

# 协作机器人及其在航空制造中的应用综述

吴丹<sup>1</sup>, 赵安安<sup>2</sup>, 陈 愚<sup>1</sup>, 杜坤鹏<sup>2</sup>, 张继文<sup>1</sup>, 杨亚鹏<sup>2</sup>

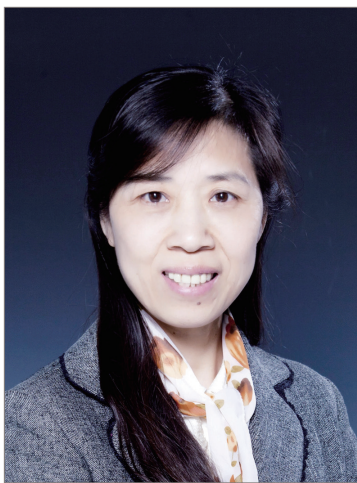
(1. 清华大学机械工程系, 北京 100084;

2. 航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089)

[摘要] 由于技术限制和经济风险,实现航空产品制造过程完全自动化具有相当的难度,而将安全易用的协作机器人与操作人员共享作业空间,充分发挥各自的长处,分工协同工作,是解决传统工业机器人难以应对的低成本、高效率、柔性化、复杂作业自动化难题的有效途径。论文在分析协作机器人产生背景和4种人机协作方式的基础上,描述了空客和BAE公司旨在提高质量和效率的未来工厂计划中的协作机器人项目,详细介绍了协作机器人在飞机装配中的应用研究实例,阐述了协作机器人本体设计、力感知与控制、机器人行为设计和自主学习等共性关键技术。未来协作机器人将以其安全、高效、柔性、智能的特点在工业生产中发挥更大的作用。

关键词: 航空制造; 飞机装配; 人机协作; 协作机器人; 安全

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.10.024



吴丹

教授、博士生导师,主要从事先进制造装备与工艺的学术研究与工程应用开发,承担多项国防重大型号、国家自然科学基金和863计划项目。在国内外核心期刊和国际会议上发表论文140余篇,SCI收录30余篇,合编教材和手册5部,获授权发明专利40余项。荣获国家教委科技进步奖3项,北京市高等教育教学成果奖1项。

航空制造是产品对象复杂、高精尖技术密集和资金密集的复杂过程,要实现完全的自动化具有相当的难度,需要巨大的资金投入。以飞机装配为例,由于其外形复杂、零部件数量巨大、协调关系复杂,装配过程与方法有别于一般的机械产品<sup>[1-2]</sup>,因此,采用先进制造技术、自动化装备与生产线对于保证飞机装配质量、提高装配效率具有重要意义。然而飞机产品种类繁多、生产量较小、装配工况复杂,实现完全自动化的装配作业不仅经济性差,而且技术难度很大。柔性的、人机协同半自动的装配过程与设备可提供一种综合效果更佳<sup>[3-4]</sup>的解决方案,而协作机器人在航空制造中的应用就是这种解决方案的体现<sup>[5-7]</sup>。

## 协作机器人及其特点

按照2011年发布的ISO

10218-2的定义<sup>[8-9]</sup>,协作机器人(Collaborative robot, Cobot)是指在确定的协作工作空间内与人直接交互的机器人。期望协作机器人具有足够的安全性,可以融入人类的工作环境,与人形成一种工作伙伴的关系,相互感知、相互协助。

### 1 协作机器人的提出

协作机器人的想法起源于1995年GM Motor Foundation赞助的一个项目,旨在研究能辅助装配线上的操作人员更好地完成装配作业。研究人员提出采用机器人辅助操作并找出使其足够安全的方法,以便机器人能与工人协同工作<sup>[10]</sup>。1996年,美国西北大学的Colgate教授和Peshkin教授发表论文首次提出了协作机器人概念<sup>[11-12]</sup>。但是协作机器人快速发展则是始于2005年由欧盟第六框架计划资助的SME(Small and Medium-sized Enterprises)机器

人项目,并持续得到第七框架计划资助<sup>[13]</sup>,ABB、KUKA等机器人厂商均参加了该项目。该项目是通过机器人技术增强中小企业的劳动力水平,降低成本,避免劳动力外包。从这个角度看,设计协作机器人的初衷是为了满足中小企业的生产需求。然而,协作机器人出现的根本原因则是与传统工业机器人无法满足纷繁复杂的产品生产要求密切相关。

传统工业机器人是一种能进行高速、高刚度、高精度重复操作的自动化设备,主要应用于结构化环境中独立完成操作任务。要求事先确定操作对象的形状和位置,并且能预先估计和避免机器人与环境及人员的碰撞,这与工业机器人初始设计未考虑与人一起作业的安全性有关,因此,生产现场一般都会使用防护栏、光幕传感器或通过安全区域设计等技术把机器人和人员隔离。然而对于产品种类多、生产量小、柔性要求高的场合,基于工业机器人的相对刚性自动化的生产调整将变得非常困难,显著增加调整周期和成本;另一方面,工业机器人固有的高刚度使其只能以非常受限的方法与外界交互,对于像小零件装配、狭小空间作业等自动化作业难度大,要求机器人灵活性高的场合,工业机器人往往是望尘莫及。此外,工业机器人复杂的编程与示教方式需要为机器人培养和配备专业的操作人员,每次任务的调整都需要经过编程、仿真、试运行等步骤,生产准备时间长<sup>[14]</sup>。

将协作机器人融入人类作业环境实现人机协同作业,就是要充分利用彼此的长处,由人类负责完成对柔性、触觉、灵活性要求比较高的工序,而机器人则利用其快速、准确、恶劣环境工作能力强的特点来负责完成重复性的工作。通过人机协作,保证作业质量,改善人作业的舒适性,实现人机协同的安全、柔性、高效的作业,解决传统工业机器人难以应对的

低成本、高效率、柔性化、复杂作业自动化的应用需求<sup>[15-17]</sup>。

目前世界领先的协作机器人有优傲(Universal Robots)公司的UR3、UR5、UR10, KUKA公司的LBR iiwa, ABB公司的双臂协作机器人YuMi, FANUC公司的CR系列机器人,以及Rethink公司的Baxter和Sawyer。

## 2 人机协作方式

作为人类作业的合作伙伴,协作机器人最基本的特征是安全。ISO 10218以及2016年3月新发布的标准ISO/TS 15066给出了协作机器人明确的安全规范<sup>[18-19]</sup>。这两个标准定义了4种人机协作方式,如图1所示<sup>[20]</sup>。

(1)安全级监控停止(Safety-rated monitored stop)。操作人员进入协作区域,机器人停止;操作人员离开协作区域,机器人自动恢复运行。这是以牺牲效率来保证安全的协作方式。

(2)手动引导(Hand guiding)。操作人员通过一个安装在机器人末端或者靠近机器人末端执行器的手动操作装置来引导机器人的运动。只要人在协作区离开引导装置,机器人则处于安全监控停止状态。

(3)速度和距离监控(Speed and separation monitoring)。这种方式通过监控机器人的运动速度以及与人员之间的距离来保证安全的人机协作。协作时要求机器人与人之间的距离大于最小安全距离。该安全距离允许随机器人运动速度减小而适当变小。这种协作方式与外部传感系统的精度及可靠性有关。

(4)功率和力限制(Power and force limiting)。该协作方式允许机器人与人之间发生有意或者无意的物理接触,也可进行类似手动引导方式的牵引示教,但会限制机器人的输出功率和力,以保证人与机器人之间的安全、高效工作,这是一种更为本

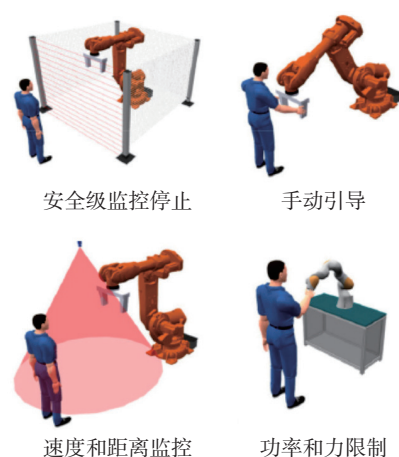


图1 实现人机协作的4种方式

Fig.1 Four kinds of human-robot collaboration

质、高级、安全的协作功能,能从根源上避免伤害事件的发生,同时保证人机协作的效率。

实际上传统的工业机器人也可以采取前3种方式执行协作任务,但是从安全角度来讲,本质安全才是协作机器人研究和应用追求的目标,这就要求无论是协作机器人的结构设计还是对复杂外界环境的感知与控制都应保证即使在误操作或发生故障的情况下也不会造成事故。此外,协作机器人应尽可能轻巧美观、易于搬动、便于使用,这将大大降低对操作人员在机器人配置、编程、维护方面的技能要求,能快速实现生产的柔性化调整。

## 协作机器人的关键技术

人机协作追求的目标是如何在人类环境中安全、高效地完成作业任务,这就要求协作机器人应具有安全、用户友好、灵活使用的特点,这可以通过适当的设计方法来实现。相比传统的工业机器人,协作机器人着重解决两方面问题:一是机器人本体改进与功能升级,使其具有本质安全性和适应性,即通过机器人的软/硬件设计,使机器人具备类似人类手臂的变刚度特性,既能实现高刚度的快速定位又能实现低刚度的小件装

配等任务操作；二是协作机器人融入和适应人类环境,以实现与人的自然交互。人类环境是难以预期的复杂环境,这些人类很容易应对的场景对机器人来讲却是不小的挑战,这就要求机器人能避免对周围人员和设备的伤害,具有在非结构化环境中执行任务操作的鲁棒性,以及机器人编程方式的友好和快捷性。为了解决以上问题,目前研究人员着重从以下几个方面开展探索研究。

### 1 协作机器人本体设计

精心设计的机器人本体不仅可以减轻机器人机身重量,有效降低机器人对人体的冲击,还可以降低感知和控制的难度,并补偿不确定性。协作机器人一般采用模块化、集成化的关节设计且具有更多的传感器以提高机器人的感知能力。图2为德国宇航局和KUKA公司开发的一种配置较全的典型协作机器人关节结构<sup>[21]</sup>。

图2所示关节结构中,力矩传感器安装在电机减速器之后,这样可以快速准确地检测外部载荷,并通过一定的算法来区分正常的作业任务、碰撞或者是人的操作意图。除在电机端安装增量式编码器外,还在减速器后端安装一个绝对式编码器作为负载末端位置反馈,通过双闭环控制算

法来提高关节末端位置的定位精度。高性能驱动器直接安装在机器人关节上,不仅使机器人结构紧凑、尺寸小巧,而且能减少线缆长度和干扰的影响,系统稳定性大大提升。除了采用模块化、集成化的关节结构外,还可以探索设计新型的关节结构,比如Disney Research所设计的一款仿生机械臂采用了一种新型肩关节设计<sup>[22]</sup>,使用差速机构平衡机器人重量,同时保证合理的奇异点配置和自然的运动范围,由此降低了控制和规划环节的复杂性。此外使用覆盖机器人全表面的敏感皮肤可以实现所谓的全敏感机械臂<sup>[23]</sup>。在机器人自由度方面,由于七自由度关节机器人在避障、克服奇异点、灵活性和容错性方面具有更多的优势,因此,协作机器人往往设计成七自由度,这样更能适应复杂工作环境中的人机协作。

### 2 协作机器人的感知和控制技术

已有研究表明,如果机器人确定了解周围环境,则可以很好地完成任务。然而协作机器人面临的是带有不确定性的人类环境,例如飞机装配场景常包含周围往来的人员和变化的装配位置,机器人本体的任意部位均有可能与装配人员、产品、工装、工具等发生干涉,此时利用相机、力传感器等传感器件及感知技术可以帮

助机器人了解周围环境、检测碰撞、降低不确定性,采取合理应对策略以避免人员、产品、设备和机器人自身受到伤害,从而实现安全、鲁棒、自主的操作。

相比传统工业机器人,装备关节力矩传感器或者末端力/力矩传感器的协作机器人在碰撞检测上具有先天优势,但是发生碰撞时关节力矩传感器所测的力矩不仅包含碰撞产生的外力矩,还有惯性力、向心力、科氏力和重力,因此需要结合机器人动力学特征,利用观测器从关节力矩信息中提取碰撞力矩。此外,还需要区分意外碰撞力矩和正常工作时的接触力矩;另一方面,机器人本体的其他部位与外界发生意外碰撞所造成的关节力矩分布具有不同的特征,可以借助机器人运动学加以区别。只有正确区分意外碰撞和正常的接触力矩,才有可能在不影响机器人正常工作的前提下识别出本体与外界发生的干涉,从而保证操作人员和设备安全。文献[24]~[25]分别给出了基于广义动量观测器和基于扩张状态观测器的碰撞检测方法。此外,也可以利用视觉/语音传感器使机器人感知周围环境实现人机交互<sup>[26-29]</sup>。

柔顺控制是协作机器人实现牵引示教编程、碰撞应急反应、变刚度操作的关键。柔顺控制实际上是阻抗控制的一个特例,主要关注对刚度和阻尼的调节,其核心技术是关节力矩的精确控制。文献[30]设计了一种基于关节力矩控制的阻抗控制器(图3),它采用双环反馈控制结构,内环为基于自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)的力矩环,能有效补偿动力学耦合和摩擦扰动,外环为具有重力补偿的比例微分控制的位置环。该控制器能根据操作任务所需的刚度和位置进行控制,且不依赖于对象模型、参数整定简便,显著提高了闭环机器人的柔顺性。利用协作机器人

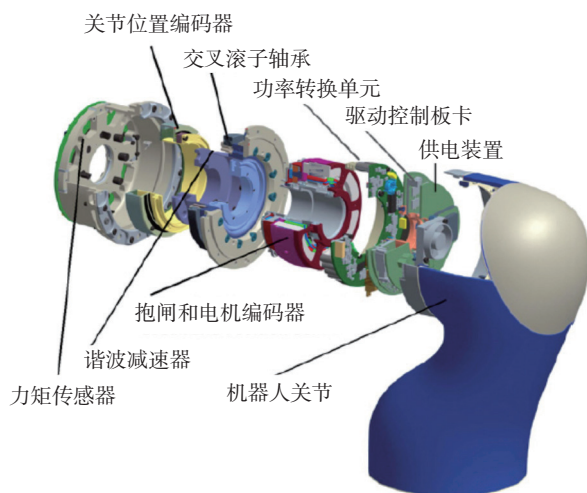


图2 协作机器人DLR LBR的集成化关节结构

Fig.2 Integrated joint structure of collaborative robot DLR LBR

的柔顺控制性能,就可以实现人工引导的机器人操作,例如飞机组件、部件的半自动装配、半自动制孔、连接操作以及人机协作涂胶等。

此外,为了使协作机器人能在类似复杂飞机装配的不确定动态环境中工作,还需要研究具有鲁棒性的运动规划与控制方法来适应环境变化的能力<sup>[31-35]</sup>。

协作机器人的工业应用要求以人机友好、简便的方式完成机器人的准确编程任务,可以采用基于力/视觉/语音感知与控制技术的示教编程(Walk-through programming)<sup>[36]</sup>、具有模仿和自主学习能力的演示编程(Programming by demonstration)<sup>[37]</sup>方式,还可利用虚拟现实和增强现实技术来实现人和机器人之间直观的自然交互<sup>[38-39]</sup>,极大地提高协作机器人的易用性。

### 3 协作机器人的行为设计

在人机协作中,机器人必须对人员和设备具有安全性,但也不能过于保守,例如传统的安全措施就是当人类靠近时机器人减速甚至停止动作。协作机器人的行为设计就是要在保证安全性的同时,使机器人在动态不确定的环境中表现达到最佳,即在完成各种需要高水平智力的工作中保持高效<sup>[40]</sup>。

为了合理设计协作机器人的行为,关键是要了解人机协作系统,图4给出了基于多智能体的人机协作系统模型框架<sup>[41]</sup>。人和机器人均为具有各自动力学特性的主体,通过各自的传感器感知环境中所有主体的状态并控制自己的动作。主体的行为取决于内在逻辑或策略或控制律。为了保证机器人的安全高效,可以将机器人的行为设计建模成在一定约束下的优化问题。建立一个考虑任务完成度和作业效率的成本函数,该函数取决于机器人状态,输入以及可能与人类状态相关的作业目标。约束条件包括两类:一是人和

机器人的动力学特性和作业可行性;二是人机交互中的安全保证,这是最为重要的约束条件。机器人通过对作业环境的认知来优化这个成本函数,并通过学习来更新系统的知识和逻辑以适应未知的作业环境。对于适于人机协作的飞机装配,人和机器人共享作业空间,两者关系非常密切。因此,优化设计机器人的行为,就能在保证安全性条件下,使机器人适应动态变化的装配环境,实现人机协同高效作业。

### 4 协作机器人的自主学习

协作机器人不仅要面对作业场景的不确定性,而且要面对作业任务的不确定性,例如飞机装配作业对象位置的少许变化,或者装配、制孔、涂胶等多种作业任务,因此,研究和提高协作机器人的自主学习和智能化具有重要意义。

文献[42]以人机协同轴孔装配为背景,以非结构环境中实现鲁棒的接触操作为目标,研究如何通过自主学习使机器人获得更好的对环境的适应能力。该研究利用人类运动的动态基元控制策略<sup>[43-44]</sup>,建立了一个分层控制结构,在下层借助高速总

线实现机器人的变阻抗控制,以保证稳定的物理交互;在上层使用人工神经网络构造在线规划器,以实现复杂策略的生成和参数更新。为了实现基于学习的在线规划,使用连续状态-动作空间的Markov决策过程对装配过程建模,借助Actor-Critic神经网络构造在线规划器(图5)以完成非线性任务决策。受人类装配操作启示,按照任务要求,确定状态变量与动作变量以实现基于触觉的变阻抗动作。该规划方法同时具有被动柔顺和主动调节的操作能力,比现有定刚度运动规划方法具有更好的环境适应性。

通过机器人自主学习,可以发掘到一些因为不直观而很难由人工设计的优质操作策略,从而使机器人作业更加快捷。

### 协作机器人在航空制造中的应用

航空制造无论在制造技术还是生产组织方面都是非常复杂的过程,在现有工艺和技术条件下要实现完全的自动化作业难度很大,特别是在小批量生产中,实现完全的自动化将

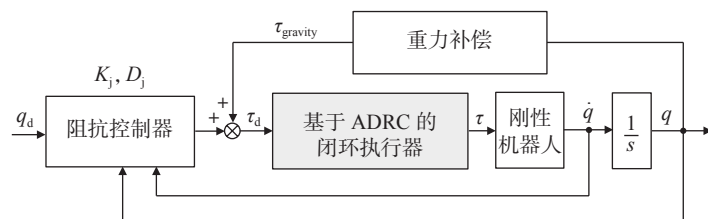


图3 基于力矩的阻抗控制器

Fig.3 Torque-based impedance controller

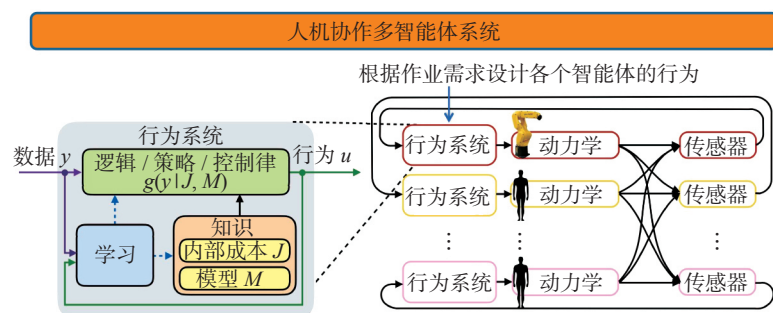


图4 基于多智能体的人机协作系统模型

Fig.4 A multi-agent framework to model human-robot systems

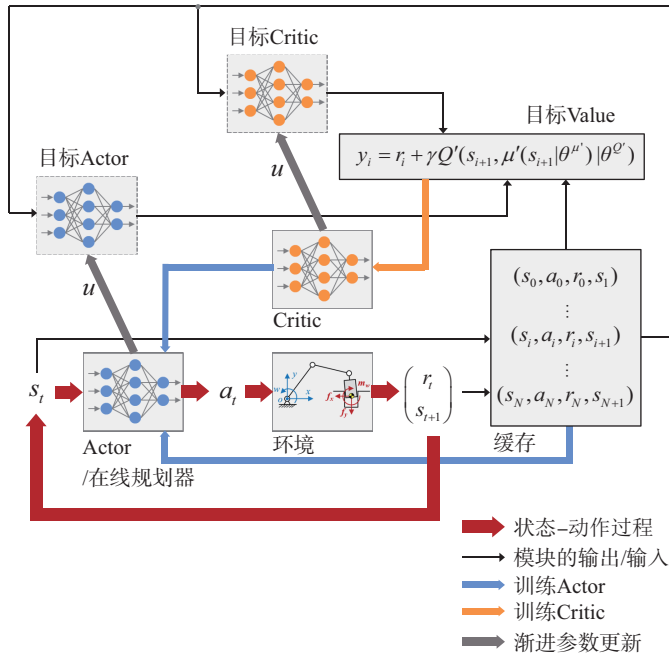


图5 在线规划器的任务控制及其参数训练过程  
Fig.5 Online planning controller and parameters training process

会导致过高的生产成本,因此,很多复杂的制造过程,例如飞机装配仍然是由技艺娴熟的操作人员完成。这就不可避免地出现操作人员在狭小空间、重载、噪声、振动、异味等恶劣环境下工作带来的工效学问题,显著降低了操作人员的工作效率,协作机器人是解决该问题的有效途径。为此,各大飞机制造公司纷纷在其未来发展规划中提出了协作机器人研究计划,研究人员也结合航空制造,特别是复杂的飞机装配实例探索人机协同装配的方法与技术。

### 1 协作机器人研究计划

空客公司2014年发布了未来工厂计划(Factory of the Future)<sup>[45]</sup>,并通过视频展示了以前沿科技为武装的空客未来工厂制造一架飞机的全过程,让人眼前一亮。针对飞机机身内部难以进行人工装配的非工效学区域,设计了一台移动式协作机器人与操作人员共享作业空间,并通过人工遥操作示教方式完成作业任务(图6)。

此外,空客公司未来工厂计划启动了另一项名为“飞机装配的未来

探索(FUTURASSY)”项目,该项目旨在提高飞机装配的自动化程度,探索设计一款具有双臂的人形协作机器人,在装配生产线上与人肩并肩地进行铆接工作,共享现场工具和资源。该双臂机器人由日本川田工业株式会社(Kawada)研发,拟用于A380方向舵的组装(图7)。

英国BAE系统公司2018年6月宣称协作机器人将帮助公司实现未来工厂计划<sup>[46]</sup>,使工程师能更好地完成先进战机的复杂制造任务,并于2018年底实施。提出的协作机器人系统(图8)具有4个关键特征:(1)操作人员识别,人机协作工作站利用无线传感器识别每一位操作人员并根据其工作经验及能力分配任务;(2)数字培训护照,系统会记录每位操作人员的专业水平,培训历史和用户许可;(3)使用协作机器人,在机器人上安装多种传感器使其能安全地与操作人员进行复杂的装配任务;(4)光辅助装配,在光线引导下帮助操作人员正确选择待装配的零件或者标准件。

BAE系统公司希望通过人机



图6 空客协作机器人用于非工效学区域  
Fig.6 Airbus conceptual cobot for any non-ergonomic areas

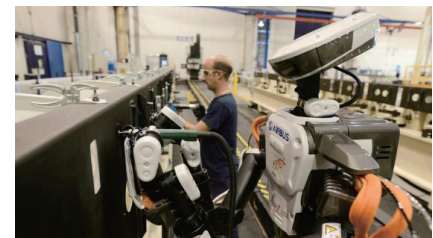


图7 空客FUTURASSY协作机器人进行A380方向舵梁组装  
Fig.7 Airbus FUTURASSY collaborative humanoid robot for A380 rudder spar assembly

协作模式,使操作人员完成复杂的决策性任务,而让机器人完成重复性任务,这样能使操作人员聚焦需要高技能、有更高附加值的任务,从而使操作人员能在保证质量情况下以更快的速度、安全地工作,提高效率和质量。BAE系统公司还与谢菲尔德大学先进制造研究中心和西门子公司合作,利用西门子的MindSphere软件连接协作机器人工作站,输出制造过程数据以帮助操作人员分析和改进制造过程。协作机器人工作站是BAE系统未来工厂计划的一部分,它将与其他先进技术,例如3D打印、增强现实、自主制造等技术一起应用到实际生产。2018年底在Typhoon生产线上进行了测试。

### 2 协作机器人在飞机装配中的应用研究实例

#### 2.1 A350外襟翼人机协作装配制孔

荷兰Fokker公司是英国GKN航空集团旗下全球知名的军机、民机和商用飞机零配件一级供应商。2016年该公司启动了协作机器人项目,分别以A350外襟翼组件装配和起落架装配为背景,探索和开发协作

机器人技术及其在飞机装配中的应用。

Fokker Aerostructures 作为空客供应商,2012年完成了第1套 A350-900 外襟翼的交付。外襟翼组件的滑轨肋和端部支撑肋为铝合金,蒙皮、翼梁和成型肋为碳纤维复合材料。考虑到装配的复杂性,Fokker Aerostructures 专门设计了外襟翼组装机,能适应 A350-900 和 A350-1000 两种机型的生产。对于下蒙皮与骨架的连接制孔,如果采用机器人自动化制孔,为保证机器人作业安全,必须设计防护栏将制孔站位从生产线上隔离出来,使得该区域成为整个车间的一个物流障碍,影响了其他组件生产的物流通道。如果采用人工制孔(图9(a)),装配工人就需要手持重达4kg的自动进给钻进行定位、夹紧、制孔等任务,劳动强度很大。为了降低外襟翼装配的人力成本并减轻工人劳动强度,Fokker Aerostructures 采用 KUKA 公司自重为14kg的 LBR iiwa 七自由度协作机器人携带自动进给钻完成在钻模板上的定位。为了保证机器人与工人协同操作的安全性,降低了机器人末端运行速度(250mm/s),这对制孔效率影响甚微,因为连接孔间距很小。此外还限制了机器人的最大接触力(图9(b)),以保证机器人不会伤到工人。项目开始阶段,协作机器人主要用于外襟翼组装机中8个部位的制孔;协作机器人可安装在自动导引小车(图9(c))、龙门框架或者地面的移动导轨上实现更大范围的制孔。

## 2.2 起落架衬套涂胶

Fokker 公司应用协作机器人的另一个实例是起落架衬套的涂胶作业。起落架结构中的衬套主要起到防止起落架过度磨损的作用。为了避免衬套工作失效,需要在衬套和其相配的零件接触表面涂上均匀无气泡的密封胶,质量要求非常高。现有

人工涂胶时,操作人员必须手、眼、脚协调操作,保持0.6MPa的压力,将密封胶从试剂盒转移到喷嘴并通过直径为1.5mm的针注入到指定位置。对操作人员来讲,每天完成多个衬套涂胶,不仅劳动强度大、乏味,容易导致质量不稳定,而且密封胶具有一定毒性,不利于人体健康。针对上述问题,Fokker 公司提出通过人机协作方法完成衬套的涂胶操作。他们选用优傲公司载荷为10kg的六自由度

协作机器人 UR10。

人机协作衬套涂胶过程如下:操作人员将混合好的密封胶装入协作机器人的末端执行器,机器人控制涂胶的压力,并根据密封胶的类型及黏度确定机器人末端喷嘴涂胶的速度以保证均匀无气泡地涂胶。图10展示了协作机器人涂胶的场景。操作人员将协作机器人固定在工作台上,把需要涂胶的衬套及配件安装在专用夹具上,并使涂胶区域位于机器



图8 BAe公司协作机器人系统概念

Fig.8 The BAe systems' conceptual cobot system



(a) 自动进给钻人工制孔

(b) 限制协作机器人的最大接触力

(c) KUKA LBR iiwa 协作机器人夹持自动进给钻制孔

图9 A350外襟翼装配制孔

Fig.9 Drilling operations in A350 outboard flap assembly line

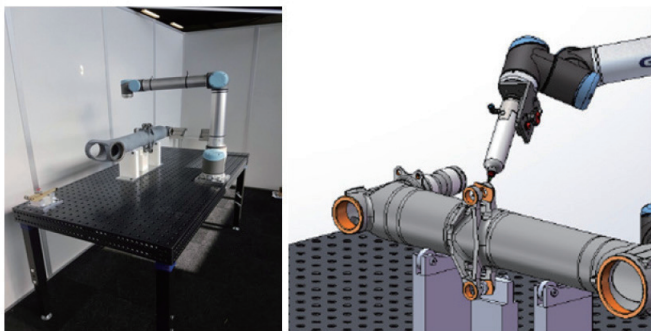


图10 协作机器人进行衬套涂胶

Fig.10 Cobot set-up for application of sealant around bushings

人的工作空间内。可采用人工牵引示教方式进行机器人作业编程,也可通过视觉系统识别衬套的位置、形状和尺寸进行自动作业编程。采用视觉系统的好处是衬套及配件无需精确定位就可以实现更高精度更好效果的涂胶操作。为了保证操作人员安全,在机器人末端安装了一个力传感器以实现碰撞检测。在这种人机协作涂胶作业中,操作人员主要完成协作机器人示教编程,检查涂胶质量并处理操作过程异常。

采用人机协作涂胶作业不仅改善了人的工作环境,也提高了生产效率并获得持续的质量改进。同时,操作人员的工作内容更为丰富、有趣和柔性。

### 2.3 飞机机身的自冲铆接

德国弗劳恩霍夫研究所的研究人员与空客合作,以空客 A320 飞机机身装配的自冲铆接<sup>[47]</sup>(Self-piercing rivets, SPR)操作为应用背景,对协作机器人进行了深入研究。自冲铆接是一种一次完成冲、铆操作的高效连接工艺,克服了传统铆接工艺复杂、效率低、外观质量差的缺点,在汽车生产中应用广泛。在飞机机身内部应用自冲铆接工艺,因内部操作空间有限,实现完全的自动化操作具有一定难度,如果采用人工操作,工人需要以仰天、跪膝等多种姿态操作重约 8kg 的液压驱动型 SPR 工具,劳动强度很大。目前自冲铆接在飞机制造中的应用较少,除了评估这种新型连接技术的应用效果、开发操作工具以外,从经济和人体工效学的角度也需要开发一个轻型柔性智能工艺和辅助操作系统,协助工人更高效、高质量完成自冲铆接操作。

研究人员提出采用优傲公司的 UR10 型协作机器人和智能作业系统协作操作人员完成机身内部自冲铆接操作。他们将机器人固定在直线导轨上以获得机身内部操作所需要的工作空间。在机器人与末端执

行器之间安装了 Robotiq 公司的 FT-300 六维力传感器以实现牵引示教功能,能让操作人员以不同的速度轻松、方便地拖拽机器人及末端执行器定位到各铆接位置,然后启动末端执行器的控制按钮完成自冲铆接操作。整个人机协作装配过程包含 5 个步骤:(1) 机器人处于监控暂停状态,操作人员操作准备;(2) 释放监控暂停,以力控牵引示教模式让机器人快速粗定位到铆接位置附近;(3) 以更灵敏的方式慢速将机器人精定位到铆接孔位,避免机器人与人员及产品的碰撞损伤;(4) 人工启动末端执行器夹紧工件;(5) 人工启动自冲铆接操作。上述过程均可以由人工控制末端执行器的不同控制按钮完成,操作简单易学。图 11 显示了 UR10 协作机器人系统以及操作人员在飞机机身内不同位置操作的场景。

为便于人员操作,该系统采用一部智能手机完成机器人的集成控制和铆接过程信息显示,如图 12 所示。操作人员将手机戴在手臂上,以便查看机器人的实时运行状态,了解机器人操作指令实现操作导航,获取与铆接操作相关的实时信息,例如铆接工艺参数、上次铆接过程数据等,还可

利用机器人内部传感器监控铆接过程。此外,在手机上设有铆接图库,操作人员可以直观地了解哪些位置已经完成了铆接,还有哪些位置需要铆接,哪些位置的铆接有问题。

操作人员综合利用机器人末端执行器的按钮操作、智能手机的实时信息导航以及机器人操作过程监视与控制,可以安全又方便地完成机身内部各位置的自冲铆接操作。应用验证结果表明,相比人工铆接,采用智能化的人机协同操作后铆接效率提高 50%,操作人员的劳动强度大大降低。研究人员认为在不能实现完全自动化的场合,智能化的人机协作通过不断地丰富操作功能,将极大地促进飞机装配质量和效率的提升。

### 2.4 A320 机身压力隔板与筒段装配

德国 ZeMA 公司一直致力于工厂和仓储自动化技术与设备的研发,该公司在欧盟科研框架计划(Horizon 2020, 2014~2020)资助下,以模块化、易于操作、安全高效为目标,以 A320 第 19 机身段压力隔板和机身的连接为应用实例<sup>[48]</sup>(图 13),探索协作机器人在飞机装配中的应用。

A320 机身压力隔板与筒段的装

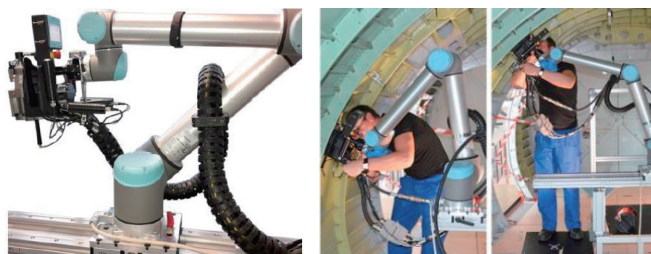


图 11 UR10 协作机器人系统及其在飞机机身中的应用场景

Fig.11 Use of UR10 cobot system under real conditions in aircraft fuselage



图 12 智能手机操作及人机交互界面

Fig.12 Manipulation of the cobot system using smart phone and user interface



图13 A320座舱隔板与机身人工装配过程

Fig.13 Manual assembly of pressure bulkhead and barrel for A320

配区域需要安装 800 个铆钉,首先进行制孔、分解、涂胶操作,然后由两名工人同时操作,一人站在压力隔板上进行插钉、铆接操作,另一人蹲在机身筒段内从下部支撑铆接位置。工人每次需要在振动和噪声大、空间狭窄的恶劣环境下工作 3~4h。过大的噪声影响了工人之间的正常语言交流,只能按照预定的操作流程和手敲击信号来协作完成铆接。

为了提高铆接质量,改善工人工作条件,ZeMA 公司提出采用一台协作机器人代替位于下部机身位置的工人,以半自动方式进行人机协作铆接。该人机协作系统主要解决大尺寸工件、小尺寸作业空间的问题,改善工人的劳动条件,提高铆接质量,并能追溯铆接过程,保证人机自然交互。

运行模式和流程是协作机器人系统成功应用的关键。ZeMA 公司采用优傲公司的 UR10 协作机器人,并开发了一套集成的智能辅助装配作业软件系统,支持操作人员在操作现场非常直观地进行系统的设置、操作和定制编程,大大提高了生产效率。该过程共分为 6 个主要阶段:(1)作业任务规划,分析整个铆接过程,并根据人和机器人的特点进行合理的任务划分,将灵活性强、难度大的任务分配给人,其他繁重的重复性工作由机器人完成;(2)生成虚拟产品模型,在 CAD 环境下,依据装配对象的三维数模并通过二次开发生成虚拟产品模型,它包含了铆接工艺和人机任务分配信息以及机器人铆

接位姿数据等;如果三维数模有问题,也可用现场的相机拍照识别后确定铆接位置;(3)系统配置和在线调整,如果三维数模给出的铆接位置与实际产品有偏差,就通过坐标变换对工件坐标系进行在线调整和自适应,以保证操作的准确性和安全性;(4)人机交互,系统配置好后,操作人员通过图形化的人机交互界面方便地编辑、修改和确认各个铆接位置;(5)仿真分析,仿真验证机器人轨迹规划结果的正确性和安全性,对不合理的机器人作业路径进行调整;(6)铆接,机器人运动到铆接位置实施铆接操作,操作人员可以实时监视铆接过程的力和力矩信息。

操作人员在 UR10 协作机器人的 ROS (Robot Operating System) 架构下,设计了面向应用的模块化软件结构,并开发了智能手机 APP 程

序,使操作人员通过图形交互方式方便地实现机器人的无线通讯控制和遥控操作。为了实现更灵敏的人机交互操作,机器人末端安装了六维力传感器。在整个铆接过程中,首先由工人进行钻孔、镗窝和涂胶,然后机器人移动到铆接孔下方并定位好砧板,再由人工放入铆钉、定位好铆锤。机器人会因工件的弹性而回退,这也作为人机协作铆接的开始信号。机器人末端的六维力传感器能检测出铆接产生的振动信息,通过开发特定性能的砧板以尽量减小振动对机器人的影响。

图 14 为用于 A320 第 19 机身段人机协同装配的验证平台。机身试件立式安装在外部支架上,提升装置将机器人送到指定的工作空间内,操作人员利用该提升装置到达想去的工作位置,并根据投影仪给出的装配指令进行装配作业。这种人机协作半自动化装配作业系统具有很好的灵活性,能适应不同的作业要求,成本低,而且能显著地提高作业质量并改善操作人员的作业条件。更为重要的是,当机器人出现故障时可马上切换成全人工操作,保证连续的装配生产。

## 2.5 舱门人机协同装配



图14 ZeMA开发的A320第19机身段人机协同装配验证平台

Fig.14 Cobot system demonstrator of section 19 for A320 at ZeMA

2012年德国慕尼黑国际机器人及自动化技术贸易博览会展出了一套人机协作的无型架飞机装配设备,由瑞士苏黎世应用科学大学、MRK-Systeme GmbH公司和皮拉图斯飞机公司(Pilatus Aircraft Ltd.)合作开发(图15)。该设备是欧盟资助的ECHORD(European Clearing House for Open Robotics Development, 2009~2013)项目的一个研究成果。ECHORD致力于推进机器人领域科学研究和工业应用的合作,研究人员以飞机机身舱门的无型架装配为背景,探索开发一种可用于工业环境的人机协作解决方案<sup>[49-50]</sup>。希望能通过直观快捷的人机交互方式,综合发挥人和机器人各自的长处,例如人的智力和柔性、机器人的精度和耐力,保证人机协作的安全性。

该设备运行的基本步骤如下:

(1)操作人员抓取舱门侧壁,轻松引导机器人携带很重的舱门移动。这种人机协作中,所有载荷由机器人承担,操作人员只负责牵引机器人的运动,这充分利用了人的灵活性和机器人的承载能力,减轻了操作人员的劳动强度,具有很好的人体工效学优势。

(2)操作人员利用专用软件包安全、直观地进行人工引导或编程。利用自定义的图形化人机交互界面确保直观的机器人操作、程序选择和数据管理。

(3)在用户界面的引导下,操作人员首先利用激光跟踪仪和T-probe

测量机身上的基准孔以确定机身的位置,然后移动舱门侧壁到机身目标装配位置附近,再利用激光跟踪仪和T-probe测量舱门侧壁的基准孔位置,以确定机器人精定位轨迹。

(4)测量结束后,控制器自动计算机器人的运动轨迹并控制机器人精确运动到目标位置。机器人的所有运动都是采用力位混合控制方式,操作人员能够方便地调整机器人运行的最大力和速度,以保证人机协同操作的准确性和安全性。

这种人机协同作业给飞机装配带来众多优势,实现了无型架条件下飞机组件的快速装配,成本低、装配质量高,适合于小批量生产条件。此外,机器人能够完成精确、重复性作业,大大减轻了员工的负担和劳动强度。

## 总结与展望

本文介绍了空客、BAE系统公司的未来工厂计划以及协作机器人在飞机装配中的应用研究实例,展示了协作机器人的安全、高效和易用特性及其在航空制造中的潜在应用前景。目前协作机器人产业发展迅速,但成熟的供应商并不多,这与协作机器人较高的技术门槛有关;而且协作机器人在航空制造中的现有应用还处于概念开发和应用探索阶段,真正的工业应用还需结合制造工艺流程和生产现场工况进行深入细致的应用开发,满足实际生产需求。同时还应结合协作机器人特点,进一步探索协作机器人在航空制造中新的应

用领域。协作机器人将与传统的工业机器人及自动化设备一起来提升航空制造的质量、效率和柔性。

未来协作机器人的研究应在强化安全保证、自然人机交互和高效操作的基础上,探索提高协作机器人认知技能和自主操作能力的理论方法和技术,使协作机器人不仅成为减轻工人劳动强度、提高工序作业能力的工具,而且能降低对工人技术水平的要求,通过人机协作更好地完成复杂工况下的复杂任务。

协作机器人实际上是一种特殊的工业机器人,随着相关技术的发展,未来机器人都应具有与人类一起安全可靠高效协同工作的特点。

## 参考文献

- [1] 何胜强. 大型飞机数字化装配技术与装备[M]. 北京:航空工业出版社, 2013.
- HE Shengqiang. Digital assembly technology and equipment for large aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013.
- [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. Digital assembly technology for aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2015.
- [3] BLEY H, REINHART G, SELIGER G, et al. Appropriate human involvement in assembly and disassembly[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2004, 53(2): 487-509.
- [4] KRÜGER J, LIEN T K, VERL A. Cooperation of human and machines in assembly lines[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2009, 58(2): 628-646.
- [5] MUELLER R, GEENEN A, VETTE M. Potentials of human-robot-cooperation in aircraft assembly systems/new possible applications of a human-robot-cooperation in aircraft production by the example of shell structure assembly[R]. SAE Technical Paper 2015-01-2507, 2015.
- [6] MUELLER R, VETTE M, GINSCHER A, et al. Innovative production technologies for large components[R]. SAE Technical Paper 2014-01-2237, 2014.
- [7] MUELLER R, VETTE M,



图15 协作机器人用于无型架飞机装配

Fig.15 Cobot for jig-less airplane assembly

MAILAHN O. Empowering of assembly processes for human-robot-cooperation in terms of task assignment[R]. SAE Technical Paper 2016-01-2093, 2016.

[8] International Organization for Standardization. ISO 10218-1: 2011, Robots and robotic devices—Safety requirements for industrial robots—Part 1: Robots[S]. [2011-07].

[9] International Organization for Standardization. ISO 10218-2: 2011, Robots and robotic devices—Safety requirements for industrial robots—Part 2: Robot systems and integration[S]. [2011-07].

[10] TERESKO J. Here come the robots[EB/OL]. [2004-12-21]. <https://www.industryweek.com/automation/here-come-cobots>.

[11] PESHKIN M, COLGATE J E. "Cobots" work with people[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1996, 3(4): 8-9.

[12] COLGATE J E, WANNASUPHOPRASIT W, PESHKIN M. Cobots: robots for collaboration with human operators[C]//Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exhibition. Atlanta, 1996: 433-439.

[13] TOBE F. Collaborative robots are broadening their marketplaces[EB/OL]. [2016-03-04]. <https://www.therobotreport.com/collaborative-robots-are-broadening-their-marketplaces/>.

[14] DJURIC A M, URBANIC R, RICKLI J. A framework for collaborative robot (cobot) integration in advanced manufacturing systems[J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2016, 9(2): 457-464.

[15] WANG X V, KEMENY Z, VANCZA J, et al. Human-robot collaborative assembly in cyber-physical production: classification framework and implementation[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 5-8.

[16] VILLANI V, PINIB F, LEALIB F, et al. Survey on human-robot collaboration in industrial settings: safety, intuitive interfaces and applications[J]. Mechatronics, 2018, 55: 248-266.

[17] MICHALOS G, MAKRIS S, SPILIOTOPOULOS J, et al. Robo-partner: seamless human-robot cooperation for

intelligent, flexible and safe operations in the assembly factories of the future[J]. Procedia CIRP, 2014, 23: 71-76.

[18] International Organization for Standardization. ISO/TS 15066: 2016, Robots and robotic devices—Collaborative robots[S]. [2016-02].

[19] 付乐, 武睿, 赵杰. 协作机器人安全规范: ISO/TS 15066 的演变与启示 [J]. 机器人, 2017, 39(4): 532-540.

FU Le, WU Rui, ZHAO Jie. The evolution and enlightenment of safety specification of cooperative robots: ISO/TS 15066[J]. Robot, 2017, 39(4): 532-540.

[20] LEO M, MANUELA S. Collaborative robot applications at GKN aerospace's Fokker Business[R]. SAE Technical Paper 2017-01-2091, 2017.

[21] ALBU-SCHAEFFER A, HADDADIN S, OTT C, et al. The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2007, 34(5): 376-385.

[22] WHITNEY J P, HODGINS J K. A passively safe and gravity-counterbalanced anthropomorphic robot arm[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong, 2014: 6168-6173.

[23] LUMELSKY V J, CHEUNG, E. Real-time collision avoidance in teleoperated whole-sensitive robot arm manipulators[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(1): 194-203.

[24] DE LUCA A, ALBU-SCHAEFFER A, HADDADIN S, et al. Collision detection and safe reaction with the DLR-III lightweight manipulator arm[C]//Proceedings of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, 2006: 1623-1630.

[25] REN T Y, DONG Y F, WU D, et al. Collision detection and identification for robot manipulators based on extended state observer[J]. Control Engineering Practice, 2018, 79: 144-153.

[26] NUZZI C, PASINETTI S, LANCINI M, et al. Deep learning based machine vision: first steps towards a hand gesture recognition set up for collaborative robots[C]//Proceedings of

2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT. Brescia, 2018: 28-33.

[27] ROGOWSKI A. Web-based remote voice control of robotized cells[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(4): 77-89.

[28] TANG G, WEBB P, THROWER J. The development and evaluation of robot light skin: a novel robot signalling system to improve communication in industrial human-robot collaboration[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 56: 85-94.

[29] NIKOLAKIS N, MARATOS V, MAKRIS S. A cyber physical system (CPS) approach for safe human-robot collaboration in a shared workplace[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 56: 233-243.

[30] REN T Y, DONG Y F, WU D, et al. Impedance control of collaborative robots based on joint torque servo with active disturbance rejection[J/OL]. Industrial Robot: An International Journal, 2018: [2018-09-17]. <https://doi.org/10.1108/IR-06-2018-0130>.

[31] KRÜEGER J, SURDILOVIC D. Robust control of force-coupled human-robot-interaction in assembly processes[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 41-44.

[32] MAGRINI E, DE LUCA A. Hybrid force/velocity control for physical human-robot collaboration tasks[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems (IROS). Daejeon, 2016: 857-863.

[33] PELLEGRINELLI S, MORO F L, PEDROCCHI N, et al. A probabilistic approach to workspace sharing for human-robot cooperation in assembly tasks[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2016, 65(1): 57-60.

[34] PELLEGRINELLI S, ORLANDINI A, PEDROCCHI N, et al. Motion planning and scheduling for human and industrial-robot collaboration[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 1-4.

[35] VILLANI V, SABATTINI L, RIGGIO G, et al. A natural infrastructure-less human-robot interaction system[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(3): 1640-1647.

[36] TALIGNANI L C, FERRAGUTI

F, SABATTINI L, et al. Admittance control parameter adaptation for physical human-robot interaction[C]//Proceedings of the IEEE International Conference Robotics and Automation (ICRA). Singapore, 2017: 2911-2916.

[37] ABBAS T, MACDONALD B A. Generalizing topological task graphs from multiple symbolic demonstrations in programming by demonstration (PbD) processes[C]//Proceedings of the IEEE International Conference Robotics and Automation (ICRA). Shanghai, 2011: 3816-3821.

[38] OYEKANA J O, HUTABARAT W, TIWARIB A, et al. The effectiveness of virtual environments in developing collaborative strategies between industrial robots and humans[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 55: 41-54.

[39] MICHALOS G, KARAGIANNIS P, MAKRIS S, et al. Augmented reality (AR) applications for supporting human-robot interactive cooperation[J]. Procedia CIRP, 2016, 41: 370-375.

[40] LIU C L, TOMIZUKA M. Algorithmic safety measures for intelligent industrial co-robots[C]//Proceedings of IEEE

International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm, 2016: 3095-3102.

[41] LIU C L. Designing robot behavior in human-robot interactions[D]. Berkeley: University of California, 2017.

[42] REN T Y, DONG Y F, WU D, et al. Learning-based variable compliance control for robotic assembly[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2018, 10(6): 061008(1-8).

[43] PRADA M, REMAZEILLES A, KOENE A R, et al. Dynamic movement primitives for human robot interaction: comparison with human behavioral observation[C]//Proceedings of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, 2013: 1168-1175.

[44] WIDMANN D, KARAYIANNIDIS Y. Human motion prediction in human-robot handovers based on dynamic movement primitives[C]//Proceedings of 17th European Control Conference. Limassol, Cyprus, 2018: 2781-2787.

[45] Airbus. Airbus moves forward with its "factory of the future" concept[EB/OL]. [2014-07-09]. <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2014/07/airbus-moves-forward-with-its-factory-of-the-future-concept>.

html.

[46] BAE Systems. Collaborative robots and digital technology signal creation of the 'factory of the future' [EB/OL]. [2018-06-27]. <https://www.baesystems.com/en/article/collaborative-robots-and-digital-technology-signal-creation-of-the-factory-of-the-future->

[47] MEISSNER J, SCHMATZ F, BEUSS F, et al. Smart human-robot-collaboration in mechanical joining processes[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 24: 264-270.

[48] MUELLER R, VETTE M, GEENEN A, et al. Improving working conditions in aircraft productions using human-robot-collaboration in a collaborative riveting process[R]. SAE Technical Paper 2017-01-2096, 2017.

[49] European Clearing House for Open Robotics Development[EB/OL]. [2012-06-13]. <https://www.youtube.com/watch?v=ovyQcHwtN0o>.

[50] European Clearing House for Open Robotics Development [EB/OL]. [2017-04-22]. <https://cordis.europa.eu/project/rcn/90429/factsheet/en>.

通讯作者: 吴丹, E-mail: [wud@tsinghua.edu.cn](mailto:wud@tsinghua.edu.cn).

## A Survey of Collaborative Robot for Aircraft Manufacturing Application

WU Dan<sup>1</sup>, ZHAO Anan<sup>2</sup>, CHEN Ken<sup>1</sup>, DU Kunpeng<sup>2</sup>, ZHANG Jiwen<sup>1</sup>, YANG Yapeng<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China)

**[ABSTRACT]** The automation of manufacturing processes in aviation production is very difficult and subject to technological challenges and economical risks. Both safety and easy-to-use collaborative robotics solutions, where human operators and robots share their workspace, combine their advantages and work collaboratively, are becoming valid to address the challenging requirements for complex manufacturing with low cost, high efficiency, flexibility and automation. In this paper, the background of collaborative robots and four kinds of human-robot-collaboration are first presented. Then the Airbus and the BAE's visions of the "Factory of the Future" are presented, highlighting how collaborative solutions are intended to increase quality and productivity. The main industrial application cases for aircraft assembly where collaborative robots are advantageous are also explained in detail. Moreover, a summary of human-robot collaboration technological challenges is provided, with specific focus on robot hardware design, force sensing and control, behavior design and autonomous learning of collaborative robots. It is expected that human-robot-collaboration for safe, efficient, flexible and intelligent operations is found in wide industrial applications of the future.

**Keywords:** Aviation manufacturing; Aircraft assembly; Human-robot-collaboration; Collaborative robot; Safety

(责编 李丹)