

DOI: 10.3901/JME.2023.17.001

工业机器人定位误差补偿技术研究进展^{*}

刘伟^{1,2} 刘顺^{1,2} 邓朝晖^{1,2} 葛吉民^{1,2}

(1. 湖南科技大学机电工程学院 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室 湘潭 411201)

摘要: 工业机器人在推进工业自动化、柔性化、智能化发展道路上起着举足轻重的作用。机器人定位误差是制约其在生产制造领域应用的关键因素之一,定位误差的大小直接决定其制造所得产品的质量和精度,而机器人误差补偿技术对提高机器人的定位精度具有重要意义。以工业机器人定位误差测量-预测-补偿为线索,详细综述了国内外学者在开环测量和闭环测量技术、基于模型的误差预测和基于非模型的误差预测方法、在线补偿和离线补偿技术的研究进展。最后,对该领域的发展趋势进行了展望,以期对工业机器人定位误差补偿研究提供一定参考。

关键词: 工业机器人; 定位误差; 测量; 预测; 补偿; 研究进展

中图分类号: TP242

Research Progress on Positioning Error Compensation Technology of Industrial Robot

LIU Wei^{1,2} LIU Shun^{1,2} DENG Zhao-hui^{1,2} GE JI-min^{1,2}

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-cut Material, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201;

2. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract: Industrial robots play an important role in promoting the development of industrial automation, flexibility and intelligence. The positioning error of robot is the key factor that hinders its application in the manufacturing field. The positioning accuracy of robot determines the quality and accuracy of the products. Error compensation technology is of great significance to improve the positioning accuracy of robots. Based on the clue of positioning error measurement-prediction-compensation, the research progress of open-loop measurement and closed-loop measurement technology, model-based error prediction and non-model-based error prediction methods, online compensation and offline compensation technology is summarized in detail. Finally, the development trends are prospected in order to provide reference for the research of positioning error compensation of industrial robot.

Key words: industrial robot; positioning error; measurement; prediction; compensation; research progress

0 前言

工业机器人在我国“智能制造2025”战略进程中有着举足轻重的地位,工业机器人是集自动化、高柔性、可控性等优点于一体的智能装备,已广泛应用于工业生产、航空航天、医疗、服务等领域^[1]。

工业机器人发展之初多应用于汽车制造领域,用于上下料、搬运、焊接和喷漆等定位精度要求不高的场合。随着计算机技术和控制技术的不断发展与进步,工业机器人应用范围逐渐延伸和扩大,逐步替代人工从事危险系数大、劳动强度高的工作,广泛应用于工业生产和自动化加工领域^[2-4]。相比于传统数控机床,工业机器人在铣削、磨削和钻削等机械加工领域具有操作灵活、加工成本低和加工区域大等明显优势;工业机器人可以适应复杂型面的加工,代替高端、昂贵且加工空间非常受限的数控机床,

^{*} 湖南省自然科学基金(2020JJ5178, 2021JJ50116, 2020JJ4024)和湖南省教育厅科学研究(20A202)资助项目。20220928 收到初稿, 20230424 收到修改稿

完成复杂的工业任务^[5], 有着广阔的应用前景。

工业机器人是由多关节和连杆组成的特殊悬臂式串联系统, 由于连杆弱刚性及各关节部件弱刚性综合作用导致机器人整体刚度低^[6-7], 微小的误差经过串联系统传递到末端将会导致较大的偏差, 使得末端定位精度变差^[8]。根据机器人自身结构因素和外部因素进行分类, 可将影响定位精度的因素分为几何误差(也称运动学参数误差)与非几何误差两大类^[9]。几何误差是由机器人各组成零部件制造误差、关节间隙、装配误差以及关节摩擦磨损等, 使得机器人实际的运动学参数值与机器人控制系统预设的理论值之间产生偏差, 由此导致的末端定位误差, 其值可达 2 mm 左右^[10]。非几何误差是指由机器人弱刚性和外部环境因素所导致的误差, 当外加负载较大的情况下(如磨削、钻削、铣削、大型工件装配等), 定位误差更大^[11]。图 1 给出了工业机器人定位误差影响因素分布图, 其中几何误差占 80% 左右^[12]。

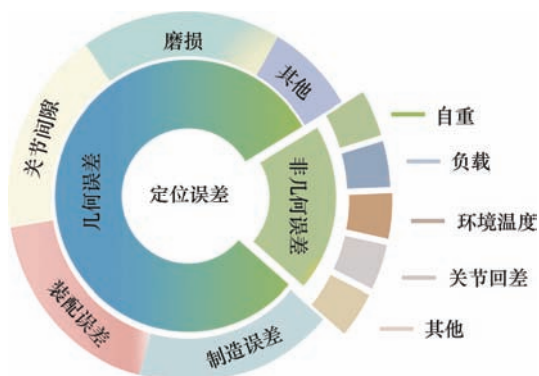


图 1 定位误差影响因素

工业机器人的定位精度低是其面向制造领域的痛点之一, 是制约机器人向高尖领域发展的关键因素, 因此必须对工业机器人定位误差进行补偿, 以满足生产要求。目前, 提高机器人末端定位精度的方法主要有硬件补偿和软件补偿^[13]。硬件补偿可达到相对较高的补偿效果, 但其成本昂贵, 应用较少, 一般用于机器人设计制造阶段。软件补偿方法成本低, 应用广泛, 国内外学者针对软件补偿方法进行了大量的研究。误差测量是误差补偿的前提, 通过高精度的测量设备可以直接获取机器人末端位姿^[14-21], 但高精度测量设备价格昂贵。为降低测量成本, 研究人员提出了多种闭环测量技术^[22-35], 以期在控制测量成本的同时实现准确地测量。定位误差预测是误差补偿的关键, 通过对误差模型^[36-49]进行参数辨识^[50-60]可对特定误差项导致的末端定位误差进行准确的预测, 但机器人末端误差是多因素综合的结果, 无法建立包含所有误差项的综合模型。

针对上述问题学者们基于误差相似性理论^[61-62], 提出了空间插值^[63-68]、神经网络^[69-75]等非模型预测方法, 能够准确预测末端定位误差。误差补偿是整个补偿过程的最后一步, 根据补偿的实时性可分为离线补偿和在线补偿两类。离线误差补偿^[76-83]在实际加工前对机器人误差进行预测计算, 修正机器人实际运行路径。离线补偿能够满足大多数工程的要求, 但其补偿精度受多因素综合影响, 且计算过程复杂、十分费时。在线误差补偿^[84-98]采用高精度测量装置或传感器获取机器人末端实时位姿信息, 通过控制系统对位姿进行实时修正。在线误差补偿的成本较高, 补偿效果取决于实时位姿测量精度以及测量系统与控制系统间的数据采集和传输频率。

本文将工业机器人定位误差补偿过程归纳为定位误差测量、定位误差预测以及定位误差补偿三个步骤。分析了工业机器人定位误差来源, 系统介绍了定位误差测量技术研究进展, 综述了定位误差预测和定位误差补偿关键技术及其应用。最后, 在总结国内外专家学者研究成果的基础上, 对工业机器人定位误差补偿领域发展方向做出了展望。

1 定位误差测量技术

机器人末端定位误差的测量是误差补偿的前提。通过一定的测量手段可以直接或间接的获取机器人在不同位姿下的定位误差, 定位误差的测量精度直接决定误差补偿的优劣。根据误差测量手段的不同可以将测量技术分为两类^[14]: 开环测量技术(直接测量)、闭环测量技术(间接测量)。

1.1 开环测量技术

开环测量技术是指通过高精度的外部测量装置来获取机器人末端实际位姿数据, 常用的外部测量装置有激光跟踪仪、激光扫描仪、三坐标测量仪、测量臂、拉线位移传感器等。根据测量原理的不同可以分为非接触式测量和接触式测量。

1.1.1 非接触式测量

非接触式测量设备属于光学精密测量设备, 如激光跟踪仪、激光扫描仪等, 利用光的反射原理实现远距离测量。

激光跟踪仪具有测量精度高、效率高、测量范围大、携带方便等特点, 是目前最常用的高精度测量设备。如图 2 所示为基于激光跟踪仪的机器人位姿测量系统, 由激光跟踪仪、控制器、反射靶标及测量附件等组成, 激光跟踪仪发射的激光束经反射靶标反射, 检测系统接收反射光束计算出靶标的坐

标数据^[15]。史晓佳等^[16]通过激光跟踪仪对机器人位置误差进行在线误差测量及补偿,对机器人进行两次迭代补偿后可使末端位置误差提升至 0.087 mm,姿态误差接近 0.01°。NUBIOLA 等^[17]在机器人末端安装了多个反射靶球,通过激光跟踪仪测量多个靶球来提高位姿测量结果的准确性。激光跟踪仪不仅能测量机器人静态位姿,也能测量动态位姿;但激光跟踪仪价格昂贵,对温度和噪声等因素敏感,对测量环境要求高。



图 2 基于激光跟踪仪的位姿测量系统^[15]

激光扫描仪能够获取高密度三维数据,适用于多种工况下的误差测量。XU 等^[18]通过激光扫描仪对安装在刀具中心点的标准球进行扫描实现了末端位姿的测量,如图 3 所示。通过激光扫描仪对带式磨削机器人定位误差进行测量和补偿,可使机器人绝对定位精度提升至重复定位精度水平。

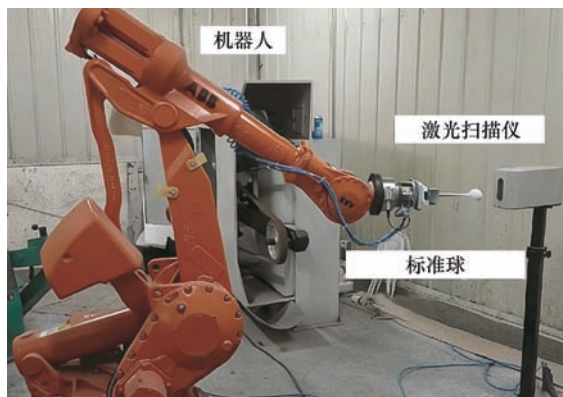


图 3 基于 TCP 的激光扫描仪测量系统^[18]

1.1.2 接触式测量

接触式测量设备通过探测传感器与测量空间轴线运动的配合,实现对被测目标点位置的获取,如三坐标测量仪、测量臂、拉线位移传感器、球杆仪等。三坐标测量仪是以三个方向移动的探测头对目标进行测量,测量精度高、性能稳定,但由于测量范围的限制,使其无法对机器人的整个工作空间进行测量,占地面积大且价格昂贵^[19]。与三坐标测量仪相比,关节测量臂精度略低,但其测量范围大、

性价比高且便携易用,已广泛应用于汽车制造、机加工等生产加工现场。

SELVA 等^[20]采用 ITG ROMER 测量臂测量工作空间为 0.6 m³ 的 ABB IRB 2000 工业机器人末端位置,校准后该机器人的平均定位精度由 1.4 mm 提高至 0.3 mm。三坐标测量仪和测量臂能够直接获取目标点三维坐标,而拉线位移传感器只能测量线性距离,但其价格较低、尺寸小巧、结构紧凑。GAN 等^[21]设计了一种低成本的基于拉绳位移传感器的位置测量系统。该测量系统主要由底座、四个拉绳位移传感器和机器人末端的万向节三部分组成,与激光跟踪仪等高精度测量设备相比精度较低,但成本大大降低。通过拉绳位移传感器的长度数据获得机器人末端到四个角点的距离,从而计算出被测点坐标,测量系统如图 4 所示。补偿后机器人平均定位误差由 3.841 3 mm 减小到 1.391 6 mm,定位精度提升了 63.77%。

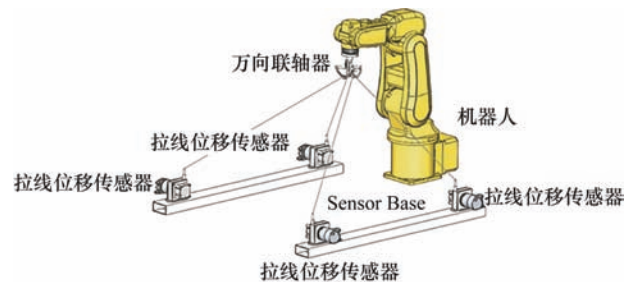


图 4 拉绳位移传感器位置测量系统^[21]

1.2 闭环测量技术

为降低测量成本,研究人员提出了不依赖高精度测量设备的闭环测量技术,主要有基于物理约束和基于视觉系统的两大类闭环测量技术。闭环测量技术在降低成本的同时又能达到较高的测量精度;但与开环测量相比,其参数辨识过程较为困难,且多数闭环测量技术比较耗时。

1.2.1 基于物理约束的闭环测量技术

基于物理约束的闭环测量技术主要思想是将机器人末端限制在特定位置或特定表面上^[22-27],如圆柱面、平面、标准球面等,然后使机器人以不同位姿接触约束目标,通过建立约束方程求解机器人实际位姿,最后与机器人的理论位姿进行比较,获取不同位姿下的定位误差值。此方法的主要优点是操作简单、成本低。

ZHONG 等^[22]提出了基于平面约束的机器人测量技术,通过固定在末端的接触探头分别与三个平面接触,记录各接触点的关节角度值,计算同一平面的两个向量的叉积得到平面法线方程,以编码器

中的实际关节角拟合出实际运动平面法向量, 以此对机器人定位误差进行测量。但以三个平面构造约束方程不能完全辨识所有运动学参数。BESNARD 等^[23]以四个正交平面构造约束方程实现了运动学参数的完全辨识, 对 PUMA 560 进行误差测量和校准后可使其定位精度提升至 0.57 mm。JOUBAIR 等^[24]以四个正交平面构造平面约束方程, 实现了对几何误差和非几何误差(连杆自重)的测量与校准, 其测量设备如图 5 所示。

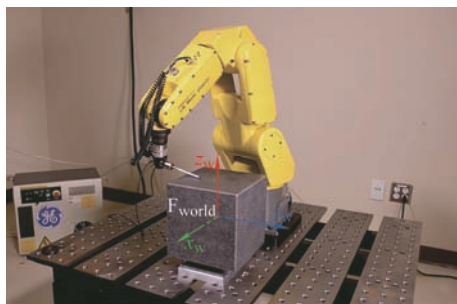


图 5 基于平面约束的测量装置^[24]

MEGGIOLARO 等^[25]提出了基于点约束的机器人位姿测量技术, 通过限制机器人末端使其处于固定一点, 并不断改变机器人位姿, 实现了一定范围内的位姿信息采集。然而, 基于单点约束的位姿测量技术采样范围太小, 使机器人定位误差补偿效果受限。谷乐丰等^[26]设计了一种可移动球杆的闭环测量装置, 该装置由两个标准球、位移传感器和光栅式测微仪组成, 如图 6 所示。以两个标准球为约束对象, 控制机器人探头在不同位姿下接触两个标准球, 以实际球心距与理论球心距的差值来建立约束方程, 以此来测量机器人末端定位误差, 能够在较大工作空间内实现末端定位误差的准确测量。

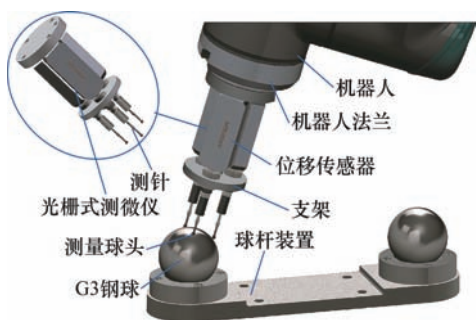


图 6 基于可移动球杆的闭环测量装置^[26]

陆艺等^[27]提出基于虚拟封闭尺寸链的机器人位姿测量技术, 测量原理如图 7 所示。在机器人末端安装激光设备, 将激光线分照射到约束线段两端, 以多组计算理论值与所测实际值构造封闭尺寸链, 实现对运动学参数的校准。此方法不需要借助高精

度的标准球或约束平面, 但需要借助激光发射装置建立约束尺寸链。

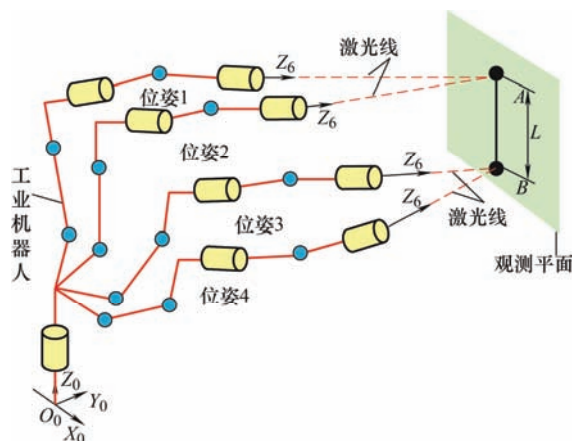


图 7 基于封闭尺寸链的测量技术^[27]

基于物理约束的闭环测量技术对实验条件要求较为苛刻, 约束平面、标准球等必须有很高加工精度, 位姿的获取相对复杂, 需要经过一定的计算和转换。其次, 机器人末端需要以低速到达多个被测目标点, 很难准确判断接触探头是否与约束目标点接触, 只能通过高灵敏度的末端传感器来判断。当末端接触探头到达或离开某被测点时, 机器人的惯性作用会对测量精度产生影响, 因此对机器人控制器的性能要求较高。

1.2.2 基于视觉系统的闭环测量技术

随着视觉技术的不断发展和计算机处理能力的提升, 基于相机的视觉系统开始应用于机器人位姿测量过程, 根据组成视觉系统相机的数量可分为单目视觉和立体视觉(双目视觉)^[28-29]。

解则晓等^[30]提出一种基于单目视觉和平面靶标的误差测量方法, 通过建立关节轴线方程, 实现了对机器人姿态误差的准确测量。KOU 等^[31]设计了一个单目视觉系统, 如图 8 所示, 采用针孔成像技术来识别机器人不同关节处的四个特征点的位置, 通过颜色阈值确定特征点的区域, 执行图像二值化、

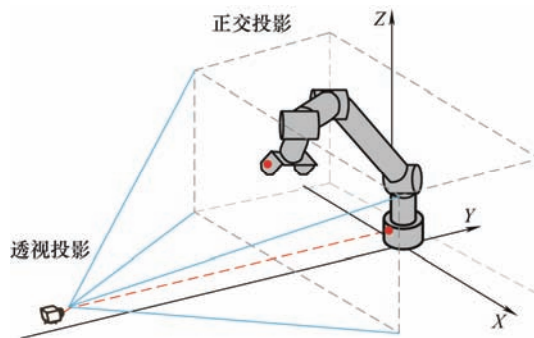


图 8 单目视觉系统的实验装置^[31]

化、噪声消除、区域填充和扩张等一系列图像处理和计算来确定机器人的姿态。此方法的图像处理和计算十分耗时。

WANG 等^[32]提出了一种基于点和距离约束的单目视觉闭环测量技术。以直径为 25.4 mm 的陶瓷球为视觉系统的约束目标, 如图 9 所示。调整摄像机位置使球心与相机光轴重合, 以摄像机中的球心坐标为目标函数建立点约束方程, 测量两个距离已知的标准球, 并分别记录关节角度, 建立距离约束方程, 通过标定提高了机器人的位置精度。

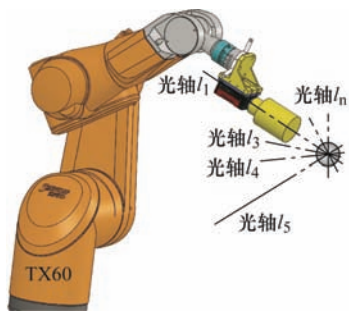


图 9 基于点约束的单目视觉测量系统^[32]

单目视觉系统结构简单, 校准计算速度快, 成本低; 但单目视觉系统测量区域较小, 很难使用拍摄的二维图像来准确的计算空间中点的三维坐标。立体视觉系统测量区域大, 通过图像处理可以直接获取目标的三维位置和方向信息, 测量精度高^[33]。ŠVACO 等^[34]设计了一个立体视觉系统对 KUKA 机器人进行标定, 使用两个固定在机器人末端且相互垂直的相机拍摄标准球, 来获取球心的空间坐标。ZHANG 等^[35]提出了一种机器人位姿自动校准方法, 位姿测量系统由平面靶标和双目摄像机组成, 通过工作空间配置与路径规划、标记点位姿估计和运动学参数识别, 实现了机器人自标定。

基于视觉系统的末端位姿测量方案所使用的测量设备既经济又方便, 但闭环测量过程中的参数识别过程很困难, 存在耗时或精度低等缺点; 其次需经过复杂的图像处理过程, 图像处理算法对测量精度有着直接的影响; 最后机器人配置空间受到了测量系统视野范围的限制。多相机、大范围测量将是未来研究的热点。

2 定位误差预测方法

2.1 基于模型的误差预测

基于模型的误差预测通过运动学建模、误差测量、参数辨识三步实现对机器人真实运动学参数的

辨识, 建立机器人末端位姿误差与几何误差间的映射关系, 从而获取目标位置的定位误差。

2.1.1 机器人运动学建模

工业机器人是由一系列由关节连接的多连杆机构组成。为了准确控制机器人进行作业, 需要建立机器人的运动学模型来描述工业机器人关节角度、连杆长度等运动学参数和末端执行器位姿的映射关系, 且运动学模型需要满足完整性、最小化和连续性要求^[36]。

D-H 模型是 DENAVIT 和 HARTENBERG 在 1955 年提出的一种描述任意运动链之间的空间关系的通用方法, 以关节角、连杆长度、连杆偏置、连杆扭转 4 个参数表示连杆间位姿关系, 是目前最经典的机器人运动学建模方法之一^[37-38]。D-H 模型只需四个参数即可描述相邻连杆坐标变换, 但完整的坐标系间的转换关系需要 6 个参数来描述, 因此 D-H 方法不足以实现完整的模型进行运动学标定。此外, 当相邻关节轴处于平行状态时, 微小角度变化可能会导致两轴的共垂线处剧烈变化, 这种变化可能导致机器人的奇异性, 从而导致运动学模型的不连续^[39]。针对 D-H 模型的不连续性问题, MD-H 模型通过引入一种坐标系变换来消除 D-H 模型的不完整性, 即增加一个绕 y 轴的旋转角来描述相邻平行关节轴之间的偏差^[40-41]。MD-H 模型虽然解决了关节轴线平行时的奇异性, 但在相邻关节轴线相互垂直时也会出现奇异状态, 不具备连续性^[42]。

为解决机器人运动学模型的不完整性与不连续性问题, 研究人员在 D-H 模型基础上进行了很多改进。STONE^[43]在 D-H 模型中添加了关节旋转偏移和关节平移偏移两个参数来建立运动学模型, 用 6 个参数来描述连杆坐标系之间的转换。与 D-H 模型相比, S 模型的建模过程更灵活, 连杆坐标系的原点任意布置, S 模型可以准确描述关节坐标系间的变换; 但没有改变 D-H 模型的不连续问题, 且 S 模型增加了额外的参数, 使模型变得复杂, 导致部分参数冗余。KAZEROUNIAN 等^[44]和赵艺兵等^[45]基于零位分析法, 以关节轴线方向矢量和机械臂连接矢量为参数建立了机器人的零参考模型。该模型可以更灵活地设置零位配置, 为机器人运动学模型的建立提供了一种有效的方法。CPC 模型^[46-47]也在 D-H 模型中增加了两个参数, 以三个参数描述关节轴的方向, 另三个参数描述坐标系原点的位置, 弥补了 D-H 模型的不完整和不连续。

CPC 模型也存在参数冗余,但由于关节参数和连杆参数是独立的,这些冗余参数在标定过程中很容易被消除。

在零参考模型的基础上,基于螺旋理论的指数积(Product of exponential, POE)模型^[48-49]得到发展和应用。与 D-H 模型相比,该方法分别考虑了关节零位误差和角度误差,只通过基坐标系和工具坐标系来描述运动学模型,大大简化了建模过程。高文斌等^[48]建立了六自由度串联机器人 POE 模型,通过运动学参数标定补偿机器人末端位姿误差。刘冠隆等^[49]基于 POE 模型对七自由度双臂机器人运动学误差分析,并利用 ADAMS 仿真验证了 POE 模型的准确性。POE 模型只需基坐标系和工具坐标系来描述运动学模型,通用性强,且便于计算机编程;尤其是当机器人自由度较高时,采用 POE 方法进行运动学建模更有效、更有条理。POE 模型需要 $6n$ 个参数表示运动旋量, n 个参数表示关节角参数,存在参数多、建模复杂的缺点。

结合以上对机器人运动学建模方法的分析,对各种建模方法进行比较,如表 1 所示。

表 1 不同运动学模型对比

模型	连续性	完整性	参数	复杂程度
D-H 模型	否	否	4	简单
MD-H 模型	是	是	5	一般
S 模型	否	是	6	复杂
零参考模型	是	是	6	复杂
CPC 模型	是	是	6	复杂
POE 模型	是	是	7	复杂

2.1.2 参数辨识方法

参数辨识是利用所测得的实际位姿确定误差模型参数的过程。工业机器人末端实际位姿与各运动学参数间存在非线性关系,不可能直接利用简单的几组数据求解出实际运动学参数,需要利用实验所采集的大量数据,按照某种算法寻找模型参数的最优解,利用所得参数误差对所建立的运动学模型进行修正或对误差进行补偿,以提高工业机器人的定位精度。其中常用的辨识方法有最小二乘法、模拟退火算法、最大似然估计、扩展卡尔曼滤波算法、改进遗传算法等^[50]。

最小二乘法是一种典型的数学优化方法,被广泛用于求解运动学误差模型。最小二乘法的思想是使理论值与观测值之间的误差平方和最小,通过拟合求解未知参数。通过忽略高阶误差项,将非线性问题变为线性问题。NUBIOLA 等^[17]建立了 ABB

工业机器人误差模型,采用最小二乘法对 25 个 M-DH 运动参数和 4 个刚度参数共包含 29 个参数的误差模型进行了辨识。张恩政等^[51]在最小二乘算法的基础上引入了 IGG3 权函数,使得实际测量误差波动较大的点在算法中的平差降低,从而提高了参数辨识的准确性和稳定性。最小二乘算法搜索能力强、计算速度快,但易陷入局部最优;且随着数据的增长,将出现所谓的“数据饱和”现象,计算成本变大。

针对最小二乘算法的不足,国内外学者对其进行进行了改进。其中 LM 算法结合了高斯-牛顿算法和梯度下降法的优势,通过阻尼因子对最小二乘算法进行改进,适用于求解非线性最小二乘问题,其优点是算法简单,求解速度更快。ZHU 等^[52]通过 LM 算法识别双臂串联机器人运动学参数误差,两机器人的平均定位误差均可降低 80% 以上。陈宵燕等^[53]提出步长变化因子与残余误差结合的改进 LM 算法(M-LM),通过调节函数下降速度,提高了算法的收敛速度以及辨识精度。LUO 等^[54]考虑了激光跟踪器的测量误差、坐标系转换误差等多误差因素的影响,采用 LM 和差分进化混合算法对误差模型进行辨识,标定后机器人的绝对定位精度提高了 73.6%。

扩展卡尔曼滤波(Extend Kalman filter, EKF)算法是一种高效的递推滤波算法,可用于解决观测数据中的噪声和干扰问题。OMODEI 等^[55]分别用最小二乘法、线性迭代算法和 EKF 算法对 SCARA 机器人进行运动学参数辨识,考虑噪声对标定系统的影响时, EKF 算法最有效。JIANG 等^[56]以 EKF 的标定值作为粒子滤波算法的先验值,再利用粒子滤波算法对机器人的运动学参数进行标定,解决了非线性和非高斯噪声引起的标定精度差的问题。

除了最小二乘、改进最小二乘、扩展卡尔曼滤波等传统算法外,遗传算法^[57-58]、粒子群优化算法^[59-60]等智能算法在处理复杂的非线性优化问题时有强大的优势,因此在机器人参数辨识过程中得到了广泛应用。遗传算法(GA)是一种模拟自然进化过程搜索最优解的方法,具有良好的全局寻优和自适应搜索能力。刘宇等^[57]通过改进遗传算法(GA)对机器人参数进行了辨识。WEST 等^[58]开发了一种遗传算法与神经网络结合的算法,来解决七自由度机器人关节的输出误差辨识问题,实现了对模型参数的精准估计。ALICI 等^[59]以粒子群优化算法识别机器人的运动学参数,提高了机器人的标定精度,并以实际轨迹验证了 PSO 辨识算法的有效性。为改善粒子群算法收敛速度慢的问题,刘飞等^[60]提出了

基于 BP 神经网络和粒子群算法的工业机器人参数辨识方法, 以 BP 神经网络搜寻粒子的收敛规律, 提高了粒子群算法的收敛速度和全局搜索能力。

基于模型的误差预测能够实现对几何误差的准确预测。然而, 在工业机器人的误差建模过程中, 将所有误差因素都考虑到几乎是不可能的, 若能建立机器人空间位姿与误差的映射关系, 那么便可以任意位姿下机器人定位误差进行预测和补偿。

2.2 基于非模型的误差预测

基于非模型的误差预测通过大量的测量来估计机器人的误差值, 不必对各误差因素逐一补偿, 且不依赖于复杂的运动学模型。基于非模型的误差预测是基于误差相似性理论^[61-62]而建立, 认为在空间某一邻域内机器人定位误差具有相似性, 因此可以通过已知点定位误差值对其邻域内的未知点的定位误差进行预测。ZENG 等^[61]定量分析了机器人位置误差的空间相似性, 基于误差相似性理论, 对位置误差进行了线性无偏最优估计。王龙飞等^[62]对机器人误差规律进行分析, 发现沿 x 、 y 、 z 三个方向的误差均具有空间相似性。非模型误差预测方法的思路为^[63-68]: 借助外界测量设备得到某些位姿点的误差数据, 通过函数拟合、空间插值、神经网络训练等方法建立工业机器人定位误差与关节角或理论位姿的映射关系, 从而实现整个工作空间的误差预测。

2.2.1 基于空间插值的误差预测

空间插值法是将机器人工作空间划分为离散区域或空间网格, 如图 10 所示^[63]。借助于外界测量设备测量机器人末端执行器在各个网格节点处的位置误差, 然后利用插值计算方法, 根据目标点周围相邻网格点的误差预测目标位置的误差^[64]。

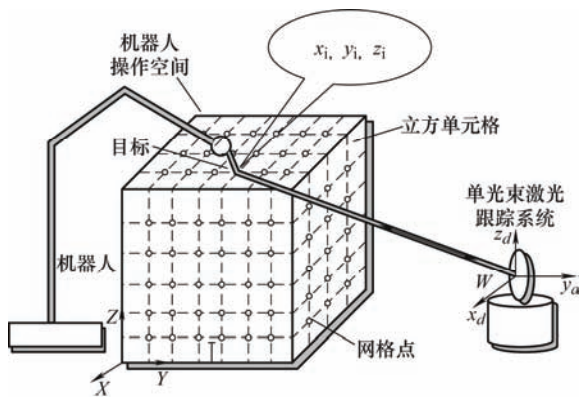


图 10 空间插值网格划分示意图^[63]

ALICI 等^[65]用徕卡 LT500 激光跟踪仪对样本点进行误差采集, 以傅里叶多项式等解析函数逼近期

望误差, 实现机器人工作空间内误差的预测。周炜等^[66]采用空间插值方法对定位误差进行补偿, 将机器人工作区域划分成若干空间网格并对立方体网格的 8 个顶点进行误差测量, 通过反距离加权法对目标点误差进行计算和补偿, 使机器人定位误差均值提升至 0.156 mm。在插值理论基础上, 线性最优无偏估计^[61]、双线性插值^[67]、近似度加权平均插值^[68]等空间插值方法得到广泛运用, 将误差值估计叠加到期望指令中, 即可实现机器人定位误差的补偿。

常用空间插值法只考虑网格顶点(采样点)对目标点误差的影响, 忽略了整体采样空间的影响; 而实际位置误差是随机分布的, 因此只适用于精度要求不高的标定场合。若要得到更加精确的结果, 则需减小所划分的网格, 这样会使采样点的数量呈几何倍数增加, 计算成本大大增加。为解决这一问题, BAI 等^[63]提出了一种新的模糊插值方法对机器人误差进行预测, 分别在三个维度上应用模糊误差插值方法, 以提高机器人定位误差在三维工作空间中的预测精度。利用模糊推理系统估计位置误差, 符合位置误差随机分布的特性, 系统如图 11 所示。

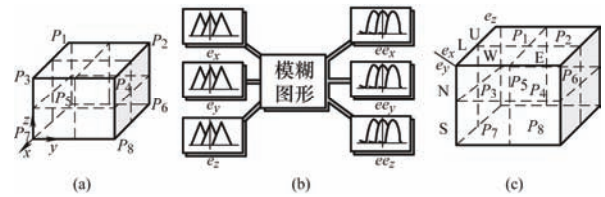


图 11 模糊插值推理系统^[63]

2.2.2 基于神经网络的误差预测

神经网络具有自我学习与更新的能力, 能够模拟某种客观存在的内在规律, 可以对定位误差进行预测和求解^[69-75]。基于神经网络的误差预测解决了误差建模时的繁琐与不确定性, 但前期需要采集大量的样本数据用于模型的训练, 且不同网络参数设置与训练方法存在差异, 从而使得预测精度存在差异。

WU 等^[69]提出用神经网络来标定具有两个转动自由度的关节机器人, 以前馈神经网络预测关节角误差, 并在控制系统中进行修正。NGUYEN 等^[70]提出将基于模型的运动学标定和基于人工神经网络的误差预测相结合的方法, 首先采用 EKF 算法对机器人几何参数进行误差建模, 再采用人工神经网络(ANN)对非几何误差进行预测, 以预测误差值对机器人进行补偿后, HH800 机器人定位精度由 4.065 4 mm 提高到 0.336 8 mm。

传统神经网络的性能严重依赖于输入数据,收敛速度慢且易引起局部极小值^[71]。针对上述问题,研究人员提出了许多方法对神经网络的结构进行优化,以实现定位误差的准确预测,如粒子群优化、教学与学习优化、遗传算法优化等。周炜等^[72]采用粒子群优化算法(PSO)对神经网络进行优化,通过优化初始权值和阈值避免了算法搜索时的局部极值,提高了机器人误差预测的准确性。周旭等^[73]将全梯度自适应粒子群(FGS-POS)优化的神经网络用于机器人定位误差预测,实现了定位误差的高精度预测。LE 等^[74]基于教与学的优化算法(TLBO)对神经网络的权值和偏差进行了优化,并在 HH800 机器人上进行了实验研究,补偿后机械手的位置精度得到了显著提高。WANG 等^[75]提出了一种基于深度置信网络(DBN)和误差相似度的工业机器人位姿误差预测模型,如图 12 所示:采用并行双 DBN 作为特征提取器,以机器人的理论位姿坐标和实际位姿误差为样本,采用粒子群算法(PSO)对 DBN 的结构和参数进

行优化,实现了误差预测。

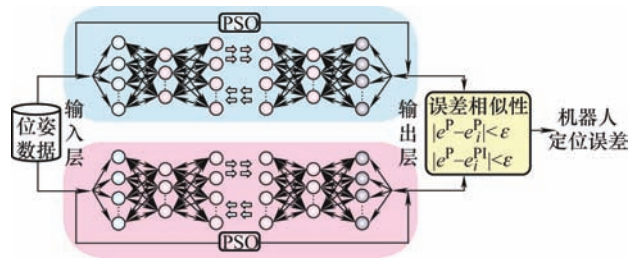


图 12 基于 DBN 和误差相似度的位姿误差预测模型^[75]

基于模型和基于非模型的误差预测方法总结见表 2。定位误差预测的准确性是机器人定位误差补偿的先决条件。基于模型的误差预测方法由于其低计算成本、快速收敛和对误差源的特定性而具有许多优势,但并非所有误差源都能被正确、完整地建模;基于非模型的误差预测方法不需要对误差源进行深入探究,只考虑各误差因素综合作用的结果,能够准确预测机器人定位误差。

表 2 机器人定位误差预测方法对比

预测方法	基于模型的误差预测	基于非模型的误差预测
预测步骤	建模—测量—参数辨识	测量—插值拟合/神经网络训练
误差因素	几何误差	几何误差与非几何误差
优缺点	成本低,精度较高;受模型精度影响较大,建模复杂	考虑所有误差因素,不需要建立复杂的误差模型;需对工作空间内位姿点进行大量测量

3 定位误差补偿措施

机器人位姿测量技术和定位误差预测是提升机器人定位精度的前提,误差补偿则是提升机器人定位精度的关键。根据补偿措施的实时性可分为离线补偿和在线补偿两类。

3.1 离线误差补偿

离线误差补偿可以分为运动学参数标定法、摄动法和智能预测补偿法。运动学参数标定法是对控制器中运动学模型的修正,具有全局通用性。摄动法是预设一个关节空间补偿量,该补偿量作用下的末端偏差与机器人原本的定位误差相互抵消,适用于局部操作空间或指定工作轨迹下的机器人定位误差补偿。而智能预测补偿法以神经网络、极限学习等智能算法对机器人到达理论位姿时的实际关节角度进行预测,使机器人控制系统运行预测关节角度值,从而实现定位误差补偿。

3.1.1 运动学参数标定法

运动学参数标定是通过以上两节所述的位姿测

量^[14-35]、误差建模^[36-49]、参数辨识^[50-60],辨识出实际运动学参数值,对机器人控制器中所设定的机器人参数进行修正,以补偿机器人几何因素造成的误差。运动学参数标定需要开放控制器底层权限,对控制器中的机器人模型理论参数进行相对应的修改。此方法通用性强,能够准确地实现对机器人全空间的补偿。齐飞等^[76]以最小二乘法对误差模型辨识出实际的 D-H 参数,通过自主研发的控制系统对运动学参数的修正,实现了几何误差的补偿。然而机器人控制器权限一般不对用户开放,此方法不具备普适性。

3.1.2 摄动法

摄动法通过对机器人各关节预设一个角度补偿值,在补偿角的作用下使机器人产生位姿偏差来抵消机器人的实际误差,从而实现误差补偿效果^[39]。根据误差补偿次数分为直接补偿法和迭代补偿法。

(1) 直接补偿法(单次补偿)。

在离线误差补偿研究过程中,大多数学者利用所获取的误差值进行逆运动学求解,对各关节角度误差进行直接补偿。

直接补偿法原理如图 13 所示^[77-78], 机器人末端执行器欲到达理论位姿 x 处, 由于机器人误差量 Δx 的存在只能到达 $x - \Delta x$ 处。当以 Δx 为补偿量对机器人进行补偿, 由于理论运动学参数存在偏差, 通过逆运动学求解补偿量 Δx 对应的关节变量仍存在偏差。以补偿后的关节变量驱动机器人, 其末端位姿只能到达 x 处, 补偿量 Δx 仍会造成 Δ 的误差。该方法忽略了补偿值与定位误差的非线性关系, 不能完成对所有误差量的补偿。韩哈斯额尔敦等^[77]以激光跟踪仪测量光学加工机器人的位置误差, 以测量的误差值对 K9 平面镜磨抛过程的加工点位进行补偿, 补偿后的磨抛余量误差可降低 50%。

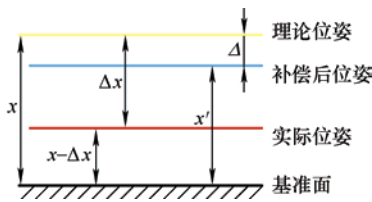


图 13 直接补偿法

(2) 迭代补偿法。

迭代补偿法是在直接补偿法的基础上多次进行误差补偿, 原理如图 14 所示。通过多次迭代将上一轮迭代的误差余量 Δx_i 进行补偿, 当误差余量 Δx_n 满足实际生产需求 ($\Delta x_n < \varepsilon$) 或达到迭代次数后迭代停止^[79]。

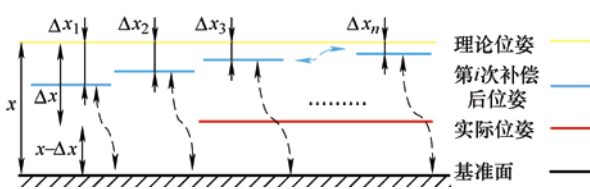


图 14 迭代补偿法

齐俊德等^[80]通过迭代算法对机器人的几何误差和关节柔度误差进行了补偿, 使机器人平均位置精度提升至 0.158 mm。随着迭代次数的增加, 定位误差随之减小, 迭代次数的多少将决定补偿效果的优劣。WU 等^[81]基于柔度误差模型对焊接机器人进行了迭代补偿方法, 有效提高了机器人在船体焊接时的轨迹精度。机器人定位精度并不是随迭代次数的增加而成线性增加。若要实现较好的迭代补偿效果, 需在每次迭代结束后, 对运动学参数进行更新, 以新的运动学参数进行下一轮迭代, 但此过程计算量大, 计算成本也随之增加。

3.1.3 智能预测补偿法

通过神经网络、极限学习等智能算法对机器人到达理论位姿时的实际关节角度进行预测, 使机器

人到达补偿位姿时其实际位姿与理论位姿重合, 从而实现末端定位误差的补偿, 如图 15 所示^[82-83]。

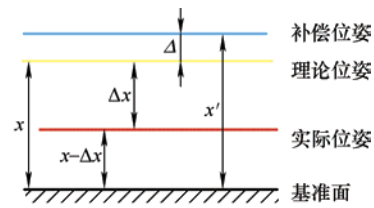
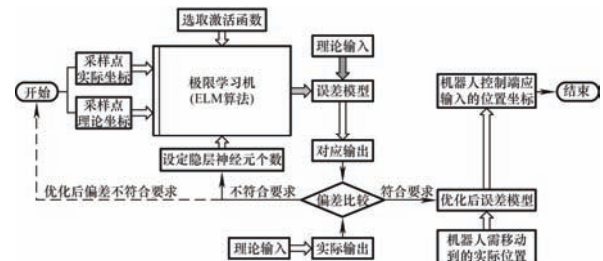


图 15 智能预测补偿法

王龙飞等^[82]提出应用极限学习机 (Extreme learning machine, ELM) 算法的定位误差补偿方法, 流程如图 16 所示, 以末端理论坐标值为输入、实际坐标值为输出建立映射, 以实际位姿代替理论位姿, 实现了定位误差的补偿, 机器人平均位置误差由 0.41 mm 降低至 0.20 mm, 将 ELM 方法应用于飞机结构件钻孔, 孔位置和法向误差减小至 0.25 mm、0.17°, 极大地提高了机器人制孔精度。陈杰等^[83]构建了基于 BP 神经网络的位姿预测模型, 以理论位置和姿态为输入, 预测位置和姿态为输出, 对位置和姿态分别进行训练, 补偿后可使机器人定位精度提升 61.5%。通过智能算法对欲到达的理论位姿对应的实际位姿进行预测, 不需要复杂的迭代计算过程, 能实现良好的预测效果。

图 16 基于 ELM 算法的机器人离线误差补偿流程^[82]

3.2 在线误差补偿

在线误差补偿通过高精度测量装置或传感器直接或间接地获取机器人末端实时位姿信息, 在控制系统中计算定位误差并进行修正^[84-85]。在线补偿集成力感知或末端位姿感知以及信号处理系统, 环境适应性强, 但与离线补偿相比成本高。根据末端位姿误差获取方式的不同可分为基于力传感器的在线误差补偿和基于位姿测量的在线误差补偿两类。

3.2.1 基于力传感器的在线误差补偿

通过安装在机器人末端的力反馈装置可实时获取机器人末端力/力矩信息, 接着根据所建立的机器人刚度模型^[86-87]能够实现力与误差的映射; 然后将所测力/力矩实时反馈到机器人控制系统, 从而实现定位误差的预测; 最后通过运动学逆模型求解关节

偏差补偿值, 实时补偿下一个目标位置, 补偿流程如图 17 所示。PAN 等^[88]在机器人手腕上安装了一个 6 自由度力/力矩传感器, 基于机器人刚度模型, 在线计算末端受力引起的机器人变形, 并相应更新机器人控制器的关节角度, 实现了隐式力/位混合控制的机器人误差补偿。魏得权等^[89]基于机器人平均铣削力与切深的预测模型, 建立了单一铣削力的前馈式定位误差实时补偿系统, 并通过恒切深和变切深实验对补偿效果进行了验证。CEN 等^[90]提出基于铣削力的在线闭环位置反馈策略, 将无线力传感与铣削力模型相结合, 以提高机器人铣削时的定位精度。

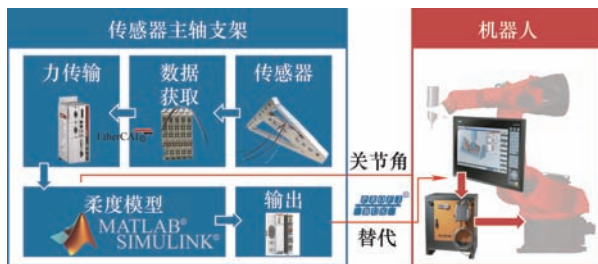


图 17 基于力反馈的误差补偿^[86]

基于力传感器的在线误差补偿高度依赖刚度模型的准确性, 需先通过实验确定机器人在关节空间的刚度矩阵。但机器人在运动过程中尤其是末端受力变化的情况下, 刚度矩阵是时变的, 因此需要实时计算刚度矩阵以获得较好的补偿精度。

3.2.2 基于位姿测量的在线误差补偿

基于末端位姿的在线误差补偿是指通过激光跟踪仪、IGPS、视觉系统等测量设备实时获取机器人末端的位姿信息, 通过控制实时位姿实现定位误差的在线补偿。

POSADA 等^[91]对比了基于模型的误差补偿和基于激光跟踪仪在线误差补偿的补偿效果, 虽然这两种方法都提高了机器人的绝对定位精度, 但基于激光跟踪仪的在线补偿精度优于基于模型的补偿精度。MOLLER 等^[92]通过开发的 UCI-APP 实现了机器人控制系统(西门子 Sinumerik 840D sl)和徕卡激光跟踪仪之间的通信, 分别以 3DOF 位置反馈控制器和 6DOF 位姿反馈控制器实现了在线误差补偿。激光跟踪仪和控制系统间的数据传输系统如图 18 所示, UCI 应用程序每 8 ms 向激光跟踪器发送一个高精度触发信号以获取机器人末端实时位姿数据, 以实现实时的位姿反馈。对比 3DOF 位置反馈控制和 6DOF 位姿反馈控制补偿效果, 机器人最大位置误差可分别降低至 0.12 mm 和 0.07 mm。WANG

等^[93]利用 3DOF 激光跟踪仪对钻削和铣削进行在线位置补偿, 实验结果表明对于工况相对稳定时补偿效果较好; 但在铣削凹槽过程中, 由于拐角处轨迹的突变使得铣削力增大, 此时补偿效果变差, 加工的零件未达到精度要求。通过增加速度控制回路, 降低轨迹突变时机器人进给速度, 使控制系统有足够的时间补偿机器人误差, 定位误差得到一定程度的改善, 但并不能完全消除。

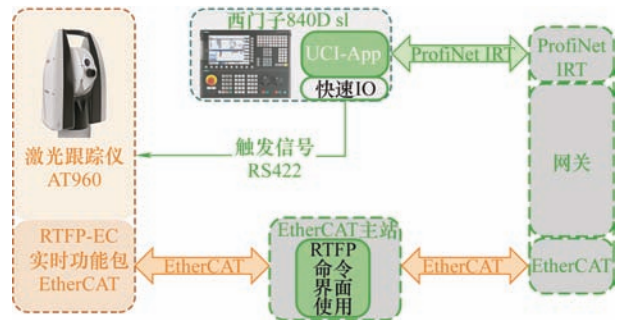


图 18 系统实时通讯及信号传递流程^[92]

MOSQUEIRA 等^[94]提出了基于 IGPS 反馈系统的定位误差在线补偿策略, 通过自适应控制系统将 IGPS 集成到机器人控制回路中, 提高了 KUKA 重型工业机器人在大型飞机结构部件组装过程中的定位精度。PORATH 等^[95]针对 Stewart 平台提出了一种基于 IGPS 的运动学标定方法和在线校正技术, 以 5 个激光发射器实现了 6 自由度的测量, 开发了实时控制应用程序, 实时评估末端姿势并驱动 Stewart 平台的六个连杆校正姿势偏差。与激光跟踪仪相比, IGPS 测量精度较低, 只能达到 0.3 mm; 但 IGPS 测量范围大, 在同一个参考坐标系中可同时跟踪多个机器人, 特别适用于多机器人协作作业^[96]。

张华等^[97]提出基于双目立体视觉的机器人自定位方法, 基于连续图像序列的特征跟踪, 采用改进 RANSAC 算法优化特征匹配, 并通过高斯牛顿迭代计算机器人实际位姿, 实现了机器人末端定位误差的精确补偿。为实现机器人在连续轨迹上的准确定位, SHU 等^[98]提出了一种基于视觉伺服的机器人动态跟踪补偿方案, 利用 C-track 780 双目测量系统进行动态路径实时补偿, 发现机器人在直线轨迹和圆形轨迹运行时能达到较好的补偿效果。

激光跟踪仪和立体视觉系统均可实现动态测量。激光跟踪仪、激光扫描仪等高精度测量的测量设备价格昂贵; 视觉系统成本相对较低, 但测量精度不如激光跟踪仪, 应进一步研究提高视觉系统的

测量精度。

离线误差补偿与在线误差补偿各有优势及应用范围，表 3 对两种误差补偿措施进行了对比。离线误差补偿可以提高机器人局部操作空间或指定运行轨迹的定位精度，可以显著提高机器人的静态精度，补偿成本低。但由于某些实际加工过程中误差因素的复杂性和时变性，这种情况下离线补偿不足以满足生产加工要求，且补偿前的误差预测过程使加工

周期增加了一倍。在线误差补偿通过实时的测量反馈能够很好地弥补离线补偿的局限性，不需要对每个误差源的影响进行建模，补偿精度高。但在线误差补偿需要安装昂贵的测量设备，搭建实时通讯系统，对测量设备的采样频率和测量精度有较高的要求，测量系统需要与控制系统有着相同或更高的测量频率，以便控制系统能够实时获得机器人末端位姿数据。

表 3 离线补偿与在线补偿技术对比

补偿方法	离线补偿	在线补偿
适用范围	静态或准静态补偿	动态补偿
优点	成本低，需要进行大量的测量，能够满足大多数工程的要求	通过外部反馈实时补偿，不需要复杂的建模过程，补偿精度高，通用性强
缺点	建模过程复杂，补偿精度受多因素综合影响，加工周期增加了一倍	对测量设备的采样频率和测量精度要求高，需要搭建测量设备与控制系统间的实时通信系统，成本昂贵

4 结论

工业机器人定位误差补偿技术是提高机器人定位精度以及推进机器人向高端制造业发展的关键。本文论述了国内外学者在工业机器人误差补偿方面取得的研究成果，系统综述了机器人补偿过程中误差测量、误差预测和误差补偿技术的研究进展。近年来，在研究人员的共同努力下，机器人定位误差补偿技术取得了显著的提高。然而，随着工业自动化不断发展和产品加工质量的更高要求，对机器人定位精度提出了更高的要求，机器人定位误差补偿技术需要进一步的研究和探讨。

(1) 机器人定位误差是多因素综合影响的结果，而研究人员对误差模型的建立仅考虑单因素的影响，从而导致基于误差模型预测的末端定位误差存在很大的偏差，误差预测偏差使得补偿结果达不到理想状态。建立囊括多因素的误差模型，实现定位误差的精准预测值得深入探讨。

(2) 机器人定位误差具有空间随机性，在不同位姿下的测量结果不同。离线误差补偿过程中，由于测量成本的限制，只能保证对机器人局部工作空间或指定轨迹误差预测和补偿的准确性。神经网络、深度学习等智能算法的兴起为全空间的误差预测提供了可能，进一步探讨机器人在全空间内的定位误差不确定性分布规律，能够有效地提高测量效率、降低测量成本。

(3) 在线补偿过程中需要高动态的三维测量设备，目前的在线测量设备不能在变速、变轨迹等工况突变的情况实现高频、快速反馈，使得机器人在

定位误差存在急剧变化时得不到很好的补偿。因此，如何提高测量设备的采样频率，实现测量系统与机器人控制系统信息快速传输，是机器人在线误差补偿技术进一步发展的关键。

(4) 基于动态测量设备，开发结合神经网络、深度学习等智能算法的在线误差补偿系统，实现机器人姿态在线自适应调整，是未来机器人定位误差补偿技术的突破方向。

参 考 文 献

[1] 高峰, 郭为忠. 中国机器人的发展战略思考[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 1-5.
GAO Feng, GUO Weizhong. Thinking of the development strategy of robots in China[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 1-5.

[2] 晁永生, 刘海江. 白车身焊接机器人加工路径优化和仿真[J]. 中国机械工程, 2010, 21(4): 442-445.
CHAO Yongsheng, LIU Haijiang. Welding robot path optimization and simulation for body in white[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(4): 442-445.

[3] IGLESIAS I, SEBASTIÁN MA, ARES JE. Overview of the state of robotic machining: current situation and future potential[J]. Procedia Engineering, 2015, 132: 911-917.

[4] MICHALOS G, KOUSI N, KARAGIANNIS P, et al. Seamless human robot collaborative assembly-an automotive case study[J]. Mechatronics, 2018, 55: 194-211.

[5] ZHU Z, TANG X, CHEN C, et al. High precision and efficiency robotic milling of complex parts: Challenges, approaches and trends[J]. Chinese Journal of Aeronautics,

- 2021, 35(2): 22-46
- [6] CVITANIC T, NGUYEN V, MELKOTE S N. Pose optimization in robotic machining using static and dynamic stiffness models[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 66(4): 101992.
- [7] 关立文, 陈志雄, 刘春, 等. 钻铆机器人静刚度建模及优化[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(9): 965-971.
- GUAN Liwen, CHEN Zhixiong, LIU Chun, et al. Static stiffness modeling for optimizing drilling and riveting robots[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2021, 61(9): 965-971.
- [8] BU Y, LIAO W, TIAN W, et al. Stiffness analysis and optimization in robotic drilling application[J]. *Precision Engineering*, 2017, 49: 388-400.
- [9] CHEN X, ZHANG Q, SUN Y. Non-kinematic calibration of industrial robots using a rigid-flexible coupling error model and a full pose measurement method[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 57: 46-58.
- [10] 尹仕斌. 工业机器人定位误差分级补偿与精度维护方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- YIN Shibin. Research on the graded calibration and accuracy maintenance technique for industrial robot[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [11] XIONG G, DING Y, ZHU L. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 55: 19-28.
- [12] WU Y, KLIMCHIK A, CARO S, 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.
- [13] 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, 546(18): 2180-2188.
- WU Jinhui, TAO Yourui. Review on research status of positioning accuracy reliability of industrial robot[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 546(18): 2180-2188.
- [14] 董慧颖, 李文广. 一种基于平面精度的机器人标定方法及仿真[J]. *中国机械工程*, 2011, 329(17): 2039-2042.
- DONG Huiying, LI Wenguang. Robot calibration based on planar precision[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 329(17): 2039-2042.
- [15] 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.
- CHEN Xiaoyan. Research on multi-mode calibration and rigid-flexible coupling error compensation method for industrial robot[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- [16] 史晓佳, 张福民, 曲兴华, 等. KUKA 工业机器人位姿测量与在线误差补偿[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(8): 1-7.
- SHI Xiaojia, ZHANG Fumin, QU Xinghua, et al. Position and attitude measurement and online errors compensation for KUKA industrial robots[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(8): 1-7.
- [17] NUBIOLA A, BONEV I A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(1): 236-245.
- [18] XU X, ZHU D, 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*, 2016, 90: 635-647.
- [19] 唐宇存, 李锦忠, 林安迪, 等. 基于三坐标测量机的机器人位姿精度检测方法[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(5): 257-262.
- TANG Yucun, LI Jinzhong, LIN Andi, et al. Method for measuring robot pose accuracy based on coordinate measuring machine[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(5): 257-262.
- [20] SELVA G L, MOTTA J. Theoretical and practical aspects of robot calibration with experimental verification[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2011, 33(1): 15-21.
- [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): 1-9.
- [22] ZHONG X L, LEWIS J M. A new method for autonomous robot calibration[C]// *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Nagoya, Aichi, Japan: IEEE, 1995: 1790-1795.
- [23] BESNARD S, KHALIL W, GARCIA G. *Advances in robot kinematics*[M]. Netherlands: Springer, 2000.
- [24] JOUBAIR A, BONEV I A. Non-kinematic calibration of a six-axis serial robot using planar constraints[J]. *Precision Engineering*, 2015, 40: 325-333.
- [25] MEGGIOLARO M A, SCRIFIGNANO G, DUBOWSKY S. Manipulator calibration using a single endpoint contact constraint[C]// *American Society of Mechanical Engineers. Proceedings of the 26th Biennial Mechanisms And Robotics Conference*. New York:

- ASME, 2000: 759-767.
- [26] 谷乐丰, 杨桂林, 方灶军, 等. 一种新型机器人自标定装置及其算法[J]. 机器人, 2020, 42(1): 100-109.
- GU Lefeng, YANG Guilin, FANG Zaojun, et al. The calibration algorithms for industrial robots based on a novel self-calibration device[J]. Robot, 2020, 42(1): 100-109.
- [27] 陆艺, 于丽梅, 郭斌. 基于封闭尺寸链的工业机器人结构参数标定[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 38-46.
- LU Yi, YU Limei, GUO Bin. Calibration of industrial robot structure parameters based on closed dimensional chain[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 38-46.
- [28] HAYAT A A, BOBY R A, SAHA S K. A geometric approach for kinematic identification of an industrial robot using a monocular camera[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 57: 329-346.
- [29] 郑继贵, 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.
- ZHU Jigui, ZHANG Nannan, REN Yongjie, et al. In-line thermal compensation of industrial robots based on binocular stereo vision[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(9): 2139-2149.
- [30] 解则晓, 辛少辉, 李绪勇, 等. 基于单目视觉的机器人标定方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 35-39.
- XIE Zexiao, XIN Shaohui, LI Xuyong, et al. Method of robot calibration based on monocular vision[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5): 35-39.
- [31] KUO Y, LIU B, WU C. Pose determination of a robot manipulator based on monocular vision[J]. IEEE Access, 2016, 4: 8454-8464.
- [32] WANG R, WU A, 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: 101959-101965.
- [33] JIANG T, CUI H, CHENG X. A calibration strategy for vision-guided robot assembly system of large cabin[J]. Measurement, 2020, 163(1): 107991-108000.
- [34] ŠVACO M, ŠEKORANJA B, ŠULIGOJ F, et al. Calibration of an industrial robot using a stereo vision system[J]. Procedia Engineering, 2014, 69: 459-463.
- [35] ZHANG X, SONG Y, YANG Y, et al. Stereo vision based autonomous robot calibration[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 93: 43-51.
- [36] KLAUS S, STEPHEN L A, MICHAEL G. Complete, minimal and model-continuous kinematic models for robot calibration[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 1997, 13(1): 73-85.
- [37] DENAVIT J, HARTENBERG R S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms[J]. Trans. of the Asme, Journal of Applied Mechanics, 1955, 22: 215-221.
- [38] GAO G, SUN G, JKIANG N, et al. Structural parameter identification for 6 DOF industrial robots[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 113: 145-155.
- [39] 周煦武. 六自由度串联机器人静态位姿误差及其补偿研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.
- ZHOU Xuwu. Research on static pose error and compensation of six degrees of freedom serial robot[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019.
- [40] 郭瑞峰, 彭光宇, 杨柳, 等. 基于 MD-H 模型的新型混联码垛机器人运动学分析与仿真[J]. 机械传动, 2017, 41(2): 122-127.
- GUO Ruifeng, PENG Guangyu, YANG Liu, et al. Kinematics analysis and simulation of a new type of hybrid palletizing robot based on MD-H model[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 41(2): 122-127.
- [41] XIE Z, ZONG P, YAO P, et al. Calibration of 6-DOF industrial robots based on line structured light[J]. Optik, 2019, 183: 1166-1178.
- [42] LI Z, LI S, LUO X. An overview of calibration technology of industrial robots[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(1): 23-36.
- [43] STONE H, SANDERSON A. A prototype arm signature identification system[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Raleigh. Raleigh, NC, USA. 1987: 175-182.
- [44] KAZEROUNIAN K, QIAN G Z. Kinematic calibration of robotic manipulators[J]. Journal of Mechanical Design, 1989, 111(4): 482-487.
- [45] 赵艺兵, 温秀兰, 康传帅, 等. 零参考模型用于工业机器人定位精度提升研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 76-84.
- ZHAO Yibing, WEN Xiulan, KANG Chuanshuai, et al. Research on improvement of industry robot positioning accuracy based on ZRM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 76-84.
- [46] ZHUANG H, ROTH Z S, HAMANO F. A complete and parametrically continuous kinematic model for robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 8(4): 451-463.
- [47] 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.
- ZHANG Xu, ZHENG Zelong, QI Yong. Parameter identification and calibration of D-H model for 6-DOF serial robots[J]. Robot, 2016, 38(3): 360-370.
- [48] 高文斌, 王洪光, 姜勇. 一种基于指数积的串联机器人标定方法[J]. 机器人, 2013, 35(2): 156-161.
- GAO Wenbin, WANG Hongguang, JIANG Yong. A calibration method for serial robots based on POE formula[J]. Robot, 2013, 35(2): 156-161.
- [49] 刘冠隆, 贺晓莹, 高兴宇, 等. 七自由度双臂机器人旋量理论正向运动学与工作空间分析[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(5): 704-712.
- LIU Guanlong, HE Xiaoying, GAO Xingyu, et al. Forward kinematics and workspace analysis of screw theory of seven-DOF dual-arm robot[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(5): 704-712.
- [50] URREA C, PASCAL J. Design, simulation, comparison and evaluation of parameter identification methods for an industrial robot[J]. Computers and Electrical Engineering, 2018, 67: 791-806.
- [51] 张恩政, 唐宁敏, 陈刚, 等. 基于改进 IGG3 权函数距离误差模型的工业机器人标定[J]. 中国机械工程, 2021, 56(13): 1539-1546.
- ZHANG Enzheng, TANG Ningmin, CHEN Gang, et al. Industrial robot calibration based on improved IGG3 weight function of distance error model[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 56(13): 1539-1546.
- [52] ZHU Q, XIE X, CHAO L, et al. Kinematic self-calibration method for dual-manipulators based on optical axis constraint[J]. IEEE Access, 2018, 7: 7768-7782.
- [53] 陈宵燕, 张秋菊, 孙沂琳. 串联机器人多模式标定与刚柔耦合误差补偿方法研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 396-403.
- CHEN Xiaoyan, ZHANG Qiujun, SUN Yilin. Multi-mode calibration and rigid-flexible coupling error compensation method of serial robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 396-403.
- [54] LUO G, ZOU L, WANG Z, et al. A novel kinematic parameters calibration method for industrial robot based on Levenberg-Marquardt and differential evolution hybrid algorithm[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 71(1): 102165-102175.
- [55] OMODEI A, LEGNANI G, ADAMINI R. Three methodologies for the calibration of industrial manipulators: Experimental results on a SCARA robot[J]. Journal of Robotic Systems, 2000, 17(6): 291 - 307
- [56] 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, 2018, 65(4): 3337-3345.
- [57] 刘宇, 李瑰贤, 夏丹, 等. 基于改进遗传算法辨识空间机器人动力学参数[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(11): 1734-1739.
- LIU Yu, LI Guixian, XIA Dan, et al. Identifying dynamic parameters of a space robot based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(11): 1734-1739.
- [58] WEST C, MONTAZERI A, MONK S D, et al. A genetic algorithm approach for parameter optimization of a 7-DOF robotic manipulator[J]. Ifac Papersonline, 2016, 49(12): 1261-1266.
- [59] ALICI G, JAGIELSKI R, SEKERCIOGLU A, et al. Prediction of geometric errors of robot manipulators with particle swarm optimization method[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2006, 54(12): 956-966.
- [60] 刘飞. 工业机器人运动学参数辨识及误差补偿研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- LIU Fei. Kinematics parameter identification and compensation of an industrial robot[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [61] ZENG Y, TIAN W, LI D, et al. An error-similarity-based robot positional accuracy improvement method for a robotic drilling and riveting system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(9-12): 2745-2755.
- [62] 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.
- WANG Longfei, LI Xu, ZHANG Liyan, et al. Analysis of the positioning error of industrial robots and accuracy compensation based on ELM algorithm[J]. Robot, 2018, 40(6): 843-851.
- [63] BAI Y. On the comparison of model-based and modelless robotic calibration based on a fuzzy interpolation method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 31(11-12): 1243-1250.
- [64] 张湧涛, 宋志伟, 王一, 等. 基于空间网格的机器人工作点位姿标定方法[J]. 浙江大学学报, 2016, 50(10): 1980-1986.

- ZHANG Yongtao, SONG Zhiwei, WANG Yi, et al. Robot position and rotation calibration method based on spatial mesh[J]. Journal of Zhejiang University, 2016, 50(10): 1980-1986.
- [65] ALICI G, SHIRINZADEH B. A systematic technique to estimate positioning errors for robot accuracy improvement using laser interferometry based sensing[J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 40(8): 879-906.
- [66] 周炜, 廖文和, 田威, 等. 面向飞机自动化装配的机器人空间网格精度补偿方法研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(19): 2306-2311.
- ZHOU Wei, LIAO Wenhe, TIAN Wei, et al. Robot accuracy compensation method of spatial grid for aircraft automatic assembly[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(19): 2306-2311.
- [67] ZHU W, QU W, CAO L, et al. An off-line programming system for robotic drilling in aerospace manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9-12): 2535-2545.
- [68] 孙剑萍, XI J, 汤兆平. 近似度加权平均插值的机器人精度补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 128-137.
- SUN Jianping, XI J, TANG Zhaoping. Study on robot accuracy compensation method based on approximation degree weighted average interpolation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 128-137.
- [69] WU H, TIZZANO W, ANDERSEN T T, et al. Hand-eye calibration and inverse kinematics of robot arm using neural network[J]. Advances in Intelligent Systems & Computing, 2014, 274: 581-591.
- [70] 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: 996-1005.
- [71] WANG X, TANG Z, TAMURA H, et al. An improved backpropagation algorithm to avoid the local minima problem[J]. Neurocomputing, 2004, 56: 455-460.
- [72] 周炜, 廖文和, 田威, 等. 基于粒子群优化神经网络的机器人精度补偿方法研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(2): 174-179.
- ZHOU Wei, LIAO Wenhe, TIAN Wei, et al. Method of industrial robot accuracy compensation method based on particle swarm optimization neural network[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(2): 174-179.
- [73] 周旭, 鲁墨武, 姜春英, 等. 改进的 PSO-BP 算法在工业机器人末端位姿误差补偿中的应用[J]. 信息与控制, 2021, 50(4): 505-512.
- ZHOU Xu, LU Mowu, JIANG Chunying, et al. Application of improved PSO-BP algorithm in the compensation of end-pose error of industrial robot[J]. Information and Control, 2021, 50(4): 505-512.
- [74] LE P N, KANG H J. Robot manipulator calibration using a model based identification technique and a neural network with the teaching learning-based optimization[J]. IEEE Access, 2020, 8: 105447-105454.
- [75] WANG W, TIAN W, LIAO W, et al. Error compensation of industrial robot based on deep belief network and error similarity[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 73(8): 102220-102230.
- [76] 齐飞, 平雪良, 刘洁, 等. 工业机器人误差补偿及冗余参数研究[J]. 机械设计, 2017, 34(2): 17-22.
- QI Fei, PING Xueliang, LIU Jie, et al. Error compensation and parameters redundancy research of industrial robot[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(2): 17-22.
- [77] 韩哈斯额尔敦, 曾志革, 刘海涛, 等. 光学加工机器人定位误差测量与分析[J]. 光电工程, 2017, 44(5): 516-522.
- HASIRDEN, ZENG Zhige, LIU Haitao, et al. Measurement and analyses on positioning accuracy for optical processing robots[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(5): 516-522.
- [78] 李祥云, 向民志, 范百兴, 等. 工业机器人运动学参数标定精度分析与改进[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(3): 255-259.
- LI Xiangyun, XIANG Minzhi, FAN Baixing, et al. Precision analysis and improvement of kinematic parameters calibration for industrial robots[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2018, 35(3): 255-259.
- [79] DÉPINCÉ P, HASCOËT J Y. Active integration of tool deflection effects in end milling. Part 2. Compensation of tool deflection[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(9): 945-956.
- [80] 齐俊德, 张定华, 李山, 等. 工业机器人绝对定位误差的建模与补偿[J]. 华南理工大学学报, 2016, 44(11): 113-118.
- QI Junde, ZHANG Dinghua, LI Shan, et al. Modeling and compensation of absolute positioning error of industrial robots[J]. Journal of South China University of Technology, 2016, 44(11): 113-118.
- [81] WU G, WANG D, DONG H. Off-Line programmed error compensation of an industrial robot in ship hull

- welding[C]// International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Springer, Cham, 2017: 135-146.
- [82] 王龙飞. 飞机结构机器人自动制孔的误差补偿技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- WANG Longfei. Research on error compensation of industrial robots used for automatic drilling on aircraft structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [83] 陈杰. 串联机器人的误差分析及补偿方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- CHEN Jie. Research on error analysis and compensation methods of serial robot[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [84] LIU B, ZHANG F, QU X. A method for improving the pose accuracy of a robot manipulator based on multi-sensor combined measurement and data fusion[J]. *Sensors*, 2015, 15(4): 7933-7952.
- [85] 张振邦, 曲兴华, 张福民. PID 参数对机器人在线力补偿的影响[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(3): 142-148.
- ZHANG Zhenbang, QU Xinghua, ZHANG Fumin. Effect of PID parameter on online force compensation of robot[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(3): 142-148.
- [86] DENKENA B, LEPPER T. Enabling an industrial robot for metal cutting operations[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 35: 79-84.
- [87] CVITANIC T, NGUYEN V, MELKOTE S N. Pose optimization in robotic machining using static and dynamic stiffness models[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 66: 101992-102008.
- [88] PAN Z, ZHANG H. Improving robotic machining accuracy by real-time compensation[C]// ICROS-SICE International Joint Conference 2009 International Joint Conference, Fukuoka, 2009: 4289-4294.
- [89] 魏得权. 基于静刚度模型的机器人铣削加工误差在线补偿[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- WEI Dequan. On-line compensation of machining errors in robot milling based on static stiffness model[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [90] CEN L, MELKOTE S N, CASTLE J, et al. A wireless force-sensing and model-based approach for enhancement of machining accuracy in robotic milling[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(5): 2227-2235.
- [91] POSADA J, SCHNEIDER U, PIDAN S, et al. High accurate robotic drilling with external sensor and compliance model-based compensation[C]// International Conference on Robotics and Automation, May16-21, 2016. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 3901-3907.
- [92] MOELLER C, SCHMIDT H C, KOCH P, et al. Real time pose control of an industrial robotic system for machining of large scale components in aerospace industry using laser tracker system[J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2017, 10(2): 100-108.
- [93] WANG Z, ZHANG R, KEOGH P. Real-Time laser tracker compensation of robotic drilling and machining[J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2020, 4(3): 79-104.
- [94] MOSQUEIRA G, APETZ J, SANTOS K M, et al. Analysis of the indoor GPS system as feedback for the robotic alignment of fuselages using laser radar measurements as comparison[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, 28(6): 700-709.
- [95] PORATH M D C, BORTONI L A F, SIMONI R, et al. Offline and online strategies to improve pose accuracy of a stewart platform using indoor-GPS[J]. *Precision Engineering*, 2020, 63: 83-93.
- [96] STORM C, SCHÖNBERG A, SCHMITT R H. Model predictive control approach for assembling large components in motion[J]. *Production Engineering*, 2017, 11(2): 167-173.
- [97] 张华, 夏波. 基于双目视觉的机器人自定位方法研究[J]. *华中科技大学学报*, 2015, 43(S1): 104-108.
- ZHANG Hua, XIA Bo. Robot autonomous localization method study based on binocular vision[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2015, 43(S1): 104-108.
- [98] SHU T, GHARAATY S, XIE W, et al. Dynamic path tracking of industrial robots with high accuracy using photogrammetry sensor[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(3): 1159-1170.

作者简介: 刘伟, 男, 1986 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为高效精密智能磨削、磨抛机器人。

E-mail: lw1986tiger@163.com