



智能系统学报

CAAI TRANSACTIONS ON INTELLIGENT SYSTEMS

航空领域机器人自动钻孔研究进展及关键技术综述

付鹏强, 苗宇航, 王义文, 姜晓灿, 许成阳, 刘立佳, 周丽杰

引用本文:

付鹏强, 苗宇航, 王义文, 姜晓灿, 许成阳, 刘立佳, 周丽杰. 航空领域机器人自动钻孔研究进展及关键技术综述[J]. *智能系统学报*, 2022, 17(5): 874–885.

FU Pengqiang, MIAO Yuhang, WANG Yiwen, JIANG Xiaocan, XU Chengyang, LIU Lijia, ZHOU Lijie. A review of research progress and key technologies of robotic drilling in aviation[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2022, 17(5): 874–885.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202106049>

您可能感兴趣的其他文章

微装配机器人: 关键技术、发展与应用

Microassembly robot: key technology, development, and applications

智能系统学报. 2020, 15(3): 413–424 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201809031>

人机智能技术及系统研究进展综述

A survey of recent advances in human–robot intelligent systems

智能系统学报. 2020, 15(2): 386–398 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201912001>

记忆神经网络在机器人导航领域的应用与研究进展

Research progress and application of memory neural network in robot navigation

智能系统学报. 2020, 15(5): 835–846 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.202002020>

多移动机器人协同搬运技术综述

Technologies for cooperative transportation by multiple mobile robots

智能系统学报. 2019, 14(1): 20–27 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201801038>

视觉同时定位与地图创建综述

A survey of VSLAM

智能系统学报. 2018, 13(1): 97–106 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201703006>



微信公众平台



期刊网址

DOI: 10.11992/tis.202106049

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20220513.1043.002.html>

航空领域机器人自动钻孔研究进展及关键技术综述

付鹏强^{1,2}, 苗宇航^{1,2}, 王义文^{1,2}, 姜晓灿^{1,2}, 许成阳³, 刘立佳^{2,4}, 周丽杰^{1,2}

(1. 哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 黑龙江哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨理工大学先进制造智能化技术教育部重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150080; 3. 沈阳航空航天大学航空宇航学院, 辽宁沈阳 110136; 4. 哈尔滨理工大学自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150080)

摘要:为促进航空航天领域机器人自动钻孔技术的研究, 本文介绍了国内外在该领域的研究进展, 概述与总结了机器人钻孔离线编程、终端执行器、系统误差补偿等关键技术所包涵的核心思想及算法, 梳理了研究中存在的问题和可能的解决方案, 探讨了各关键技术对机器人自动钻孔系统产生的影响, 最后在总结研究成果与分析的基础上对各关键技术的发展方向做出了展望。

关键词: 离线编程; 终端执行器; 系统误差补偿; 自动钻孔系统; 机器人; 钻孔路径规划; 冗余度求解; 压脚压紧力反馈; 法向监测

中图分类号: TP242.3; V261.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-4785(2022)05-0874-12

中文引用格式: 付鹏强, 苗宇航, 王义文, 等. 航空领域机器人自动钻孔研究进展及关键技术综述 [J]. 智能系统学报, 2022, 17(5): 874-885.

英文引用格式: FU Pengqiang, MIAO Yuhang, WANG Yiwen, et al. A review of research progress and key technologies of robotic drilling in aviation[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2022, 17(5): 874-885.

A review of research progress and key technologies of robotic drilling in aviation

FU Pengqiang^{1,2}, MIAO Yuhang^{1,2}, WANG Yiwen^{1,2}, JIANG Xiaocan^{1,2},
XU Chengyang³, LIU Lijia^{2,4}, ZHOU Lijie^{1,2}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Intelligent Technology, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 3. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 4. School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: This paper introduces the research progress of this theme at home and abroad, summarizes the core ideas and algorithms of offline programming, end effector, system error compensation, and other key technologies in robotic drilling technology, and combs through the existing problems and possible solutions in previous researches to promote the research on robotic drilling technology in the field of aerospace. Also, the paper discusses the impact of each key technology on the robotic drilling system and gives corresponding prospects on the basis of summarizing and analyzing research results.

Keywords: offline programming; end effector; system error compensation; automatic drilling system; robot; drilling path planning; redundancy solution; presser-foot device pressure-force feedback; normal monitoring

早期在机器人技术尚未得到广泛应用之前, 飞机各部件的钻孔方式主要以手工和大型数控机床为主^[1]。随着机器人技术的发展, 以机器人自动钻

孔为核心的高端制造成为了飞机各部件连接孔最高效的加工方式之一, 其与传统的手工钻孔相比具有柔度高、钻铆质量高、钻孔效率高等优点, 同时也避免了孔加工过程中材料废屑对人体健康的危害^[2]。机器人自动钻孔具有很多优点, 但钻孔过程中涉及的关键技术不能得以突破与保证, 孔的质量就难以保障, 将直接影响连接的疲劳寿命。

收稿日期: 2021-06-30. 网络出版日期: 2022-05-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475127); 黑龙江省自然科学基金项目(QC2018064; JJ2022LH0716); 普通高等学校创新人才培养计划(UNPYSCT-2018196).

通信作者: 付鹏强. E-mail: pqfu@hrbust.edu.cn.

据波音公司对钛合金螺栓的连接疲劳寿命进行实验证明, 当紧固件沿外载荷作用方向倾斜大于 2°时, 疲劳寿命降低约 47%, 倾斜大于 5°时, 疲劳寿命降低 95%^[3]。70% 的飞机机体疲劳失效由其结构件连接失效造成, 结构件相互之间以孔连接为主, 因此, 钻孔质量对飞机寿命具有至关重要的影响^[4]。机器人自动钻孔关键技术作为保障钻孔质量的核心, 其中关键技术主要涉及机器人钻孔离线编程、钻孔终端执行器、系统误差补偿等, 突破这几种关键技术的壁垒, 保障钻孔的高效与质量是确保航空制造领域快速发展的首要任务。

机器人自动钻孔系统主要由机器人、钻孔终端执行器以及控制系统组成, 工作时机器人按预先编好的轨迹进行钻削加工, 在补偿钻孔系统误差的基础上, 机器人移动至待加工孔位, 调整法向钻孔位姿, 最后压脚压紧工件并进行钻孔。在上述过程中, 机器人离线编程技术中的钻孔路径规划与冗余机器人求解是离线编程技术的难点, 终端执行器技术中压紧单元压紧工件提高钻孔系统刚度和法矢检测提高钻孔垂直度等是保证钻孔质量的关键, 系统误差补偿技术中离线补偿机器人绝对定位误差或在线补偿机器人钻孔定位误差是确保钻孔位置精度的核心。

本文基于我国航空工业机器人自动钻孔系统的发展现状和需求, 结合国内外机器人钻孔系统典型案例, 提炼出以机器人钻孔离线编程、终端执行器、系统误差补偿为核心的关键技术, 针对各关键技术研究依旧存在的问题, 提出可能解

决问题的方案, 探讨各关键技术对机器人自动钻孔系统所产生的影响, 最后在总结与分析研究成果的基础上展望其未来的发展趋势。

1 机器人自动钻孔系统研究进展

随着航空制造业的发展与所需制造产品的多样化, 对机器人自动钻孔系统的多功能性、灵活性、加工范围等提出了更高的要求。国内外研究机构、企业等针对机器人自动钻孔系统中的关键技术展开了深入研究, 提出了许多高精度、高效率、功能更加广泛的机器人自动钻孔系统, 以适应不同加工任务的生产需求。

1.1 国外研究进展

国外机器人自动钻孔技术相关研究起源于 20 世纪 50 年代, 历时多年研究, 于 21 世纪初大规模应用在航空制造领域。2001 年美国 EI 公司为波音公司大黄蜂战斗机机翼部位的定位、钻孔、镗窝、孔位检测等工作设计出一套基于 KUKA 工业机器人的自动钻削系统 ONCE^[5-8](图 1(a))。该系统的钻孔位置精度为±0.25 mm, 满足航空工业钻孔位置精度要求。通用公司为解决机器人在机舱内部钻孔过程中空间受限的问题, 研制出一款适合在狭窄空间工作的机器人自动钻削系统^[9](图 1(b))。该系统使用在线视觉反馈技术对钻孔定位误差进行补偿, 补偿后的精度可达±0.04 mm, 克服了以往对基准孔定位精度低的问题, 实现高精度、无毛刺的基础上达到每分钟钻孔速度 4.5 个。

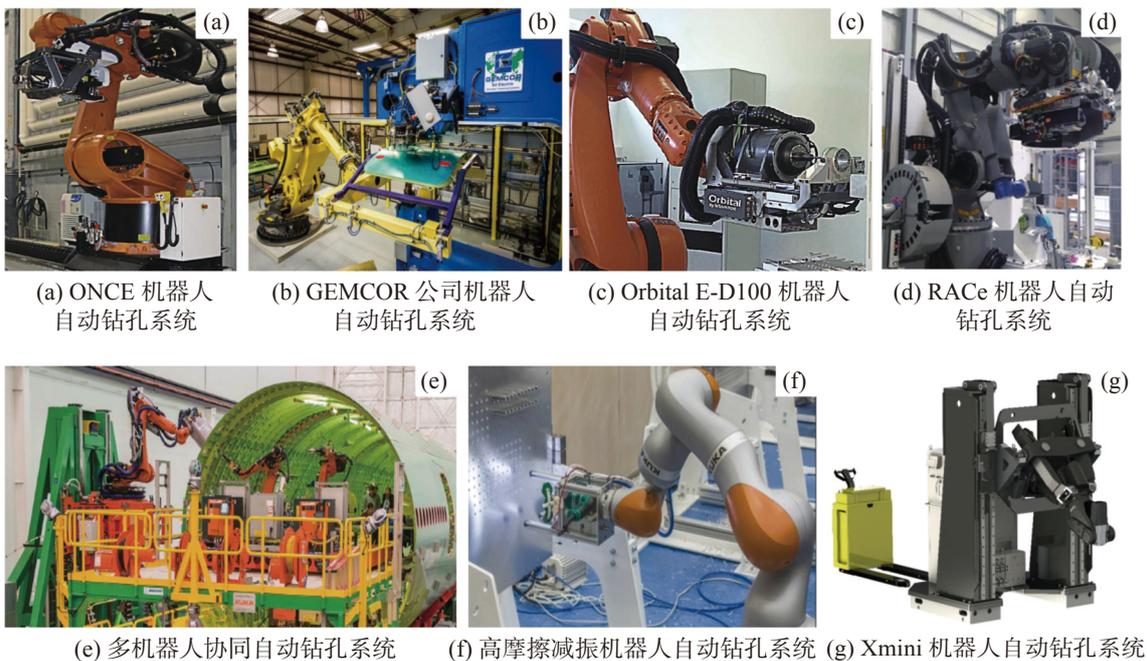


图 1 国外机器人自动钻孔系统

Fig. 1 Abroad robot automatic drilling system

2008 年瑞典 Novator 公司研发出一套 Orbital E-D100 机器人钻削系统^[10](图 1(c))。该系统通过最优压紧力预测技术来控制压脚作用在工件表面上的压紧力,可对复合材料、叠层材料进行无毛刺、高精度钻孔。2009 年, Brotje 公司开发出一套用于直升机装配制造的机器人自动钻孔系统 RACe^[11-12](图 1(d))。该系统引入误差补偿技术,在离线编程中建立机器人运动学模型来补偿机器人绝对定位误差,其钻孔位置精度为 ± 0.2 mm,钻孔周期 10.25 s,是目前世界上性能最佳的机器人钻孔系统之一。

2012 年,德国 KUKA 公司与波音公司合作研发出多机器人协同钻孔系统,该系统能够实现机器人在机舱内外协同作业,每天可对 60 000 个紧固件进行钻孔且孔位精度可达 ± 0.35 mm,保证高精度钻孔的同时极大地提高了零件加工效率^[13](图 1(e))。

2014 年波音公司专门为波音 787 梦幻客机的碳纤维复合材料机身钻孔及装配工作开发了一套多机器人协同工作单元 Quadbots^[14]。主要由 4 台机器人同时在机身两侧进行钻孔,在整体工作效率提升 30% 的同时钻孔位置精度 ± 0.013 mm,解决了多机器人协同控制技术智能化程度不高的问题。意大利的 BC 公司在 2015 年研制出两台机器人组成一个加工生产单元的自动钻孔设备,其终端执行器可完成自动涂胶、定位、换刀等工作^[15]。该机器人自动钻孔系统孔径加工范围 2~18 mm,克服了系统中终端执行器功能单一、集成度低的技术难题。

除此之外,2016 年日本奈良科技研究所^[16]研制出一款灵巧便于机身内部钻孔的高摩擦减振机器人钻孔系统(图 1(f)),在终端执行器前面设计出 3 个减振脚,具有良好的减振效果,该系统的钻孔位置精度为 ± 0.5 mm,钻孔周期为 8 s,在 2016 年 ICRA 举办的国际机器人竞赛中获得了第一名。2017 年洛马公司正式推出首款针对碳纤维复合材料加工的混联加工机器人 Xmini^[17](图 1(g))。该机器人的钻孔位置精度为 ± 0.01 mm,重复定位精度小于 0.05 mm,加工孔精度可达 IT6,实现飞机制造过程中复杂零部件结构钻孔及空间位置高精度的要求。

总结提炼国外机器人自动钻孔系统研究进展,将其按照主要应用范围、解决的主要问题、主要技术特点、主要性能指标 4 个方面进行分类,如表 1 所示。从上述国外机器人自动钻孔系统的研究进展来看,早期的机器人自动钻孔系统虽然满足加工效率的要求,但由于孔位补偿、钻孔路径规划、冗余机器人求解等关键技术尚未突破,导致该系统在精度、效率、质量、灵活性等方面有所欠缺。随着制造业的发展与各关键技术的进步,钻孔加工范围由单一化逐渐走向多元化,加工效率、钻孔质量、精度等方面均有较大的提升,钻孔终端执行器集成度高、体积小、多功能可以解决不同加工任务的问题。此外通过离线的方式补偿机器人绝对定位误差或在线视觉引导机器人对基准孔位识别进一步弥补了机器人自身定位精度低的缺陷。

表 1 国外机器人自动钻孔系统研究进展

Table 1 Research progress of robotic automatic drilling system abroad

研发时间	研究机构	主要应用范围	解决的主要问题	主要技术特点	主要性能指标
2001年	美国EI公司	大黄蜂战斗机机翼	加工效率低、定位精度差	钻孔、镗窝、孔位检测一体化	钻孔位置精度 ± 0.25 mm
2008年	瑞典Novator 公司	飞机蒙皮、舱门、尾锥等	钻削叠层材料毛刺过高	压脚压紧力预测	复合材料、铝、钛以及叠层材料无毛刺钻孔
2009年	德国Brotje公司	直升机机身	机器人绝对定位精度低	离线建立机器人运动学模型补偿机器人绝对定位误差	钻孔位置精度 ± 0.2 mm、钻孔周期10.25 s
2012年	德国KUKA公司与美国波音公司	波音777X新型双通道客机	钻孔及装配效率低	多机器人机身内外协同作业、机身自动直立装配	钻孔位置精度 ± 0.35 mm、钻孔周期9.5 s
2014年	美国波音公司	波音787梦幻客机	钻孔及装配效率低	多机器人机身内外协同作业	钻孔位置精度 ± 0.013 mm
2015年	意大利BC公司	飞机机身、机翼、壁板	终端执行器功能单一、集成度低	终端执行器自动涂胶、定位、换刀	孔径加工范围2~18 mm

续表 1

研发时间	研究机构	主要应用范围	解决的主要问题	主要技术特点	主要性能指标
2016年	日本奈良研究所	小型客机机身内部	大型机器人灵活性差	减振终端执行器	钻孔位置精度±0.5 mm、 钻孔周期8 s
2017年	美国通用公司	机舱内部、机身	机舱内部钻孔空间狭小	终端执行器集成度高, 在线视觉反馈技术实时补偿定位误差	钻孔位置精度±0.04 mm、 钻孔周期13.3 s
2017年	美国洛马公司	复杂零部件结构	碳纤维复合材料加工质量差	混联机器人加工	钻孔位置精度±0.01 mm、 加工孔精度可达IT6

1.2 国内研究进展

据报道国内机器人自动钻孔技术相关研究最早始于 20 世纪 70 年代, 但世界第一台机电驱动的 6 轴机器人于 1973 年诞生, 基于工业机器人的应用系统尚不成熟, 因此, 项目暂时搁浅。随着智能制造时代的到来, 我国机器人自动钻孔系统的应用在 2000 年左右起源于各大高校与科研机构。

2007—2009 年, 北京航空航天大学与沈飞和沈阳机床厂共同合作, 研制出国内第一款机器人自动钻孔系统(图 2(a)), 终端执行器可完成钻孔、铰孔、铰窝与检测的工作, 钻孔精度为±0.4 mm^[18]。在满足对飞机装配质量要求的同时, 钻孔效率可达到每分钟 4 个, 钻孔周期比人工钻孔减少 50% 以上^[18]。作为国内首款机器人自动钻孔系统, 虽然研制出多功能钻孔终端执行器, 但核心技术如: 钻孔精度补偿、钻孔路径规划等仍未完全掌握, 加工精度、加工效率、终端执行器的可靠性与使用寿命等方面仍与国外存在一定差距。

2012 年中航工业成飞公司与西北工业大学设计出一款针对某机型机身壁板顶部的机器人钻孔系统, 解决了钻铆系统采用固定式定位单元带来的系统敞开性差、柔性程度低等问题, 该系统的钻孔位置精度为±0.15 mm, 钻孔效率每分钟 3 个^[19-20]。

2014 年南京航空航天大学与成飞合作研制了面向机翼部件装配的智能柔性化钻孔系统^[21-22](图 2(b))。研究了精度补偿算法与控制系统总体方案, 将在线视觉误差补偿技术引入到机器人自动钻削系统中, 该机器人钻孔系统定位精度为±0.34 mm, 一定程度上提高了钻孔定位精度, 此外设计出一款可用于 CFRP(碳纤维复合增强材料) 钻孔的终端执行器。

浙江大学研制出一种双机器人并联协同钻削系统^[23](图 2(c)), 之后 2017 年 Liu 等^[24]在其基础上研究了自动椭圆沉头工作原理, 并设计出一种集钻孔、螺旋铣、铰窝三大功能为一体的多功能终端执行器(图 2(d)), 该系统的定位精度在±0.5 mm, 毛刺高度控制在±0.08 mm, 沉孔深度变化控制在 0.02 mm 内。2019 年该团队在此基础上对钻孔过程中机器人变形进行预测和补偿, 将机器人钻孔平均位置误差由 0.22 mm 降低至 0.05 mm^[25]。其精度、效率、加工范围等方面均取得了良好的效果, 克服了我国在钻孔终端执行器技术上存在通用性低、加工范围小、集成度低的难题。

将国内机器人自动钻孔系统按主要应用范围、解决的主要问题、主要技术特点、主要性能指标进行总结, 如表 2 所示。可以看出, 我国机器人自动钻孔系统研究主要以高校的样机试制为主, 虽然钻孔精度补偿、钻孔多功能执行器等关键技术取得了突破, 但与国外相比, 仍然存在钻孔精度与效率低下、可靠性差、系统智能化程度不高的问题。随着国内各机构的不断研发, 机器人自动钻孔技术在航空领域取得了一定的研究成果, 但是用于实际钻孔效果还需进一步改善, 因此我国机器人自动钻孔系统针对不同机型大规模应用于飞机制造还需较长时间, 机器人自动钻孔关键

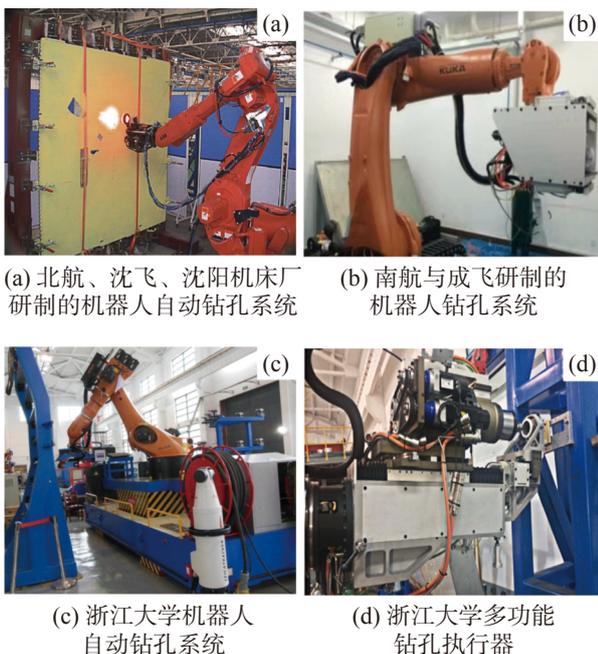


图 2 国内机器人自动钻孔系统
Fig. 2 Domestic robot automatic drilling system

技术的突破与创新水平的提升是提高我国航空制造水平的必然要求与亟需解决的问题。

表 2 国内机器人自动钻孔系统研究进展

Table 2 Research progress of domestic robotic automatic drilling system

研发时间	研究机构	主要应用范围	解决的主要问题	主要技术特点	主要性能指标
2009年	北京航空航天大学、沈飞、沈阳机床厂	未给出具体应用机型	钻孔效率低、定位精度差	多功能终端执行器可钻孔、铰孔、镗窝与检测等工作	钻孔位置精度 ± 0.4 mm、 钻孔周期15 s
2012年	中航工业成飞公司与西北工业大学	某机型机身壁板顶部	柔性程度低、定位精度差	通过算法调整机器人位姿从而提高钻孔定位精度	钻孔位置精度 ± 0.15 mm、 钻孔周期20 s
2014年	南京航空航天大学与成都飞机工业有限责任公司	机翼等部件	柔性程度低、定位精度差	在线视觉误差补偿技术提高钻孔定位精度	钻孔位置精度 ± 0.34 mm
2017年	浙江大学	飞机壁板、蒙皮	终端执行器集成度低、定位精度差	双机器人并联协同钻孔,多功能终端执行器可钻孔、螺旋铣、镗窝	钻孔位置精度 ± 0.5 mm、 毛刺高度 ± 0.08 mm
2019年	浙江大学	飞机壁板、蒙皮	定位精度差	机器人变形预测和补偿	钻孔位置精度 ± 0.05 mm

2 机器人自动钻孔关键技术

2.1 机器人自动钻孔离线编程技术

离线编程技术是航空制造中高效使用机器人自动钻孔的必要工具,与在线示教编程相比具有精度高的优点,且在机器人自动钻孔工作时能对下一加工任务进行预先编程,可极大提升钻孔效率。目前,机器人自动钻孔离线编程中存在两个最主要的问题,一个是机器人自动钻孔路径规划问题,另一个是机器人冗余度求解问题。路径规划影响整个加工系统的工作效率与加工质量,冗余度可避免机器人在工作空间的奇异性。

2.1.1 钻孔路径规划

当前人工智能算法已广泛应用于移动机器人路径规划^[26]。法兰克福应用科技大学、曼苏拉曼大学、罗开罗大学等科研机构成功利用遗传算法在不同数量障碍物的静态环境下寻找最佳避障路径,通过多次实验证明获取最佳避障路径的成功率可达 93%^[27-28]。而目前,遗传算法存在对新空间的探索能力具有局限性、计算量较大且稳定性差等问题,混沌粒子群算法在对离散优化的问题上处理不佳且易陷入局部最优^[29]。因此,在机器人钻孔路径规划问题上通常采用蚁群算法,蚁群算法在该问题上相比于其他智能算法优点在于所需参数少、易于调整、且全局搜索能力快,但仍有收敛速度慢且易陷入局部最优的缺点。

针对蚁群算法易限于局部最优问题可在蚂蚁搜索序列时采用新的局部信息素来更新规则,通过基于蚁群算法的多目标优化方法,可得到自动钻孔顺序规划多目标优化模型^[30]。而对于蚁群算法收敛速度慢的问题,通过将蚁群算法进行改

进,把局部扩散信息素应用到蚁群算法中来减少不完备路径个数,利用几何方法对路径进行优化,可避免路径交叉的情况^[31]。Liu 等^[32]提出了一种自适应蚁群算法,通过调整动态信息,在蚁群数量 34,迭代 1000 次时,得出了机器人钻孔最佳路径。Tian 等^[33]融合蚁群算法与遗传算法的优点,先利用蚁群算法进行较少迭代获得最短路径,再将此路径进行遗传迭代从而获得钻孔路线的最短最优解。Erkorkmaz 等^[34]通过工艺需求对蚁群算法的缺点进行改进,提出一种带有整体方向的区域优先蚁群算法,运用改进后的蚁群算法将路径长度减小了 32.5%,满足工艺需求的情况下有效提高了钻孔效率。

在机器人自动钻孔路径规划中,解决蚁群算法收敛速度慢和局部最优值的问题,通过将蚁群算法改进并可得到良好的效果,其主要方法有:通过建立多目标优化方法来建立加工模型、路径规划问题的有效转化、放大局部信息来减少冗余路径从而避免加工路径重叠。但是改进的蚁群算法仍有一定几率无法求得全局最优解即最佳钻孔路径,如何利用其他算法的优点与改进蚁群算法的缺点实现优势互补,可能是一个潜在的解决方法。

2.1.2 冗余度求解

为使机器人自动钻孔系统在工作空间避开奇异位形、防止关节运动极限,获得最佳钻孔位姿,需要对冗余机器人进行运动学求解。

在求解问题中针对冗余度分解中权值选择的问题,可利用自适应系统代替低效率的人工调权,将自适应系统集成到扭转分解算法避免机器人在工作空间中的奇异点^[35]。在未考虑机器人驱动角速度和钻削力的情况下,结合机器人关节扭

矩与加工姿态简化冗余度,利用冗余度简化指标对机器人执行加工任务时的姿态进行优化,可获取机器人的最佳钻削姿态^[36]。Leger等^[37]通过将机器人冗余特性的问题约束重新定义为一个五维任务,找到约束雅可比矩阵的零空间,利用一种序列二次规划(SQP)法生成最佳轨迹解决冗余问题。

目前,在冗余度求解的问题上主要通过建立数学模型优化冗余度求解方案和外在因素对冗余度产生的影响两方面来研究。此外,考虑机器人的刚度特性,分析机器人钻进时的动态行为,利用线性插值模型在关节位移水平上来解决机器人钻削过程中的冗余度问题,可得到数值优化后的冗余度求解方案^[38]。Jiao等^[39]将运动学和刚度性能优化两个指标作为特殊的OLP(离线编程)系统,提出在关节极限约束下的机器人位形奇异性测量模型,实现了对奇异位形和关节极限位形的回避。同时提出了一种冗余度分解方法来规划和优化外轴离线的机器人结构系统,避免了奇异性和关节限制,成功应用于机器人钻削中。

通过建立机器人运动学模型,避免机器人关节极限作为优化指标,采用如指数积公式法、二次序列规划法、微分法等数学算法获得高冗余度机器人取得了一定的成果,研究动态加工过程中机器人的刚度特性、运动学特性以及不同加工任务情况下对冗余度所产生的影响十分关键。如何考虑将这些因素融入相应的数学模型是解决复杂工业场景中机器人钻孔灵活性问题的一个关键。

2.2 机器人自动钻孔终端执行器技术

终端执行器是机器人自动钻孔的执行机构,通过机器人终端法兰与机器人相连,根据其于机器人连接方式不同,分同轴式、悬挂式和侧面式3种,它的安装方式可以直接影响到钻孔的精度与效率。终端执行器的组成单元主要有:切削单元、压紧单元、支撑单元、法向检测单元、进给单元、主轴单元、检测单元、冷却润滑装置、排屑装置等。工作顺序先由法向检测单元进行法矢找正,再利用压脚压在工件表面以提高钻削稳定性,然后主轴电机带动切削刀具旋转,进给单元沿刀具轴向进给,完成钻孔的切削工作。其中最关键的技术难点是法向检测单元调整垂直度与压紧单元压紧力控制。

2.2.1 钻孔法向检测

法向检测的主要作用是测量被加工件的曲面法向然后调整钻头姿态进行高精度钻孔。法向检测单元是影响钻孔垂直精度最重要的因素,一般

在精确定位待钻孔位之后进行^[40]。检测方法是预先通过非接触式法向仪器发出的激光束扫描工件表面,利用算法拟合出曲面的实际法向,然后调整钻头轴线并与钻孔点法线重合^[41],其中难点在于如何采用合适的拟合算法进行法向的精准获取。

对于拟合算法的研究,Norgia等^[42]从实际出发提出一种向量叉积法,使法向检测精度控制在 $\pm 0.1^\circ$ 内,实现了精准的曲面法向找正。Galileia提出一种基于几何数学模型和最小二乘法对激光位移传感器光束矢量和零点位置标定的方法,解决了激光位移传感器的安装误差问题,将法向检测精度控制在 $\pm 0.18^\circ$ 内^[43]。Rao等^[44]采用一种基于结构光的高分辨率三维测量传感器,为了消除噪声,采用张量投票法填补三维点云中的空白,得到均匀分布的点云进行精确的曲面拟合,填补后可对曲面边缘进行精确法向测量和平滑度优化,可将法向钻孔精度从拟合前的 $\pm 0.5^\circ$ 提高至 $\pm 0.3^\circ$ 。

在获取法向位置后,需进一步研究如何调整钻孔角度,保证钻孔垂直精度。Gao等^[45]采用新型可调式机械结构实现对激光位移传感器高精度安装,提出了一种同时考虑角度偏差阈值和有限调整迭代的调整方法,将曲面工件的钻孔垂直度误差控制在 $\pm 0.3^\circ$ 内。Gong等^[46]基于3个激光传感器测量曲面法线,通过叉积法计算钻孔点法向量与钻头中心轴线夹角,并进行钻头姿态调整。通过设计的二元调整装置可以使钻头实时精确地定角度调整,其最终调节精度可达 $\pm 0.08^\circ$,但调整过程中需要进行二次调整钻头位置,因此增加了钻孔工作的复杂性。Yuan等^[47]在其基础上进行了改进,用4个激光传感器测量钻孔点处法向量,设计出一种双偏心盘调姿机构,该机构可保持钻头顶点不动进行钻头姿态微调,避免二次调整钻头位置的问题,提高钻孔工作效率的同时钻孔法向垂直精度保障在 $\pm 0.1^\circ$ 内。

通过激光位移传感器、线结构光扫描仪等光学器件提取曲面工件数据,并采用不同的拟合算法可获得较高的拟合精度。而获取精准法向后调整钻头姿态进行高精度钻孔的研究较少,设计新式便捷的高精度钻孔角度调节机构具有一定的难度,其结构设计复杂,且对机构各部件的加工精度要求较高。双偏心盘调姿机构对后续的研究虽具有一定的参考意义,但非标结构在制造及装配过程中存在差异性较大的问题,因此距离大规模的商用仍有一段距离。

2.2.2 压脚压紧力反馈

压紧单元是提高机器人钻削刚度的核心结构

部件,主要由气缸加上自主设计的压脚以及压力传感器等构成,通过气缸推动压脚并与工件直接接触施加一定压力从而提高整个机器人钻削系统的刚度,防止钻孔时终端执行器相对工件产生法向振动和切向滑动,提高钻孔质量。但施加压紧力的大小是一个难题,压紧力过小难以抑制振动,压紧力过大将导致工件产生严重形变。

Tomas 等^[48]针对机器人钻孔系统刚度差而导致孔位滑移、系统振动的问题,提出了一种高带宽力反馈的工业机器人高精度钻孔的方法,首先建立压力预测模型,通过力传感器实时反馈对压紧力进行控制。Jin 等^[49]对终端执行器前的压脚压紧力进行了优化,研究压脚压紧力对钻孔质量的影响,采用二元线性回归分析建立经验公式,确定合适的加工参数,最后通过正交实验证明在最优压紧力下进行钻削加工,孔径误差小于 0.02 mm,圆度误差小于 0.005 mm,表面粗糙度可达 Ra 3.2,有效提高了钻孔质量。

对于飞机中的叠层工件,压脚还起到消除叠层间隙抑制毛刺生长的作用。Hellstern^[50]为消除叠层构件因其他因素所造成的初始间隙和钻孔间隙,提出一种融合有限元仿真、蒙特卡洛模拟以及影响系数的压紧力预测方法,在钻孔前通过对叠层构件压紧力进行预测,并在钻孔时按预测压力进行钻孔,通过实验证明了该方法可将钻孔后层间毛刺高度降低至 0.1 mm 以下。Melkote 等^[51]基于弹性力学理论对叠层钻孔过程进行建模,通过计算钻削过程叠层壁板各处的挠度,解出消除叠层间隙所需要的最小压紧力。

在钻孔执行器端部安装气动或刚性压脚装置,通过压力传感器反馈至控制系统,建立压力预测模型,用仿真或实验得出最优压紧力的方法已应用到机器人钻削当中。针对压脚压紧力影响机器人自动钻削系统刚度的关系目前的相关文献较少,优化压脚压紧力作用下的机器人刚度模型和利用数学模型求解最优压紧力是一个研究重点。

2.3 机器人自动钻孔系统误差补偿技术

航空工业机器人自动钻孔任务往往要求高效率和高精度,机器人重复定位精度虽可达到 0.1 mm 内,但其绝对定位精度较低,误差甚至可以达到 2~3 mm。因此,较差的机器人绝对定位精度难以满足航空工业高精度钻孔要求,而安装终端执行器及其他反馈装置后,又会引入其他误差,大量的误差积累使得机器人钻孔理论位置与实际位置相差较大。此外,由于待加工零部件理论外形与

实际外形存在偏差,零部件与机器人位置关系找正存在偏差等,综合影响孔位精度。针对这些误差累积问题,精度补偿是解决机器人绝对定位精度低、钻孔定位精度不高等问题的可行方案,其中补偿方式依据工作状态可分为离线补偿和在线补偿两种。离线补偿是指机器人在钻孔工作前,通过一定的方法补偿机器人的绝对定位精度,在线补偿是指在机器人末端增加实时反馈传感器,使机器人在工作中调整末端直至理想位姿。

2.3.1 机器人自动钻孔绝对定位误差离线补偿

针对机器人自动钻孔绝对定位误差离线补偿,需建立离线位姿误差模型,利用高精度测量设备获得机器人不同位形下的实际终端位姿,辨识机器人运动学参数的准确值,将补偿数据预置到控制算法中。离线补偿的重点、难点在于机器人运动学参数辨识及补偿算法,它们是影响补偿精度高低最关键的因素。

学者 Kim^[52]、Erkorkmaz^[53]等利用激光跟踪仪辨识所需参数,利用最小二乘法对误差模型参数进行补偿,通过实验将机器人绝对定位误差由补偿前的 ± 1.321 mm 降低至 ± 0.183 mm,完成补偿后成功用于机器人钻削当中。Aibert 等^[54]利用激光跟踪仪测量 ABB IRB1600 型机器人的 29 个影响绝对位置精度的误差参数,利用最小二乘法对参数模型进行优化,找出最适合激光跟踪仪测量的 29 个误差参数,在整个机器人关节空间大量测验,最终证明该方法可将机器人绝对位置误差从 ± 0.968 mm 减小至 ± 0.364 mm。Ma 等^[55]考虑了包含常数和关节相关的运动误差,对各误差源的运动误差进行分类,利用激光跟踪仪在可测关节空间上获得测量值,采用极大似然估计法辨识误差模型参数,同时估计模型参数、关节方差和测量误差,使用基于雅可比的搜索方法确定更新的关节指令,实现机器人运动误差的补偿,经实验证明,该方法的补偿精度可达 ± 0.122 mm。Zeng 等^[56]辨识机器人几何参数误差,提出了基于误差相似度的残差补偿方法,通过实验证明机器人绝对定位误差可由补偿前 ± 0.879 mm 降低至 ± 0.194 mm,经残差补偿后可降低至 ± 0.141 mm。

也有学者通过建立机器人空间定位误差模型提高机器人实际作业时的绝对定位精度。Zeng 等^[57]基于空间相似性的位置误差模型,提出了目标位置误差的线性无偏最优估计方法,通过实验对补偿后的机器人位置误差进行测量来验证所提出的方法,实验证明该方法可将最大绝对位置误差从 ± 2.01 mm 降低至 ± 0.32 mm。Tian 等^[58]以空

间插值的方式进行机器人绝对定位误差预测,提出一种基于空间网格的机器人精度补偿方法,该方法可将补偿后的机器人绝对定位误差减小为平均值 ± 0.156 mm。

目前,有学者曾尝试提出新的模型算法来对误差进行补偿。Yuan等^[59]为解决传统补偿算法中复杂的建模和计算问题,提出了一种基于ELM(极限学习机)模型的补偿方法,考虑了机器人几何因素与非几何因素的影响,建立了ELM位置误差预测模型,通过对ELM模型进行训练可预测点位误差,实验证明此方法可将机器人钻孔平均绝对定位误差从 ± 0.716 mm减小到 ± 0.115 mm,最大绝对定位误差从 1.307 mm减小到 0.266 mm,大幅提高了机器人钻孔中机器人的绝对位置精度。

通过建立机器人运动学参数模型,利用激光跟踪仪辨识运动学参数,将最小二乘法、极大似然估计法等数学算法融入误差补偿模型中可大幅提高机器人绝对定位精度,但建立模型的复杂性与计算量大的缺点仍然存在。而新模型ELM具有运算量小、泛化性能好的优点,可借助其训练快的特点作为一种辅助的训练工具,但其实际应用速度不快,暂不适合作为最终补偿算法。

2.3.2 机器人自动钻孔定位误差在线补偿

在线补偿是借助激光跟踪仪、编码器、单双目视觉系统等实时检测设备来对机器人终端位姿进行实时反馈调整。

Sulzer等^[60]构建了基于激光跟踪仪闭环反馈的机器人钻孔系统,修正机器人动静态误差以及其他残留误差,将补偿后的钻孔位置精度提高至 ± 0.2 mm。Liu等^[61]利用激光跟踪仪测量机器人终端靶标,实时监测机器人终端姿态,然后补偿机器人位姿偏差,通过实验证明采用激光跟踪仪闭环反馈的机器人钻孔系统通过几次反馈调整后可将机器人钻孔的位置精度提高至 ± 0.12 mm。

针对激光跟踪仪受光线、温度等环境因素影响较大,且价格昂贵所需成本高的问题,有学者提出了以在线视觉引导机器人对基准孔位测量反馈机器人进行位姿修正的方法。Zhu^[62]采用单目视觉测量系统测量钻具中心点(TCP)与参考孔之间的相对误差,并提出了一种显著蛇形椭圆轮廓提取算法,该算法与传统的圆拟合算法相比具有更高的拟合精度,对基准孔位进行精确检测的同时在机器人钻孔系统上进行了实验验证,表明所开发的视觉系统的定位精度高于 ± 0.15 mm,满足目前的航空工业要求。Zhu^[63]开发了移动机器人钻孔系统和2D视觉系统,提出了一种基于二维

视觉系统的机器人基架在线标定方法,采用迭代测量方案来消除基准孔定位过程中的测量误差,使用最小二乘法拟合获得了相对于世界坐标系的机器人基础框架坐标,在其开发的机器人钻孔系统中证明了该方法的有效性,经实验验证该方法的钻孔定位误差为 ± 0.35 mm。Zhan等^[64]提出一种利用单应关系计算机器人驱动坐标三维偏差以在线补偿机器人钻孔精度。通过标定出的手眼单应关系对基准孔孔心相对于刀具的三维偏差进行测量,利用奇异值分解法求解出理论驱动坐标与实际驱动坐标之间的转换关系,并反馈驱动机器人进行终端姿态调整,通过实验证明此方法可将机器人钻孔定位误差控制在 ± 0.1 mm。

在单目视觉测量系统反馈调整钻孔位姿研究的基础上,有学者采用双目视觉的方法进行在线补偿。Liu等^[65]针对单目视觉测量系统对基准孔测量存在效率低和精度低的问题,提出了一种基于双目视觉测量系统的孔位补偿方案,利用单线性插值方法对每排孔进行单独补偿,最后通过实验证明了该方法可将机器人自动钻孔位置精度提高至 ± 0.35 mm。Sepehr等^[66]为了提高工业机器人的位姿精度,采用双摄像机位姿测量传感器(CTrack 780)进行在线校正,提出了一种DPC(动态姿势校正)算法进行精度补偿,在两台工业机器人上进行了DPC实验,实验证明该方法可将机器人位置精度提高至 ± 0.05 mm。

目前,采用激光跟踪仪实时反馈的补偿方法,成本高且自动化程度较低,不适合大规模生产线应用。单目视觉反馈调整方法相比于双目视觉反馈调整方法在结构与标定上较为简单,但其只能获得工件孔位的平面信息,对于钻孔图像更深层次的信息无法获取。而双目视觉可以获取孔位图像的立体信息,从而能够更精准地、多维度地识别孔位图像,因此适用于复杂的航空制造场景。如何根据不同的制造环境选择不同的视觉反馈调整方法应用到机器人自动钻孔定位误差补偿上需更深入地研究,而在线视觉引导反馈调整方法集成度高、工作时更加灵活,更适合航空工业环境要求。

3 发展趋势

针对机器人钻孔加工技术的研究中,由于生产任务的不同,世界各大机构都针对某一特定产品研发出不同的机器人自动钻孔系统。这些机器人自动钻孔系统在突破许多关键技术的同时极大地提高了钻孔效率与质量。

现阶段机器人自动钻削系统研究中,关键技术仍存在较多问题有待于解决。1)离线编程技术中对机器人运动轨迹的规划目前研究还不够深入,主要包括加工序列、加工路径、轨迹规划,它们是指导机器人钻孔加工的核心,也直接影响着机器人自动钻孔系统的效率与质量。对于离线编程机器人运动轨迹的问题上,未来应考虑如何将现有算法进行改进或融合,以达到最优运动轨迹,避免干涉情况并提高钻孔加工效率。同时也应考虑钻孔工艺中冗余机器人如何避开奇异点和极限点,获得机器人最佳钻孔位姿。2)钻孔终端执行器技术中,设计时仍存在功能不全、结构不紧凑、功能单一等问题。终端执行器作为机器人自动钻孔系统的执行装置在未来的研究中应考虑如何将执行器进行模块化设计,并结合多传感器融合技术通过对数据的采集与处理实时反馈到控制系统,以达到高集成度、高自动化、高效率、性能可靠、加工对象广泛的目的。3)系统误差补偿技术中利用激光跟踪仪跟踪靶标进行闭环补偿的方法,虽然一定程度上提高了机器人的绝对定位精度,但该方法存在受环境因素影响较大的问题,而在线视觉实时反馈的方法可以将相机集成在终端执行器中,在节省机器人加工系统工作空间的同时可极大地提高机器人钻削系统的灵活度。对于机器人自动钻孔误差补偿的问题上,未来应考虑如何结合离线和在线两种补偿方法,增加机器人自动钻孔误差补偿效率,提高机器人自动钻孔精度以满足飞机装配钻孔中高质量的要求。这些关键技术的发展和成熟的同时,应努力早日把研究成果转化成生产力,促进自动与智能加工技术升级换代,对工业生产方式的高质量发展有重要的现实意义。

4 结束语

本文介绍了截至 2021 年国内外航空工业典型的机器人钻孔系统,列举了各钻孔系统的主要特点和性能指标,提炼出机器人自动钻孔系统的主要关键技术,分别是机器人钻孔离线编程、终端执行器、系统误差补偿,梳理了各关键技术存在的问题和可能的解决方案,最后对各关键技术的发展方向做出了展望。

参考文献:

- [1] FROMMKNECHT A, KUEHNLE J, EFFENBERGER I, et al. Multi-sensor measurement system for robotic drilling[J]. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 2017, 47: 4–10.
- [2] CIRILLO P, MARINO A, NATALE C, et al. A low-cost and flexible solution for one-shot cooperative robotic drilling of aeronautic stack materials[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, 50(1): 4602–4609.
- [3] GARNIER S, SUBRIN K, WAIYAGAN K. Modelling of robotic drilling[J]. *Procedia cirp*, 2017, 58: 416–421.
- [4] KLIMCHIK A, AMBIEHL A, GARNIER S, et al. Experimental study of robotic-based machining[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(12): 174–179.
- [5] DEVLIEG R. Expanding the use of robotics in airframe assembly via accurate robot technology[J]. *SAE international journal of aerospace*, 2010, 3(1): 198–203.
- [6] DEVLIEG R, SITTON K, FEIKERT E, et al. Once (one-sided cell end effector) robotic drilling system[EB/OL]. (2002–09–30)[2020–02–02].<https://doi.org/10.4271/2002-01-2626>.
- [7] DEVLIEG R, FEIKERT E. One-up assembly with robots [EB/OL].(2008–09–16)[2020–12–12].<https://doi.org/10.4271/2008-01-2297>.
- [8] DEVLIEG R. High-accuracy robotic drilling/milling of 737 inboard flaps[J]. *SAE international journal of aerospace*, 2011, 4(2): 1373–1379.
- [9] BARTON E, WOLF R. Dramatic automatic fastening system with single robot positioner [EB/OL].(2017–09–19) [2021–10–12]. <https://doi.org/10.4271/2017-01-2078>.
- [10] WHINNEM E, LIPCZYNSKI G, ERIKSSON I. Development of orbital drilling for the boeing 787[J]. *SAE international journal of aerospace*, 2008, 1(1): 811–816.
- [11] LOGEMANN T. Mobile robot assembly cell (RACe) for drilling and fastening[EB/OL].(2016–09–19)[2021–11–02].<https://doi.org/10.4271/2016-01-2078>.
- [12] MUELLER-HUMMEL P, Meiners C. New concept on drills up to 5/8" (16mm) for one shot IT8 robot application [EB/OL].(2012–09–10)[2021–05–21]. <https://doi.org/10.4271/2012-01-1865>.
- [13] WAURZYNIAK P. Aerospace automation stretches beyond drilling and filling[J]. *Manufacturing engineering*, 2015, 154(04): 73–86.
- [14] EVERHART T. Neighboring mobile robot cell with drilling and fastening international [EB/OL]. [2017–01–20]. <http://doi:10.4271/2017-01-2094>.
- [15] MÖLLER C, SCHMIDT H C, KOCH P, et al. Machining of large scaled CFRP-Parts with mobile CNC-based robotic system in aerospace industry[J]. *Procedia manufacturing*, 2017, 14: 17–29.

- [16] VON DRIGALSKI F, HAFI L E, ELJURI P M U, et al. Vibration-reducing end effector for automation of drilling tasks in aircraft manufacturing[J]. *IEEE robotics and automation letters*, 2017, 2(4): 2316–2321.
- [17] NEUMANN K E. True mobile/portable drilling and machining, a paradigm shift in manufacturing[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, SAE International, 2017: 10.4271/2017-01-2084.
- [18] ZHAN Qiang, LIU Zengbo, CAI Yao. A back-stepping based trajectory tracking controller for a non-chained nonholonomic spherical robot[J]. *Chinese journal of aeronautics*, 2008, 21(5): 472–480.
- [19] NGUYEN H N, ZHOU Jian, KANG H J, et al. Robot geometric parameter identification with extended Kalman filtering algorithm[M]//Communications in Computer and Information Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 165–170.
- [20] NGUYEN H N, ZHOU Jian, 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.
- [21] WANG Wei, TIAN Wei, LIAO Wenhe, et al. Identifying Chinese herbal medicine by image with three deep CNNs[C]//CCEAI 2021: Proceedings of the 5th International Conference on Control Engineering and Artificial Intelligence. New York: ACM, 2021: 1–8.
- [22] LI M, TIAN W, HU J, et al. Study on shear behavior of riveted lap joints of aircraft fuselage with different hole diameters and squeeze forces[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 127: 105499.
- [23] LIU Hua, ZHU Weidong, KE Yinglin. Pose alignment of aircraft structures with distance sensors and CCD cameras[J]. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 2017, 48: 30–38.
- [24] LIU Hua, ZHU Weidong, DONG Huiyue, et al. A helical milling and oval countersinking end-effector for aircraft assembly[J]. *Mechatronics*, 2017, 46: 101–114.
- [25] LIU hua, ZHU weidong, DONG huiyue, et al. An adaptive ball-head positioning visual servoing method for aircraft digital assembly[J]. *Assembly automation*, 2019, 39(2): 287–296.
- [26] MARTÍNEZ R, CASTILLO O, AGUILAR L T. Optimization of interval type-2 fuzzy logic controllers for a perturbed autonomous wheeled mobile robot using genetic algorithms[J]. *Information sciences*, 2009, 179(13): 2158–2174.
- [27] SAMADI M, OTHMAN M F. Global path planning for autonomous mobile robot using genetic algorithm[C]//2013 International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems. Kyoto, Japan. IEEE, 2013: 726–730.
- [28] TSAI C C, HUANG H C, CHAN Chengkai. Parallel elite genetic algorithm and its application to global path planning for autonomous robot navigation[J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2011, 58(10): 4813–4821.
- [29] THARWAT A, ELHOSENY M, HASSANIEN A E, et al. Intelligent Bézier curve-based path planning model using Chaotic Particle Swarm Optimization algorithm[J]. *Cluster computing*, 2019, 22(2): 4745–4766.
- [30] XIAO Hong, LI Yuan, ZHANG Kaifu, et al. Multi-objective optimization method for automatic drilling and riveting sequence planning[J]. *Chinese journal of aeronautics*, 2010, 23(6): 734–742.
- [31] LIU Jianhua, YANG Jianguo, LIU Huaping, et al. An improved ant colony algorithm for robot path planning [J]. *Soft computing*, 2017, 21(19): 5829–5839.
- [32] LIU Yanmei, CHEN Zhen, WANG Xin, et al. Research on adaptive ant colony algorithm in robot hole making path planning[J]. *International journal of control and automation*, 2017, 10(5): 189–198.
- [33] TIAN Wei, ZHOU Weixue, ZHOU Wei, et al. Auto-normalization algorithm for robotic precision drilling system in aircraft component assembly[J]. *Chinese journal of aeronautics*, 2013, 26(2): 495–500.
- [34] ERKORKMAZ K, ALZAYDI A, ELFIZY A, et al. Time-optimal trajectory generation for 5-axis on-the-fly laser drilling[J]. *CIRP annals*, 2011, 60(1): 411–414.
- [35] HUO Liguu, BARON L. The self-adaptation of weights for joint-limits and singularity avoidances of functionally redundant robotic-task[J]. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 2011, 27(2): 367–376.
- [36] ZARGARBASHI S H H, KHAN W, ANGELES J. Posture optimization in robot-assisted machining operations[J]. *Mechanism and machine theory*, 2012, 51: 74–86.
- [37] LÉGER J, ANGELES J. Off-line programming of six-axis robots for optimum five-dimensional tasks[J]. *Mechanism and machine theory*, 2016, 100: 155–169.
- [38] LA H M, LIM R S, BASILY B B, et al. Mechatronic systems design for an autonomous robotic system for high-efficiency bridge deck inspection and evaluation[J]. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 2013, 18(6):

- 1655–1664.
- [39] JIAO Jiachen, TIAN Wei, LIAO Wenhe, et al. Processing configuration off-line optimization for functionally redundant robotic drilling tasks[J]. *Robotics and autonomous systems*, 2018, 110: 112–123.
- [40] LIANG Jie, BI Shusheng. Design and experimental study of an end effector for robotic drilling[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2010, 50(1/2/3/4): 399–407.
- [41] HEISEL U, PFEIFROTH T. Influence of point angle on drill hole quality and machining forces when drilling CFRP[J]. *Procedia cirp*, 2012, 1: 471–476.
- [42] NORGIA M, MELCHIONNI D, MAGNANI A, et al. High-speed self-mixing laser distance sensor[J]. *AIP conference proceedings*, 2014, 1600(1): 422–425.
- [43] LAZARO GALILEA J L, LAVEST J M, LUNA VAZQUEZ C A, et al. Calibration of a high-accuracy 3-D coordinate measurement sensor based on laser beam and CMOS camera[J]. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 2009, 58(9): 3341–3346.
- [44] RAO Gang, WANG Guolei, YANG Xiangdong, et al. Normal direction measurement and optimization with a dense three-dimensional point cloud in robotic drilling[J]. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 2018, 23(3): 986–996.
- [45] GAO Yuhao, WU Dan, DONG Yunfei, et al. The method of aiming towards the normal direction for robotic drilling[J]. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 2017, 18(6): 787–794.
- [46] GONG M, YUAN P, WANG T, et al. Intelligent verticality-adjustment method of end-effector in aeronautical drilling robot[J]. *Bjng Hangkong Hangtian Daxue Xuebao/Journal of Bjng University of Aeronautics and Astronautics*, 2012, 38(10): 1400–1404.
- [47] YUAN Peijiang, WANG Qishen, SHI Zhenyun, et al. A micro-adjusting attitude mechanism for autonomous drilling robot end-effector[J]. *Science China information sciences*, 2014, 57(12): 1–12.
- [48] OLSSON T, HAAGE M, KIHLMAN H, et al. Cost-efficient drilling using industrial robots with high-bandwidth force feedback[J]. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 2010, 26(1): 24–38.
- [49] JIN Long, SHI Xin, DONG Huiyue, et al. Study on robot automatic drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)[J]. *Advanced materials research*, 2014, 889/890: 1144–1149.
- [50] Hellstern C. Investigation of interlayer burr formation in the drilling of stacked aluminum sheets[J]. *georgia institute of technology*, 2009, 57(1): 33–46.
- [51] MELKOTE S N, NEWTON T R, HELLSTERN C, et al. Interfacial Burr Formation in Drilling of Stacked Aerospace Materials[C]//*Burrs-Analysis, Control and Removal*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 89–98.
- [52] KIM S J, JEON S M, NAM J K, et al. Closed-loop control of a self-positioning and rolling magnetic microrobot on 3D thin surfaces using biplane imaging[J]. *IEEE transactions on magnetics*, 2014, 50(11): 1–4.
- [53] ERKORKMAZ K, ALZAYDI A, ELFIZY A, et al. Time-optimized hole sequence planning for 5-axis on-the-fly laser drilling[J]. *CIRP annals*, 2014, 63(1): 377–380.
- [54] 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.
- [55] MA Le, BAZZOLI P, SAMMONS P M, et al. Modeling and calibration of high-order joint-dependent kinematic errors for industrial robots[J]. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 2018, 50: 153–167.
- [56] ZENG Yuanfan, TIAN Wei, LIAO Wenhe. Positional error similarity analysis for error compensation of industrial robots[J]. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 2016, 42: 113–120.
- [57] 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*, 2016, 88(9-12): 2745–2755.
- [58] TIAN Wei, ZENG Yuanfan, ZHOU Wei, et al. Calibration of robotic drilling systems with a moving rail[J]. *Chinese journal of aeronautics*, 2014, 27(6): 1598–1604.
- [59] YUAN Peijiang, CHEN Dongdong, WANG Tianmiao, et al. A compensation method based on extreme learning machine to enhance absolute position accuracy for aviation drilling robot[J]. *Advances in mechanical engineering*, 2018, 10(3).<https://doi.org/10.1177/1687814018763411>
- [60] SULZER J, KOVAČ I. Enhancement of positioning accuracy of industrial robots with a reconfigurable fine-positioning module[J]. *Precision engineering*, 2010, 34(2): 201–217.
- [61] LIU Hua, ZHU Weidong, DONG Huiyue, et al. An improved kinematic model for serial robot calibration based

- on local POE formula using position measurement[J]. *Industrial robot:an international journal*, 2018, 45(5): 573–584.
- [62] ZHU Weidong, MEI Biao, YAN Guorui, et al. Development of a monocular vision system for robotic drilling[J]. *Journal of Zhejiang University Science C*, 2014, 15(8): 593–606.
- [63] ZHU Weidong, MEI Biao, YAN Guorui, et al. Measurement error analysis and accuracy enhancement of 2D vision system for robotic drilling[J]. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 2014, 30(2): 160–171.
- [64] ZHAN Qiang, WANG Xiang. Hand-eye calibration and positioning for a robot drilling system[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2012, 61(5/6/7/8): 691–701.
- [65] LIU Yuanwei, YUAN Peijiang, CHEN Dongdong, et al. Simultaneous calibration of hand-eye relationship, robot-world relationship and robot geometric parameters with stereo vision[M]//*Communications in Computer and Information Science*. Singapore: Springer Singapore, 2017: 462–475.
- [66] SEPEHR G, SHU Tingting, AHMED J, et al. Online pose correction of an industrial robot using an optical coordinate measure machine system[J]. *International journal of*

advanced robotic systems, 2018, 15(4).<https://doi.org/10.1177/1729881418787915>.

作者简介:



付鹏强,副教授,博士,中国机械工程学会生产工程分会(机床)委员会委员,中国振动工程学会动态测试专业委员会会员,主要研究方向为机器人自动制孔加工技术、精密超精密加工与检测技术。主持和参与国家科技重大专项、国家自然科学基金、黑龙江省自然科学基金、企事业委托项目等科研项目 20 余项。发表学术论文 20 余篇。



苗宇航,硕士,主要研究方向为机器人加工、复合材料加工、动力电池设计。参与国家自然科学基金、黑龙江省自然科学基金等,专利 10 余项,发表学术论文 3 篇。



王义文,教授,博士,黑龙江省刀具技术协会理事,中国振动工程学会动态测试专业委员会委员。主要研究方向为超硬材料加工、制造过程检测技术、机电产品开发。主持国家 863 项目、国家重大专项、黑龙江省应用技术研究项目等多个项目。发表学术论文 20 余篇。

第 18 届中国智能系统会议

中国智能系统会议是由中国人工智能学会智能空天系统专业委员会发起的系列学术会议,其宗旨是为本领域的专家学者、工程技术人员以及研究生提供一个学术交流的平台,以推动我国智能系统相关理论、技术与应用的发展。第 18 届中国智能系统会议(CISC2022)将于 2022 年 10 月 15-16 日在北京市召开。

本次会议由中国人工智能学会主办,中国人工智能学会智能空天系统专业委员会与中国仿真学会人工智能仿真技术专业委员会协办,北京精密机电控制设备研究所、北京航天自动控制研究所、中国航天科技集团公司烽火机械厂和北京航空航天大学联合承办。会议论文集将由 Springer 出版社在 Lecture Notes in Electrical Engineering 系列正式出版, EI 收录。

第 18 届中国智能系统会议(CISC2022)已开放注册,请查阅附件《CISC2022_会议注册通知》、填写《CISC2022 个人信息注册表》完成会议注册工作。如遇任何疑问,请发送至邮箱 cisc2022@126.com 或扫描页面下方的二维码关注 CISC2022 微信公众号进行反馈。

感谢您对本次大会的大力支持,期待与您在首都北京相聚!

