退火优化遗传算法的机器人动力学参数辨识[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [101] Jiang Z, Huang M, Tang X, et al. Observability index optimization of robot calibration based on multiple identification spaces[J]. *Autonomous Robots*, 2020, 44(6): 1029-1046.
- [102] 文科, 张加波, 乐毅, 等. 数控驱动的移动铣削机器人精度提升方法[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(5): 72-80.
- [103] Carriere G, Benoussaad M, Wagner V, et al. Off-line correction method suitable for a machining robot application to composite materials[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 110(9): 2361-2375.

- [104] Zhao G, Zhang P F, Ma G C, et al. System identification of the nonlinear residual errors of an industrial robot using massive measurements[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 59: 104-114.
- [105] 王毅. 大型构件机器人铣孔加工控制系统开发及加工误差分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [106] Jiang Y F, Huang X, Li S G. An on-line compensation method of a metrology-integrated robot system for high-precision assembly[J]. *Industrial Robot-The International Journal of Robotics Research and Application*, 2016, 46(3): 647-656.
- [107] 王龙飞. 飞机结构机器人自动制孔的误差补偿技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.

Research progress of industrial robot model-based error parameter calibration technology

CUI Zhengjie¹, LIU Houcai¹, KANG Huimin^{1*}, ZUO Guocai^{2*}, HU Shengqiao¹, LIU Zhicheng¹

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China
2. Hunan Software Vocational and Technical University, Xiangtan 411100, China

Abstract This paper reviews the research progress of model-based industrial robot error parameter calibration technology to improve the end-effector control accuracy, and summarizes the key problems when industrial robot is applied to high-precision machining and manufacturing, such as incomplete error parameters, high calibration cost and calibration accuracy. Moreover, the paper analyzes the modeling method of error parameter calibration model, end-effector's pose measurement technology, error parameter identification technology and error compensation technology. And the main difficulties of model-based error parameter model calibration technology in dealing with complex calibration tasks are discussed. Finally, aimed at some existing problems, a method to efficiently obtain and process the measured error data is proposed and a feasible development direction is also prospected.

Keywords industrial robot; error model; error parameter calibration; parameter measurement; parameter calibration; error compensation ●



(责任编辑 王志敏)