

航空制造领域移动机器人加工系统研究综述*

郑 炜¹,杜坤鹏¹,陈 航²,林 伟¹,王 刚²,张益铭²,王战玺²

(1. 中航飞机股份有限公司制造工程部,西安 710089;

2. 西北工业大学机电学院,西安 710072)

[摘要] 移动机器人加工系统在航空大部件装配领域应用广泛。由于移动机器人加工系统脱离定点作业模式进行移动加工,在实际加工过程中,其大部件待加工部分的高精度定位以及切削加工过程的加工稳定性问题必须要得到研究和解决。通过对国内外先进移动机器人加工系统的研究综述,重点研究移动状态下大部件高精度定位技术以及加工过程中的振动抑制问题,以实现移动机器人的稳定切削加工,并对有待解决的问题及未来的研究方向进行了讨论和展望。

关键词: 移动机器人;高精度定位;动力学模型;自适应控制

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.09.036



郑 炜

高级工程师,主要从事军民机用飞机装配技术研究,先后参与某型机短舱吊挂、MA60 中外翼、C919 外翼、ARJ21 外翼翼盒、MA700 外翼等部件的研制工作。2016 年获全国青年岗位能手,2018 年荣获 C919 首飞二等功。

近年来,随着全球制造业智能化的发展趋势,以工业机器人为代表的智能制造装备的发展受到国内外自动化生产线的广泛关注^[1]。在航空制造领域,因大型零部件的刚度相对较低,其自身变形和装配误差的累计不容忽视。一般需要现场切削加工待连接部位以保证装配精度和质量。由于待加工装配的部件,如飞机机翼、端面、翼盒等部件尺寸较大、外形复杂,装配过程与方法有别于一般的机械产品^[2],所以传统的数控机床和定点作业的机器人无法使用^[3]。人工装配对工人技术水平要求高,且效率低、工作强度大、一致性差。为此,移动平台搭载工业机器人构成的移动装配系统,效率高、可达性好、装配精度稳定以及快速重构适应大型低刚度复杂构件的装配作业^[4-5],受到

学术领域以及制造领域的广泛关注。

工业机器人相比数控机床系统刚度较低,再加上移动平台的非固定性,其应用于航空领域刚度低、厚度小的大部件加工装配时,低频切削力作为动态激振力极易引起末端刀具严重偏离期望的加工轨迹,进一步引发切削颤振,导致加工精度下降、表面加工质量差,甚至造成产品报废、机器人故障等危险后果^[6]。同时,大部件装配的定位精度要求很高(如机翼两端发房距离 24m,要求装配后对称轴线位置公差小于 0.1mm),这就要求机器人移动加工装配系统在整个加工区域具备高精度定位。大型复杂部件通常需要采用大量工装型架来进行定位,产品及工装与机器人末端执行器干涉,影响移动机器人加工系统基准检测的可达性。大部件

* 基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2018607C004); 陕西省创新能力支撑计划(2018KJXX-006); 中央高校基本科研业务费资助项目(31020190503002)。

与移动台之间的相对位置难以实时监测,对于大型复杂部件的每一个不同工位,均需要移动式机器人进行一次区域基准检测,这样多工位分步化的基准检测严重影响检测效率和精度。

近年来,移动机器人加工系统在国内外航空制造中已经有了初步应用,并取得了一定的成果和技术进步。本文针对大型低刚度部件的移动机器人加工系统以及相关的技术现状进行综述,重点研究大尺寸、高精度定位以及加工稳定性等问题,并对尚未解决的问题以及未来的研究方向进行讨论和展望。

机器人移动加工技术与应用

移动机器人加工系统一般由工业机器人、移动平台以及多功能末端执行器组成,末端执行器通常会集成电主轴、压力脚、测量传感单元及其他附件^[7]。在航空大型低刚度部件加工装配过程中,机器人加工系统拥有更高的空间可达性和更小的安装空间要求^[8],因此可以更灵活地执行自动化加工任务,在钻、铣、磨等切削加工甚至铆接等装配作业也得到应用^[9]。

德国弗劳恩霍夫研究所开发出了模块化、自适应、可移动机器人铣削系统(图1),并在空客A320飞机的7m×2m的碳纤维增强复合材料垂直尾翼面上得到应用,提高了大型低刚度复合材料构件的加工精度、效率、质量^[1]。英国BAE公司开发了针对复合材料的全自动精确钻孔加工单元,有效解决了复合材料铆钻设备笨重、效率低和加工质量不稳定的问题^[10]。由于传统的钻削加工切削力大,表面质量难以控制^[11],近年来,新兴的螺旋铣削制孔工艺和超声波辅助方法成功应用在难加工材料的加工中^[12],改变了材料的去除机理,减小加工切削力,改善

了毛刺、撕裂等加工缺陷^[13]。刘长毅等^[4]以螺旋铣孔工艺时域解析切削力建模、时域与频域切削过程动力学建模、切削颤振及切削稳定性建模为基础,研究了螺旋铣孔的切削参数工艺规划模型和方法,并通过试验对所规划的工艺参数进行验证。高航等^[15]采用螺旋铣削与超声振动复合加工工艺针对碳纤维树脂基复合材料进行制孔加工试验,结果表明增加超声振动幅值、降低刀具每齿材料去除量可有效减少孔出口处的毛刺、撕裂等加工缺陷。图2和3分别为用于空直公司某型直升机机身总



图1 移动机器人系统加工A320飞机复合材料垂尾翼面

Fig.1 Machining of composite vertical tail airfoil of A320 aircraft with mobile robot system



图2 某型直升机自动化装配系统

Fig.2 Automatic assembly system of a helicopter

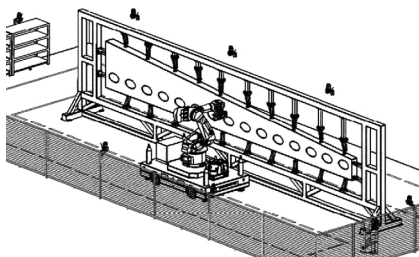


图3 大飞机翼盒机器人制孔系统

Fig.3 Robot drilling system for wing box of large aircraft

装机器人自动化装配系统^[16]和基于AGV搭载机器人的移动机翼数字化制孔系统^[17]。

其他切削加工领域的工业机器人应用也在逐步增加,北京航空航天大学设计了3P3R构型的砂带机器人,在对待加工表面点建模的基础上,应用蒙特卡洛法对复杂曲面工件的磨削加工轨迹进行仿真,得到了最接近实际加工时的机器人姿态,验证了待加工工件的可加工性^[18];浙江大学针对机器人精镗飞机交点孔的精镗系统,通过分析颤振发生时的压脚位移信号,提出基于Hilbert-Huang变换的颤振特征提取方法,实现机器人镗孔颤振的快速识别^[19]。

综上,针对大型低刚度部件的加工和装配,移动机器人加工系统因其高灵活性、大工作空间而具有极大优势,正逐步成为航空大型零部件装配加工领域的发展趋势。而当机器人加工系统脱离定点作业模式进行移动加工时,必然会面临多工位分步化基准检测效率低、精度差以及动态低频切削力诱导的切削颤振等问题,因此,为提高机器人移动加工的稳定性和表面质量,就必须研究其所面临的大部件、高精度定位问题和切削加工稳定性问题。

机器人移动加工系统的定位与检测

目前在航空大型零部件自动化生产作业中,移动工业机器人得到广泛的应用,然而大部件与移动台之间的相对位置难以实时监测,其空间定位精度影响到整个加工装配的精度,进而直接影响飞机的动力学外形。为了提高航空零部件的加工装配精度,移动机器人加工系统的大部件高精度定位与检测问题亟待解决。

为满足大尺寸零部件加工和飞机装配对大尺寸、高精度、多任务和快速测量的需求,克服大尺寸零部件在加工装配中多工位分步基准检测

效率低、柔性差的问题,设计了高效、精准的与飞机数字化装配相匹配的动态基准标定方法,对多工位的加工装配坐标系的快速转换方法进行研究。目前,数字化光学测量在航空装配中成功应用(如 F-22、F-35 战机、波音 787 等),提高了装配精度、效率及自动化水平,针对航空复杂构件的协同测量技术^[20]、大尺寸高精度坐标控制场的构件与误差评定^[21]、统一坐标测量网技术^[22]等,为数字化测量技术在航空等领域的应用奠定了一定的基础。刘洋^[23]基于激光跟踪仪来标定机器人实际位置和名义位置的误差,建立虚拟末端执行器坐标系,将末端位置误差作为输入,对运动学参数进行误差补偿,试验表明该方案不引入新误差源,能够提升机器人绝对定位精度。浙江大学艾小祥^[24]设计了一套包含激光跟踪仪、扫描仪及自动化扫描软件等的自动化扫描测量系统,对机翼关键特征采取不同的扫描策略,优化扫描路径,使空行程减少 70%,提高扫描效率,辅助协调机翼和壁板姿态,指导装配,评价装配质量。

移动工业机器人在大尺寸零部件加工和装配中,存在动静态误差、机械加工、坐标转换算法、人为操作失误、测量仪器等因素引起的残留误差,移动平台的运动精度也难以保证,为提高加工装配效率,保证加工装配的精度,需要设计基于光学测量系统的动态位姿精度补偿技术,研究工装坐标系、工件坐标系、相机坐标系、机器人坐标系、世界坐标系等加工装配所需坐标系快速建立与相互转换关系的方法,实时检测控制机器人末端和移动平台的位置,同时为光学测量系统提供精度补偿方案。黄希等^[25]研制了飞机装配系统,着重研究精度补偿技术,解决机器人绝对定位精度低的问题,并试验验证了其技术指标能够满足飞机制造的精度、质量、效率等要求。

为确定移动平台与大部件之间相对位置关系,往往需要采用视觉手段对大部件表面进行检测,进而实现移动机器人加工系统的定位。然而由于飞机大型构件尺寸较大、待测特征多、测量精度要求高,现有检测技术无法支持一次性测量,通常采用多个区域分段测量,并将测量数据进行拼接。拼接的技术方法可以根据图像特征或几何特征来进行,但分段区域的不合理和大型构件复杂表面特征,往往存在局部遮挡和特征匹配不稳定等问题。Nister 等^[26]基于 Harns 角点算法实现图像特征匹配,实现机器人的定位,同时采用试验,验证双目视觉系统较单目具有处理速度更快、获取图像信息多、定位精度高、效果更好等特点。王莹^[27]将 SIFT 算法和 Harris 角点检测算法结合,使其既具备角点信息又有尺度不变性,试验表明该算法具有一定的精度和很高的稳定性。上述特征匹配法虽精度较高,但计算量大,且可能提取不到足够的特征点,针对这一问题,西南交通大学的张一博^[28]将特征点匹配法和光流法融合,规避了光流法的灰度不变的强假设,取长补短,并通过试验验证该算法的精度和实时性,并且能够适应不同工况。由于定位过程中传感器自身的误差和环境不确定性的误差等问题,对机器人的定位检测问题还需要进一步研究。

机器人加工的动力学分析及振动抑制

机器人加工系统是一个复杂的动力学系统,存在严重的非线性和耦合关系,例如关节力、力矩与关节运动参数间可以近似为三角函数关系,各关节的运动相互耦合,关节作用力和外部作用力也相互耦合,机器人加工系统的动力学分析及振动抑制就必须从刚度模型、动力学分析出发对其进行深入研究。

1 机器人动力学分析

机器人机械臂为多连杆串联的结构形式,其结构特点导致机器人整体刚度过低,一般低于 $1\text{N}/\mu\text{m}$,而传统数控机床的刚度大于 $50\text{N}/\mu\text{m}$ ^[29],刚度辨识是动力学分析要解决的问题之一。曲巍崑等^[30]基于传统的刚度映射模型,通过变换机器人姿态以及改变压力脚压力,进行刚度辨识试验,并采用遗传算法进行位姿优化,提高机器人加工系统的精度和加工性。Guo 等^[31]提出了一种机械加工应用中机器人姿态的优化方法,可用于确定在某一刀具中心位置具有最大刚度的机器人姿态,通过优化加工路径上不同刀具中心位置的机器人姿态,提高机器人的刚度和颤振稳定性。机器人动力学建模过程中,包括末端执行器在内的各个关节的刚度、阻尼等动力学参数辨识同样也是技术难点。Reinl 等^[32]将附加关节柔度的机器人多刚体动力学模型与提供过程力的材料移除模拟相结合,通过调整模型参数进行仿真,实现机器人铣削过程中的路径偏差的分析、预测及补偿。Cen 等^[33]建立了一个考虑机器人动力学效应和外力对机器人刚度影响的动态铣削力模型,当外载荷为周期性切削力时,动力学参数的辨识更为复杂。陈柏等^[34]通过 Newton-Euler 法建立关节型机器人刚体动力学模型,用非线性摩擦模型描述关节间摩擦特性,优化辨识所用的激励轨迹,采用人工蜂群算法辨识机器人动力学参数,并验证基于该模型的前馈控制器能够提高轨迹跟踪精度。

上述研究主要集中在固定机械臂的加工动力学问题,而针对移动机器人的加工动力学研究还比较缺乏。Tunc 等^[35]从刚度、位置相关动力学和复杂运动链引起的柔度耦合方面研究了移动并联铣削工作台的动力学特性,包括工作台的刚度、奇异性以及与位置相关的动态响应,但只给

出了移动工作台的动态响应分析,并没有考虑加工动力学模型。李浩等^[36]基于多体系统离散时间传递矩阵法的机器人本体和机械臂的整体动力学模型,设置边界条件,定义机器人各部件基本结构参数以及移动机器人的运动规律,为后期控制系统的建立提供了重要的理论依据。由已有的研究可知,机器人移动加工系统动力学分析应主要解决合理建模以及动力学参数辨识两个关键问题,以便研究和揭示机器人加工系统的稳定性规律和振动机理。

2 机器人加工振动问题

以往的研究表明,模态耦合振动诱发的颤振是机器人加工过程中动态失稳的主要原因^[37]。模态耦合颤振分析表明,如果机器人的结构刚度与切削刚度相当,则会产生模态耦合颤振。由于关节臂工业机器人的结构刚度略高于切削刚度,模态耦合颤振是机器人加工过程中的一种主要动力失稳模式,这导致工件表面质量差甚至失效,如图4所示^[38]。为了提高机器人的加工精度以及稳定性,就必须对加工过程中的振动进行有效抑制^[42],传统的位置控制无法满足要求,因此需要对其施加自适应控制,即力/位混合控制,主要分为两种:一种是被动自适应控制,即通过被动结构(如弹簧橡胶盘等)实现缓冲,使系统对于环境具有一定的顺从能力;另一种是主动自适应控制,是把力准确地传递给控制系统,通过控制算法的调节作用,分别对位置和力

制控制试验,验证了基于视觉传感器的挠度反馈振动控制器的有效性。Chen等^[41]提出了一种用于机器人铣削过程中颤振抑制的新型涡流阻尼器设计,结果表明,采用涡流阻尼器可以有效抑制由刀具模态引起的刀尖频率响应函数峰值,提高铣削稳定深度。因此需要揭示切削机器人刚度变化与低频自激振动的内在联系,提出可实现振动抑制的刚度变化条件,研究智能结构控制下机器人加工系统的刚度和动力学特性变化,分析不同机器人位姿和工艺参数下的振动抑制效果。

机器人移动加工过程自适应控制

工业机器人由于机械臂本身刚度不足,导致其具有低刚性特点,使其系统对周期性切削力所导致的加工振动阻抗能力差。同时由于在接触式加工过程(如切削加工)中,不同位置的力不同,因此除了要满足末端执行器的位置精度要求外,还需要对机器人与工件的接触力进行控制^[42],传统的位置控制无法满足要求,因此需要对其施加自适应控制,即力/位混合控制,主要分为两种:一种是被动自适应控制,即通过被动结构(如弹簧橡胶盘等)实现缓冲,使系统对于环境具有一定的顺从能力;另一种是主动自适应控制,是把力准确地传递给控制系统,通过控制算法的调节作用,分别对位置和力

进行误差补偿,可实时响应力的变化,跟踪期望的作用力。

针对机器人力/位控制,国内学者提出了很多的控制策略^[43]:机器人阻抗控制和力/位置混合控制^[44]。陶波等^[3]为实现移动机械臂对工件的恒力匀速磨抛加工,设计了T-S模糊混合控制器,仿真结果表明,采用T-S模糊控制器能够很好地控制移动机器人,实现对工件的恒力匀速打磨。黄婷等^[45]介绍了一种被动柔顺装置,并结合力/位混合控制策略,将柔顺装置的位置偏差反馈给机器人实现位移跟踪和补偿,并对航空叶片进行抛磨,获得了较好的表面工件质量。王洪艳等^[46]提出了一种自适应边界能量法,解决阻抗控制难以解决环境参数变化显著的情况,通过在线估计控制参数提高系统整体性能,保证系统的稳定性。常建等^[47]在对机械臂的力/位混合控制律建模的基础上,利用位置控制和力控制对机械臂末端的运动轨迹进行规划。针对受环境约束的机械臂的控制问题,提出冗余自由度机械臂的适从坐标系建立方法,使得末端执行器能够在任意曲面完成作业任务。Duan等^[48]针对机器人末端执行器与环境的接触力模型,提出了一种新的自适应变阻抗力跟踪控制方法,它能够跟踪动态期望力,并能补偿环境不确定性。

通过目前的研究来看,虽然两种经典控制方法的研究已经为力控制打下了基础,但适用范围和控制效果还具有一定的局限性,机器人多自由度、时变、非线性、强耦合性的特点,以及外部环境的多变性和模糊性,决定了自适应控制研究的必然性。因此需要从低刚性构件对合装配后的回弹量及误差预测方法、切削加工工艺参数的在线预测与补偿、移动机器人动力学模型出发,设计动态载荷反馈调控的力位混合自适应控制器,实现移动机器人的稳定切削加工。

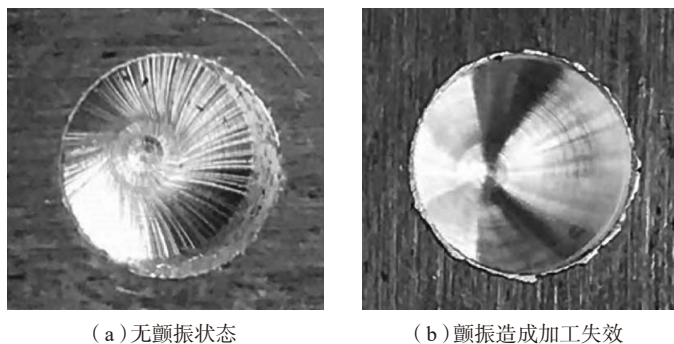


图4 制孔机器人加工过程的颤振现象

Fig.4 Chatter phenomenon in machining process of drilling robot

结论

综上对国内外研究现状的分析, 机器人移动加工系统在航空大部件装配领域有着广阔的应用前景, 为了保证其加工精度、质量和稳定性, 必须要解决机器人加工过程中的大部件高精度定位和加工稳定性控制等问题。目前对大部件作业环境下的高精度定位问题仍在研究阶段, 由于定位过程中传感器自身的和环境不确定性的误差等问题, 需要设计更合理的多信息实时检测控制技术和末端高精度动态补偿来补偿定位误差。机器人周期性动态切削载荷作用下的动力学分析问题可从合理建模和参数辨识两方面入手, 用有限元法、最小二乘法、谐波法等方法进行试验验证, 并考虑加工姿态和外部载荷的影响。目前, 低频模态耦合振动的主动抑制问题以及切削加工过程的自适应控制问题还在起步阶段, 由于机器人为时变和强耦合的复杂体, 系统本身的位姿随时而变, 以及外部环境极大的模糊性, 从移动机器人动力学模型出发, 设计动态载荷反馈调控的力位混合自适应控制器, 实现移动机器人的稳定加工就尤为重要。

目前基于机器人视觉针对机器人移动加工在复杂加工装配环境下的高精度定位问题的研究鲜见; 就加工稳定性方面, 需要对移动机器人的低频切削应力进行自适应控制, 适用的控制技术还较多地处于理论研究和仿真阶段, 具体的应用还需要进一步研究。结合机器人时变耦合的特点, 机器人移动加工力/位混合自适应控制必将具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] 祁萌, 李晓红, 高彬彬. 国外航空领域机器人技术发展现状与趋势分析[J]. 航空制造技术, 2018, 61(12): 97-101.

QI Meng, LI Xiaohong, GAO Binbin. An analysis of the development status and trend

of robotics in the field of aviation abroad[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(12): 97-101.

[2] 冯子明. 飞机数字化装配技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2015.

FENG Ziming. Aircraft digital assembly technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2015.

[3] 陶波, 赵兴伟, 丁汉. 大型复杂构件机器人移动加工技术研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(12): 48-58.

TAO Bo, ZHAO Xingwei, DING Han. Research on mobile robot machining technology of large complex component[J]. Science in China: Technological Science, 2018, 48(12): 48-58.

[4] 秦瑞祥, 邹冀华. 工业机器人在飞机数字化装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2010, 53(23): 104-108.

QIN Ruixiang, ZOU Jihua. Application of industrial robot in aircraft digital assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(23): 104-108.

[5] 房立金, 孙龙飞, 许继谦. 提高机器人结构刚度及关节精度的方法[J]. 航空制造技术, 2018, 61(4): 34-40.

FANG Lijin, SUN Longfei, XU Jiqian. Methods to improve the structural rigidity and joint accuracy of robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(4): 34-40.

[6] 王战玺, 李树军, 赵璐, 等. 移动机器人铣削制孔系统基准检测[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(3): 281-287.

WANG Zhanxi, LI Shujun, ZHAO Lu, et al. Benchmark inspection of milling and hole making system of mobile robot[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 51(3): 281-287.

[7] 王战玺, 张晓宇, 李云飞, 等. 机器人加工系统及其切削颤振问题研究进展[J]. 振动与冲击, 2017, 36(14): 147-155, 188.

WANG Zhanxi, ZHANG Xiaoyu, LI Feifei, et al. Research progress of robot machining system and its cutting chatter[J]. Vibration and Shock, 2017, 36(14): 147-155, 188.

[8] OLABI A, BÉARÉE R, GIBARU O, et al. Feedrate planning for machining with industrial six-axis robots[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(5): 471-482.

[9] 王国磊, 吴丹, 陈慧. 航空制造机器

人现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2015, 58(10): 26-30.

WANG Guolei, WU Dan, CHEN Ken. Current situation and development trend of aviation manufacturing robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(10): 26-30.

[10] BAE. BAE systems: behind the scenes of the F-35 Fighter [EB/OL]. [2017-05-23]. <https://www.themanufacturer.com/articles/bae-systems-behind-the-scenes-of-the-f-35-fighter/>.

[11] ZITOUNE R. Drilling of polymer-matrix composites[J]. Berlin: Springer, 2013.

[12] MEHBUDI P, BAGHLANI V, AKBARI J, et al. Applying ultrasonic vibration to decrease drilling-induced delamination in GFRP laminates[J]. Procedia CIRP, 2013, 6: 577-582.

[13] MAKHDUM F, NORDDIN D N P, ROY A, et al. Ultrasonically assisted drilling of carbon fibre reinforced plastics[J]. Solid State Phenomena, 2012, 188: 170-175.

[14] LIU C, TANG Z A, YANG S, et al. Machining stability and process parameters planning for helical milling operation[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(22): 3022-3027, 3065.

[15] 高航, 孙超, 王焱. 复合材料超声辅助螺旋铣削试验研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(3): 16-20.

GAO Hang, SUN Chao, WANG Yan. Experimental study on ultrasonic assisted spiral milling of composite materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(3): 16-20.

[16] 肖庆东, 甘露, 尚江坤, 等. 复合材料壁板单面紧固件机器人自动钻铆技术[J]. 航空制造技术, 2019, 62(15): 42-48.

XIAO Qingdong, GAN Lu, SHANG Jiangkun, et al. Robot automatic drilling and riveting technology for single side fastener of composite wall panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(15): 42-48.

[17] 张云志, 蒋倩. 大飞机翼盒机器人制孔系统集成技术研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(7): 16-23.

ZHANG Yunzhi, JIANG Qian. Research on the integration technology of drilling system for wing box robot of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(7): 16-23.

- [18] 李东京, 王伟, 贞超, 等. 砂带磨削机器人磨削曲面工件的工作空间及加工轨迹分析[J]. 高技术通讯, 2016, 26(7): 667-676.
- LI Dongjing, WANG Wei, YUN Chao, et al. Workspace and machining trajectory analyses under a belt grinding robot's grinding of curved surface workpieces[J]. Chinese High Technology Letters, 2016, 26(7): 667-676.
- [19] DONG H, WU Y, GUO Y, et al. Chatter analysis and identification in robotic fine boring of aircraft intersection holes[J]. Journal of Zhejiang University. (Engineering Science), 2018, 52(8): 1517-1525.
- [20] 刘胜兰, 罗志光, 谭高山, 等. 飞机复杂装配部件三维数字化综合测量与评估方法[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 409-418.
- LIU Shenglan, LUO Zhiguang, TAN Gaoshan, et al. Three dimensional digital comprehensive measurement and evaluation method for complex assembly parts of aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 409-418.
- [21] PREDMORE R C. Bundle adjustment of multi-position measurements using the Mahalanabis distane[J]. Precision Engineering, 2010, 34(1): 113-123.
- [22] 周闻青, 冷建兴, 叶欣, 等. 基于USMN的大型操纵性水池基础轨道空间位置测量方法研究[J]. 计测技术, 2016(3): 10-13.
- ZHOU Wenqing, LENG Jianxing, YE Xin, et al. Research on space position measurement method of foundation track of large maneuverable pool based on USMN[J]. Measurement Technology, 2016(3): 10-13.
- [23] 刘洋. 机器人标定关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- LIU Yang. Research on key technologies of robot calibration[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [24] 艾小祥. 飞机机翼装配中的扫描路径规划研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- AI Xiaoxiang. Research on scanning path planning in aircraft wing assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [25] 黄希, 王恒, 田威, 等. 基于工业机器人的飞机部件柔性化装配系统研究[J]. 制造业自动化, 2013(23): 143-146.
- HUANG Xi, WANG Heng, TIAN Wei, et al. Research on flexible assembly system of aircraft components based on industrial robot[J]. Manufacturing Automation, 2013(23): 143-146.
- [26] NISTÉR D, NARODITSKY O, BERGEN J R. Visual odometry for ground vehicle applications[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(1): 3-20.
- [27] 王莹. 双目立体视觉图像匹配与目标定位方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- WANG Ying. Research on the method of binocular stereo image matching and target location[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [28] 张一博. 基于视觉里程计的移动机器人定位算法设计与实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- ZHANG Yibo. Design and implementation of mobile robot positioning algorithm based on visual odometer[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [29] CHEN Y, DONG F. Robot machining: recent development and future research issues[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9-12): 1489-1497.
- [30] 曲巍崑, 侯鹏辉, 杨根军, 等. 机器人加工系统刚度性能优化研究[J]. 航空学报, 2013, 34(12): 2823-2832.
- QU Weiwei, HOU Penghui, YANG Genjun, et al. Research on the optimization of rigidity performance of robot machining system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(12): 2823-2832.
- [31] GUO Y, DONG H, KE Y. Stiffness-oriented posture optimization in robotic machining applications[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2015, 35: 69-76.
- [32] REINL C, FRIEDMANN M, BAUER J, et al. Model-based off-line compensation of path deviation for industrial robots in milling applications[C]//Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE, 2011.
- [33] CEN L, MELKOTE S N. Effect of robot dynamics on the machining forces in robotic milling[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 10: 486-496.
- [34] 陈柏, 管亚宇, 吴洪涛, 等. 采用ABC算法的关节机器人动力学参数辨识[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(5): 736-743.
- CHEN Bo, GUAN Yayu, WU Hongtao, et al. Dynamic parameter identification of joint robot using ABC algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 49(5): 736-743.
- [35] TUNC L, T, SHAW J. Experimental study on investigation of dynamics of hexapod robot for mobile machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(5-8): 817-830.
- [36] 李浩, 陈炜, 张增峰, 等. 移动机器人的动力学分析与仿真[J]. 天津理工大学学报, 2016, 32(3): 19-22.
- LI Hao, CHEN Wei, ZHANG Zengfeng, et al. Dynamic analysis and simulation of mobile robot[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2016, 32(3): 19-22.
- [37] WANG J, ZHANG H, PAN Z. Machining with flexible manipulators: critical issues and solutions[M]//NEE Y C. Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. London: Springer, 2006.
- [38] 薛雷, 曾宏伟, 覃程锦, 等. 采用同步压缩变换和能量熵的机器人加工颤振监测方法[J]. 西安交通大学学报, 2019(8): 1-4.
- XUE Lei, ZENG Hongwei, QIN Chengjin, et al. Monitoring method of robot machining chatter using synchronous compression transformation and energy entropy[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019(8): 1-4.
- [39] TOKHI M O. Command shaping techniques for vibration control of a flexible robot manipulator[J]. Mechatronics, 2004, 14(1): 69-90.
- [40] JIANG Z H, GOTO A. Visual sensor based vibration control and end-effector control for flexible robot arms[C]//Proceedings of Industrial Technology, 2005.
- [41] CHEN F, ZHAO H. Design of eddy current dampers for vibration suppression in robotic milling[J]. Advances in Mechanical Engineering 2018, 10(11): 1-15.
- [42] VALENTE A. Reconfigurable industrial robots: A stochastic programming approach for designing and assembling robotic arms[J]. Robotics & Computer Integrated

(下转第49页)

Robot Positioning System for Assembly of Thin-Walled Rotating Composite Components of Aero-Engine

ZHANG Yunzhi, SUN Nianjun, LIU Jiandong, ZHAO Fulong, JIANG Qian
(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] There are some important thin-walled rotary composite components in aero-engine, the manufacturing and assembly process of which include positioning, drilling-riveting, glue coating and other processes. The positioning efficiency and accuracy are related to the production capacity and assembly quality. In order to improve assembly quality and efficiency, the authors have developed a positioning system for the automatic assembly of the composite components which applies a 4-DOF manipulator based on RV transmission. It is proven to realize the automatic grasping and high-precision positioning of the composite components, as well as to solve the problem of low accuracy and efficiency of the manual posture alignment in the assembly of the composite components. This article could establish the foundation for further realizing the intelligent manufacturing of the aero-engine composite components.

Keywords: Aero-engine; RV reducer; Robotic manipulator; Positioning system; Drilling and riveting

(责编 大漠)

(上接第41页)

Manufacturing, 2016, 41: 115–126.

[43] SANTIS A D, SICILIANO B, LUCA A D, et al. An atlas of physical human-robot interaction[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, 43(3): 253–270.

[44] KUMAR N, PANWAR V, SUKAVANAM N, et al. Neural network based hybrid force/position control for robot manipulators[J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2011, 12(3): 419–426.

[45] 黄婷, 孙立宁, 王振华, 等. 基于被动柔顺的机器人抛磨力/位混合控制方法[J]. *机器人*, 2017, 39(6): 776–785.

HUANG Ting, SUN Lining, WANG

Zhenhua, et al. A hybrid force / position control method for robot polishing based on passive compliance[J]. *Robotics*, 2017, 39(6): 776–785.

[46] 王洪艳, 刘春洁, 黄智. 基于自适应边界能量法的柔顺力控制研究[J]. *电子科技大学学报*, 2017, 46(6): 151–156.

WANG Hongyan, LIU Chunjie, HUANG Zhi. Research on compliance control based on adaptive boundary energy method[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology*, 2017, 46(6): 151–156.

[47] 常健, 王亚珍, 李斌. 基于力/位混合算法的7自由度机械臂精细操控方法[J]. *机器人*, 2016, 38(5): 531–539.

CHANG Jian, WANG Yazhen, LI Bin. Fine control method of 7-DOF manipulator based on force/position hybrid algorithm[J]. *Robotics*, 2016, 38(5): 531–539.

[48] DUAN J, GAN Y, CHEN M, et al. Adaptive variable impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environment[J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2018, 102: 54–65.

通讯作者: 王战玺, 副教授, 主要研究方向为机器人应用技术和智能制造, 主持国防基础科研、国家自然科学基金、省重点研发计划等各类项目 10 余项, E-mail: zwxwang@nwpu.edu.cn.

Review of Robot Mobile Machining System in Aviation Manufacturing

ZHENG Wei¹, DU Kunpeng¹, CHEN Hang², LIN Wei¹, WANG Gang²,
ZHANG Yiming², WANG Zhanxi²

(1. Manufacturing Engineering Department of AVIC Aircraft Co., Ltd., Xi'an 710089, China;
2. School of Mechanical Engineering, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] The mobile robot machining system is widely used in the field of aeronautical large parts assembly. Because the mobile robot machining system is separated from fixed-point operation mode for mobile machining, in actual machining process, the high-precision positioning of large parts to be machined and the machining stability of machining process must be studied and solved. Based on the review of the research on advanced mobile robot machining system at home and abroad, this paper focuses on the high-precision positioning technology of large parts in the mobile state and vibration suppression in the process of machining, in order to realize the stable machining of mobile robot, and discusses and prospects the problems to be solved and future research direction.

Keywords: Mobile robot; High-precision positioning; Dynamic model; Adaptive control

(责编 大漠)