

引文格式: 陈力啸, 傅云, 朱伟东. 双机器人协同精准铺丝技术[J]. 航空制造技术, 2022, 65(13): 70-77.

CHEN Lixiao, FU Yun, ZHU Weidong. Cooperative robots automatic fiber placement[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(13): 70-77.

双机器人协同精准铺丝技术*

陈力啸¹, 傅云², 朱伟东¹

(1. 浙江大学, 杭州 310027;

2. 浙江西子势必锐航空工业有限公司, 杭州 310018)

[摘要] 双机器人协同铺丝是提高铺丝效率的有效方法, 受到了航空航天产业的广泛关注。首先介绍了国内外双机器人铺丝系统的研究现状, 对其关键技术包括机器人任务分配和运动规划进行了综述, 分析了影响铺放质量和铺放效率的因素, 着重介绍了末端执行器精准定位以及基坐标标定, 总结了铺丝路径精准规划的方法, 研究了机器人铺丝过程中产生缺陷的原因, 对铺层表面的缺陷检测技术进行了讨论, 并对实现更高效精准铺放的发展趋势进行了展望。

关键词: 双机器人; 任务分配; 运动规划; 坐标标定; 铺放路径规划; 缺陷检测

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.13.070



陈力啸

博士研究生, 研究方向为复合材料自动铺放技术及装备。

碳纤维增强复合材料具有比强度高、比刚度大和抗腐蚀的优异特性, 在航空航天、车辆、风力发电等诸多工业领域的应用逐步增长^[1]。传

统的复合材料构件采用手工铺放的方式, 存在很多缺点, 如材料浪费严重、制造周期长、产品质量较差等, 并且手工铺放过程无法重复^[2]。相比于手工铺放技术, 自动铺放成型技术不仅可以节省时间、减少材料浪费, 而且能够提高复合材料的铺放速度和铺放质量, 可以实现先进复合材料高质量和高性价比的制造^[3-4]。自动铺放成型技术包括自动铺带技术和自动铺丝技术。自动铺带技术的成型效率很高, 主要用于大平面或低曲率构件的制造; 自动铺丝技术可以实现对预浸丝束的控制, 具有较强的曲面适应能力, 适合加工大曲率复杂零部件。

机器人铺丝系统具有灵活性好、成本低、安装便利的优点, 能够很好地用于加工复杂回转体结构, 已成功应用于制造机身、机翼和进气道等飞机构件^[5]。随着机器人学的发展, 多机

器人系统受到了研究人员的关注, 相比较于单机器人系统不仅可以节省工作空间、提高生产效率并且通过机器人之间协调工作可以完成更加复杂的加工任务, 具有更强的容错能力^[6]。

双机器人系统具有冗余自由度, 为机器人柔性化加工提供了更加灵活的优化方法。多机器人协同铺丝系统在未提升单机铺丝性能的情况下可以显著提高整体铺丝效率, 为大型回转体复合材料构件制造提供了重要技术途径。

目前, 国内外对多机器人铺丝系统的研究取得了一定的成果, 其中双机器人系统技术较为成熟并已经开始应用。本文将介绍双机器人铺丝系统的研究现状、关键技术, 并在此基础上做出展望。

1 研究现状

20世纪80年代以来, 多臂工业

* 基金项目: 浙江省“尖兵”、“领雁”研发攻关计划(2022C01134)。

机器人系统受到了广泛重视,并随着机器人自动铺放技术的发展成为研究热点之一。面对实际生产中复杂多变的任务需求,使用多个机器人相互协调配合可以同时铺放不同宽度、不同数量的丝束,能够完成单个机器人所无法完成的工作,提高了生产效率和灵活性。进入 21 世纪,国内外学者对于多机器人铺放系统的研究已经取得了很大程度的进展,其中双机器人铺放系统的技术目前最为成熟,已经开始逐步应用于飞机复合材料零部件的制造。

2009 年德国航空航天中心(简称 DLR)启动了 GroFi 项目,旨在设计开发一种多机器人系统用于提高复合材料铺放效率,已取得了一系列成果,其在全球范围内首次实现了两台机器人在重叠、动态工作区铺放碳纤维^[7]。在翼展为 8 m 的机翼上进行了生产演示,结果显示相比于单机器人系统可以节省近 38% 的生产时间。空客 A350 部分机型已经采用 DLR 测试的技术铺放飞机机翼,生产效率得到显著提高,如图 1 所示。此外在该项目中还实现了 8 个机器人单元在多腔工具上同时进行自动铺放。8 个机器人分别安放在一个轨道系统中并可以自由移动,具有高度的灵活性,对碳纤维的使用量可以达到 150 kg/h,八机器人系统目前还处于试验验证阶段,如图 2 所示。

2010 年美国 Electroimpact 公司(简称 EI)开发了一款双机器人铺丝系统^[8],其部分控制程序是独立的,可以在任意一台机器上运行,允许两台机器人同时或独立工作。系统使用线性数值求解器进行参数补偿,从而使编程具有很高的灵活性。末端执行器采用可拆卸的模块化铺丝头,可在 120 s 内完成拆卸更换,减少停机时间以提高机器的利用效率。该系统已经应用在大型飞机主结构的生产制造。

加拿大康考迪亚大学开发了一种

双机器人铺丝系统^[9],由串联机器人携带铺丝头,并联机器人承载芯模,使用摄像测量仪对并联机器人进行跟踪监测,不断修正路径中的碰撞点和奇异点,可以连续不间断进行铺放,实现了小型复杂构件的铺丝制造。

近年来,国内对于双机器人铺放系统的理论研究也取得了一定的突破。南京航空航天大学对回转体构件的制造问题进行了研究,在双机器人协同铺丝的轨迹规划、协调控制、后处理算法等方面取得了一系列进

展^[10]。

浙江大学开发了一套由两台具有 6-DOF 的 Comau 机器人和一个冗余自由度的回转芯模组成的双机器人协同铺丝系统。系统中的芯模底座固定在地面上,但是芯模本身可以进行旋转,两台机器人可以在导轨上进行移动,具有很高的灵活性,实现了回转体构件的双机器人协同铺丝。与现有的 AFP 系统相比,该系统可以制造具有更高轨迹规划要求的复杂复合材料零部件,如图 3 所示。

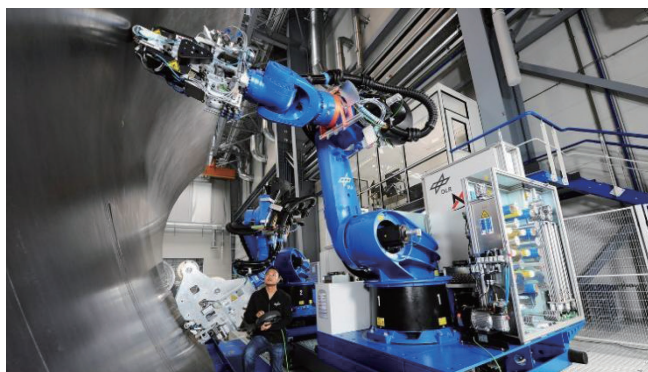
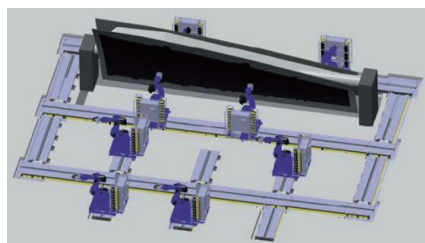


图 1 纤维铺放和胶带铺放结合的机器人系统

Fig.1 AFP system combined usage of fiber placement and tape laying technology



(a) GroFi平台3D模型



(b) GroFi平台场景

图 2 GroFi 平台
Fig.2 GroFi platform



图 3 浙江大学双机器人自动铺丝系统

Fig.3 Cooperative robots automatic fiber placement machine from ZJU

2 机器人协同铺放任务分配及运动规划方法

在机器人协同工作时需要进行任务分配和运动规划来实现具体的应用协调,这是多机器人系统中的两个基本问题^[11]。任务分配是将复杂的任务分解,然后将任务分配给每个机器人。任务分配决定了机器人要完成的任务,因此也被称为决策问题。机器人在同一空间中协调工作时,对其进行运动规划以找到无死锁、无碰撞路径和距离最短、易于规划的轨迹同样是非常必要的。

2.1 双机器人系统任务分配

多机器人任务分配问题是多机器人系统研究的一个重要方向。在铺丝过程中,机器人的任务分配方式不仅决定了机器人能否最大限度发挥自身能力,而且多个机器人协调工作可以使多机器人系统完成单个机器人无法完成的复杂任务。Åblad等^[12]提出了最小化时间周期的算法,将工作空间进行分区,使每个机器人的工作空间与其他机器人分开,提高完成任务的效率。Zhou等^[13]提出了基于多机器人系统的区域分配算法,根据机器人的分布和运动限制为每个机器人分配工作区域,并基于遗传算法迭代求解。

悉尼科技大学自动化系统研究中心与武汉理工大学联合开展研究,提出了一种双机器人协同铺丝两阶段任务分配方法^[14],该方法针对双机器人铺丝系统进行建模,假设模具位置固定且机器人关节与移动底座不联动,并且未考虑更换料卷、铺丝系统故障等导致机器人数量动态改变的情况。DLR提出在GroFi多机器人协同铺丝平台中采用一种动态再规划与调度机制^[15],当某台铺丝机器人需要进行维护时,由空闲的机器人代替继续完成铺丝任务。南京航空航天大学王显峰等^[16]提出了一种针对回转体构件的双机器人铺丝

轨迹分配算法,以机器人可达性为约束,通过定义主机器人和路径配对,将问题简化为两个单机器人的铺丝后处理问题。

在双机器人铺放过程中,由于构件形状复杂并且同时要铺放两条路径,所以要考虑机器人的运动可达性和铺丝工艺要求,需要对两台机器人进行合理的任务分配,并且对铺层顺序和铺放路径进行规划以避免相互间产生干扰或碰撞。在铺放丝束过程中,两台机器人具有独立性,其中一台机器人出现异常不影响另一台机器人的程序执行,对工作异常的机器人采取纠错措施后,故障机器人可以按照程序继续完成铺放任务^[17]。Zhang等^[18]提出了一种在线顺序任务分配方法,在机器人并行运动相互干扰的情况下,能够将任务不断地分配给机器人使其正常工作。

2.2 双机器人运动规划

双机器人协同铺丝时,每台机器人要分别生成各自的路径规划,根据前期任务分配的结果确定模具表面一系列路径点的位置和姿态,采用逆解算法^[19-20]将路径规划阶段给定的模具上的路径点坐标和姿态映射到多轴系统的关节空间,然后由数控系统给路径赋予时间信息,对机器人的速度和加速度进行规划。双机器人在共享工作空间内协调工作时,在互为运动障碍的工作区域内要进行无碰路径规划,也就是说要让机器人在起点和终点位置找到一条路径,不仅能够避免与模具等障碍物发生碰撞而且也能避免两台机器人发生碰撞。

无碰路径规划大体分为两种:一种是机器人相对于模具或者操作人员的无碰路径规划;另一种是机器人之间的无碰路径规划。Tian等^[21]提出了基于遗传算法的无碰撞运动规划,可以在任务空间中搜索路径的有效解和最优解。Wang等^[22]提出了基于遗传算法和粒子群算法的双全局最优算法,以无碰撞路径最短原

则进行优化。

对于多机器人路径规划有两种求解方法,即耦合和解耦^[23]。耦合适用于协同路径规划,解耦不仅可用于协同路径规划,也可用于分布式路径规划,所以基于解耦方法的研究更加广泛。Chiddarwar等^[24]提出了两相解耦算法,分两步进行路径规划:第1步对机器人与模具等静态物体进行无碰撞路径规划;第2步避免机器人之间产生路径冲突,当机器人同步启动时,可以将无碰路径规划转换成高维空间的路径搜索问题,通过调整运动序列避免机器人之间发生路径冲突^[25]。但是在高维空间中搜索路径比较困难且计算量较大。

关英姿等^[26]提出了一种基于优先级的路径协调策略:首先需要指定机器人的优先级,对高优先级的机器人进行路径规划,然后将之视为障碍物再对低优先级的机器人进行运动规划,这种方法将复杂的多机器人路径规划转换成较为简单的单机器人路径规划,降低了规划难度。Montaño等^[27]提出了一种机器人在线协调算法,不仅能使运动轨迹能量最优,也能减少路径规划所需的计算时间。对于双机器人协同铺丝系统在某些情况下因为需要避免碰撞和奇异点而没有合适的路径进行铺丝,Zhang等^[28]提出了一种半离线轨迹同步算法,使用摄影测量传感器检测机器人位姿,并计算出修正值,在线对预先规划的路径进行修正。

3 双机器人系统铺丝精度控制

3.1 末端执行器精准定位与基坐标标定

在双机器人铺丝系统中,会出现两条相邻丝束分别由不同机器人铺放的情形,此时相邻丝束路径中心的相对位置误差由两台机器人的定位误差叠加而成,导致铺层产生间隙或重叠等铺放缺陷。由于几何误差和非几何误差的存在,使用机器人控制

器来描述机器人的运动学模型会产生较大的定位误差^[29]。在双机器人系统中,为了实现机器人的精准定位和控制,在线独立测量两台机器人的末端姿态是必要的。

传统的方法是使用D-H矩阵求解机器人的末端位姿数学模型^[30-31]。El公司的机器人铺丝系统在机器人旋转轴上安装光学编码器并开发了一种高阶动力学模型实现高精度补偿,有效提高了机器人末端执行器的精度^[32]。

使用激光干涉技术对机器人末端执行器进行实时动态测量是目前比较常用的一种方法,具有精度高、跟踪识别范围广等优点。在丝束铺放过程中利用转向机构的方位角和仰角位移可以定位末端执行器的位置,并且可以使用双位置敏感二极管对其进行姿态测量。Shirinzadeh等^[33]利用激光干涉技术对机器人末端执行器进行高精度定位制导,沿着激光束的轨迹将机器人的末端执行器引导至期望位置以提高定位精度,试验结果显示可将机器人的绝对定位精度提高到 ± 0.1 mm以内。

在双机器人铺放系统中,机器人不仅需要获得各自的末端姿态,还需要得到另一台机器人的各个关节和末端执行器的位姿信息,以此避免机器人之间发生碰撞并且保证铺丝质量。因此双机器人标定技术是使得铺放系统能够正常工作的关键技术之一。不同于单机器人标定,双机器人铺放系统的标定需要得到两台机器人基坐标系之间的位姿变换矩阵,进而确定两个机器人的位置关系。

纪慧君等^[34]提出了一种基于“三点定圆”的改进双机器人基坐标标定方法,操作简单并且成本较低,但是该方法没有考虑机器人自身误差所产生的影响。燕浩等^[35]提出了一种基于视觉的机器人标定方法,通过相机对机器人进行标定,完成基坐标标定的同时得到手眼标定参数,从

而得到系统完整的标定参数。

向勇等^[36]使用激光跟踪仪结合单位四元数法对双机器人的基坐标进行精确定位,为了消除机器人运动学误差,在完成初定位后,利用激光跟踪仪测量误差进行二次定位,这种方法的精度很高,但是操作复杂、所需设备昂贵。魏振忠等^[37]通过将工业相机固定在一台机器人末端,记录另外一台机器人末端图像并进行手眼标定求解,得到了基坐标变换矩阵,该方法避免了遮挡等问题,具有较高的标定精度。

不借助外部测量设备的接触式标定虽然操作简单、成本低廉,但是标定精度较低,不适合航空复合材料零部件的制造。使用激光测量仪或者工业相机等辅助设备的非接触式标定设备价格昂贵、操作较为复杂,但是精度很高,适合应用在双机器人系统的铺放过程。

3.2 铺放路径精准规划

在机器人丝束铺放过程中,不仅需要机器人进行运动规划,而且需要对末端执行器即铺丝头进行精准路径规划,铺丝路径规划的好坏很大程度上决定了复合材料构件的铺放质量和铺放效率。对铺丝头进行路径规划的目标是计算出轨迹方向、铺放成型的约束条件以及铺层方向。目前,路径规划一般被分为路径生成、路径评估和运动仿真3个阶段,路径生成之后需要依次进行评估和运动仿真来确定路径是否合适。但

是在路径评估和运动仿真阶段可能会由于规划参数选择不合理或者表面曲率变化引起路径偏移,最终导致规划的路径并不合适,需要重新生成新的路径再次重复上述步骤。

浙江大学Qu等^[38]提出在生成路径之前增加一个铺放可行性分析阶段,确定一些必要的规划参数,包括丝束宽度、压辊规格等。虽然增加了路径规划的周期,但是减少了规划参数选择不当带来的迭代次数,降低了路径规划的耦合性和复杂性。Jiang等^[39]建立了基于路径误差的理论评价模型,在铺放前对路径精度进行评价,并优化压辊沿路径的方向,能够减少路径误差。

比较常用的路径规划算法是平行等距偏移算法^[40-42]。首先定义一条参考曲线,将其投影到模具曲面得到一条相交线(称为初始路径),然后沿曲面平行于初始路径偏移相同距离生成其他路径,并将生成的路径扩展至模具边界,如图4所示。路径规划方法可被分为固定角度路径规划算法和变角度路径规划算法。当铺放路径与选择的基准线之间的夹角为定值时为固定角度路径算法,当夹角数值可变时为变角度路径算法,并且越来越多的研究表明变角度算法更能减少丝束之间的间隙和重叠^[43]。

在开放轮廓曲面和圆柱曲面的研究基础之上,Hély等^[44]提出了两种路径规划算法:一种是以恒定的铺放角度生成连续路径;另一种则

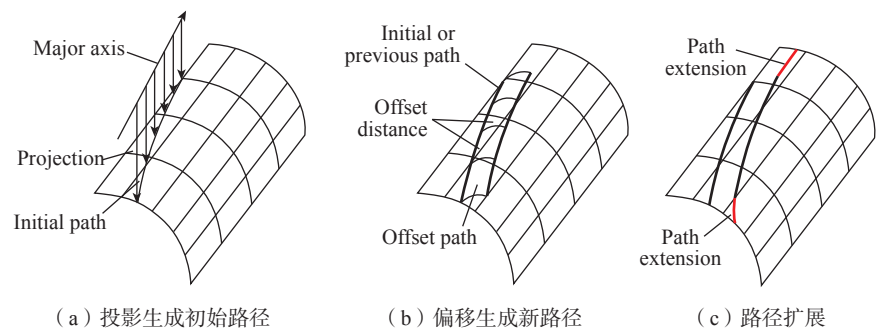


图4 平行等距偏移算法步骤

Fig.4 Parallel offset algorithm steps

是在此基础上考虑曲率约束,这两种算法的目的是消除间隙和重叠,保证铺丝质量。

对于一些复杂轮廓结构,单独使用一种路径算法性能较差,邵忠喜等^[45]结合固定角度法和等偏距法,提出了一种新的路径规划算法。该算法使用固定角度算法确定初始路径,然后通过平行等距偏移算法得到下一条路径,当铺放角度超过阈值时,使用固定角度算法对路径进行修正,之后对路径进行等距偏移生成新的路径。该算法提高了铺放效率和质量,但是没有考虑不同的工艺要求在铺放效率和质量之间有着不同的平衡。

Jiang 等^[46]提出了一种基于效率和质量评价的机器人纤维放置路径规划算法,在特定工艺要求下根据质量和效率之间的平衡生成路径。Vijayachandran 等^[47]将机器学习和遗传算法相结合建立最优导向路径,实现了对间隙和重叠偏差的控制,以此保证铺丝质量。

3.3 铺放缺陷在线检测

Rudberg 等^[48]提出,在使用机器人自动铺丝技术制造飞机构件的时间分布中,46%的时间用于检查和纠正工艺错误,这个结果意味着仅提高机器人的运动速度只能提升较少的生产效率,更重要的是要尽量避免出现缺陷或者缩短缺陷的检测时间。

机器人自动铺丝具有高度的准确性和可重复性,但是在制造过程中依旧会产生缺陷问题。在实际铺放过程中,丝束很容易出现间隙、重叠、褶皱等位置缺陷,其中间隙和重叠是主要的缺陷问题。铺放路径与设计规划路径不匹配是出现间隙和重叠最主要的原因^[49-50]。Shirinzadeh 等^[40]提出了一种机器人纤维铺放曲面算法以产生均匀的复合材料铺层,使后续丝束之间不产生间隙。Wang 等^[51]使用弧长参数对复杂的开放轮廓结构进行路径规划,可以将丝束偏移量控制在误差范围内。

在机器人自动铺放过程中可能会产生各种各样的缺陷,这些缺陷会导致碳纤维预浸料固化后维修成本极大提高,并且会降低零部件的质量,严重的甚至会报废,造成材料浪费和成本提高。所以需要研究人员对复合材料零部件生产过程进行缺陷检测和质量控制,发现缺陷后分析产生原因并及时纠正,保证铺放质量。

传统的方法是操作人员进行目视检测,检查铺层边界位置的准确性、丝束间的间隙和重叠程度是否符合标准、有无异物、褶皱等,每次检查都需要中断铺丝过程,极为耗时并且操作人员负担很大。法国先进工业工程学院提出了一种混合控制方案提高丝束铺放精度^[52],该方案使用力伺服系统控制压辊的压实力和力矩,使用视觉伺服系统控制丝束铺放的横向位置,通过闭环控制系统校正定位误差,提高丝束的铺放精度进而改善构件的质量。

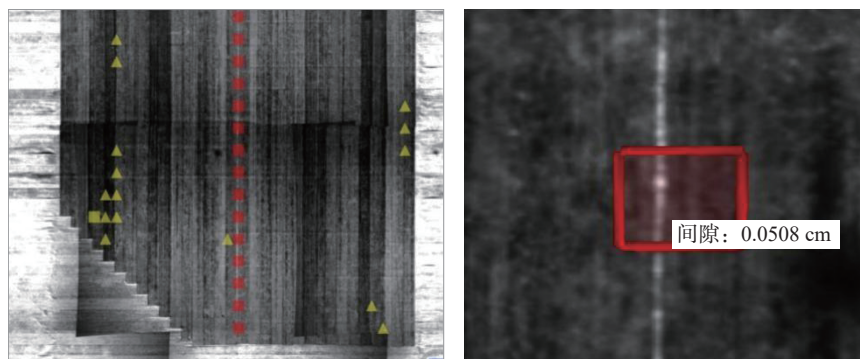
Schmidt 等^[53]使用热成像系统在误差范围内对丝束间隙宽度进行实时监测,并基于此系统对路径进行优化。新铺放的丝束与底层表面会存在较为明显的热对比,使用边缘检测方法检测丝束位置和几何形状,进而可以确定每条丝束的边缘,计算出丝束间隙的宽度,还需要进行表面检测来检查有无异物和其他缺陷。

机器学习在先进制造领域有着

广泛的应用,其适用性正扩展到复合材料制造领域。在质量控制中利用可视化监测系统对铺放缺陷和异常进行检测和分类,并将相关信息进行参数化和可视化以方便操作人员。使用热图过程监控系统观察整个铺丝过程,并将所有工艺信息存储在数据库中,然后使用机器学习的方法对信息进行分析以优化工艺参数^[54]。文立伟等^[55]基于机器视觉检测技术研发出一种用于零部件表面缺陷的检测系统来提高铺丝精度。Sacco 等^[56]开发出了一种基于机器学习和计算机视觉的缺陷自动检测系统,不仅可以对缺陷进行分类识别,还可以对缺陷特征进行精确描述。

由于复合材料预浸料铺层表面具有非均匀光线反射和复杂的纹理特征,这会导致利用视觉检测技术获得精准的信息变得困难。热成像系统克服了视觉检测可能产生的误差,利用丝束的热辐射进行缺陷检测,但是还需要不断改进缺陷检测算法和对温度异常的预测,提高铺层表面缺陷检测的灵敏度。

EI 公司设计了一种缺陷自动检测解决方案,将激光投影仪、摄像机和激光轮廓仪集成到用户界面中,可以将识别到的缺陷投影到复合材料构件表面位置,减少了工作人员的检测时间,如图 5 所示^[57]。DLR 的研究人员开发了一种新的缺陷检测工艺,



(a) 铺层的间隙误差检测 (b) 局部放大图

图 5 EI 公司开发的缺陷自动检测方案^[57]

Fig.5 Automatic defect detection scheme developed by EI^[57]

根据制造的复合材料部件尺寸,在机器人上安装一个或者多个热成像摄像头,可以有效检测复合材料固化过程中是否发生泄漏,并通过软件自动评估是否继续固化,确保部件的顺利制造,节省资金、时间和人力。

随着自动化检测技术的飞速发展,激光投影仪、激光轮廓仪、照相机等一系列用于机器人自动铺丝的新检测开始普及并使用,能够有效缩短生产时间。

4 结论与展望

机器人铺丝设备运动灵活、经济高效,在波音、空客等公司的产品制造中已得到了大规模应用。双机器人协同铺丝系统因为能够显著提高生产效率成为当前的研究热点,目前国内外研究都取得了一定的进展,但仍需要不断改进和完善,建议从以下5个方面进一步开展研究。

(1) 双机器人铺放系统利用冗余且兼容的机器人实现高效且自我调节的生产过程,需要考虑装备的可行性以及工艺要求的工作步骤,确定最合适的解决方案及其实施方法。这个过程必须在不停机的情况下在线进行,而基于人工智能的运筹学或应用程序的优化方法可用于此目的。

(2) 工业机器人的自主性和智能化程度有较大的提升空间,需要赋予机器人信息共享能力和适当的认知处理技能。机器人之间要能够共享位置信息避免发生碰撞干涉,在铺放复杂型面时能够自动纠错以提高铺丝精度,减少人为干涉以保证铺丝质量。

(3) 在双机器人协同铺丝过程中,机器人的任务分配方式对于协作效率有着重要影响。铺丝过程中需要考虑复杂的丝束铺叠关系和频繁的丝束剪切动作等,需要对机器人进行更为合理的任务分配,避免机器人间产生相互干扰和冲突。在未知环境或者动态环境下进行铺丝时需要进行动态任务分配和再分配,提高丝束

铺放效率。

(4) 为了实现高质量精准铺丝,还需要为双机器人铺放过程的分析、建模和仿真提供配套的软件系统,实现轨迹规划、后置处理、三维建模、运动仿真以及质量控制等功能。国内对于自动铺丝技术的研究起步较晚,缺乏成熟的设备和工艺技术支撑,相关的软件系统仍处于初步探索阶段,还需要从系统的运算效率、准确性和鲁棒性等方面进行不断完善。

(5) 增加铺放系统中机器人的数量可以制造结构更为复杂的零部件,并且能够极大提高铺放效率,是未来重要的研究方向之一。双机器人铺丝技术已在一些复杂零部件制造上实现了应用,但是基于两台机器人以上的多机器人协同铺丝系统的技术复杂程度显著提高,运动规划难度增大,对控制算法提出了更高的要求,需要国内外学者进行更深入的研究。

参考文献

- [1] 郝大贤,王伟,王琦珑,等. 复合材料加工领域机器人的应用与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2019, 55(3): 1-17.
- [2] HAO Daxian, WANG Wei, WANG Qilong, et al. Applications and development trend of robotics in composite material process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3): 1-17.
- [3] SHIRINZADEH B, WEI FOONG C, HUI TAN B. Robotic fibre placement process planning and control[J]. Assembly Automation, 2000, 20(4): 313-320.
- [4] 文立伟,肖军,王显峰,等. 中国复合材料自动铺放技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(5): 637-649.
- [5] WEN Liwei, XIAO Jun, WANG Xianfeng, et al. Progress of automated placement technology for composites in China[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(5): 637-649.
- [6] LUKASZEWICZ D H J A, WARD C, POTTER K D. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(3): 997-1009.
- [7] 王显峰, 严颀, 薛柯, 等. 机器人高

效自动铺丝技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(16): 14-20.

WANG Xianfeng, YAN Biao, XUE Ke, et al. Research progress of robot automatic placement technology with high efficiency[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(16): 14-20.

[6] DUTTA S, BEHERA L, NAHAVANDI S. Skill learning from human demonstrations using dynamical regressive models for multitask applications[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(1): 659-672.

[7] DELISLE D, SCHREIBER M, KROMBOLZ C, et al. Production of fiber composite structures by means of cooperating robots[J]. Lightweight Design Worldwide, 2018, 11(2): 42-47.

[8] RUDBERG T, FLYNN R, NIELSON J. Production implementation of multiple machine, high speed fiber placement for large structures[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2010, 3(1): 216-223.

[9] ZHANG X M. Modeling and control of the cooperative automated fiber placement system[D]. Montreal: Concordia University, 2017.

[10] 梁涛. 类回转体构件双头铺丝后处理技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

LIANG Tao. Research on post-processing technology for dual-heads automated placement on similar rotation component[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[11] VERMA J K, RANGA V. Multi-robot coordination analysis, taxonomy, challenges and future scope[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 102(1): 10-18.

[12] ÅBLAD E, SPENSIERI D, BOHLIN R, et al. Intersection-free geometrical partitioning of multirobot stations for cycle time optimization[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, 15(2): 842-851.

[13] ZHOU B, ZHOU R, GAN Y H, et al. Multi-robot multi-station cooperative spot welding task allocation based on stepwise optimization: An industrial case study[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 73: 102197.

[14] HASSAN M, LIU D K, XU D L. A two-stage approach to collaborative fiber placement through coordination of multiple autonomous industrial robots[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 95(3-4): 915-933.

[15] KROMBOLZ C, KRUSE F,

- WIEDEMANN M. GroFi: Large-scale fiber placement research facility[J]. *Journal of Large-Scale Research Facilities JLSRF*, 2016, 2: 58.
- [16] 王显峰, 梁涛, 肖军. 双头铺放轨迹后处理技术研究[J]. *玻璃纤维*, 2017(6): 5-10.
- WANG Xianfeng, LIANG Tao, XIAO Jun. Research on post-processing technique for double-heads automated placement[J]. *Fiber Glass*, 2017(6): 5-10.
- [17] 张崧, 刘淑华. 多机器人任务分配的研究与进展[J]. *智能系统学报*, 2008, 3(2): 115-120.
- ZHANG Yu, LIU Shuhua. Survey of multi-robot task allocation[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2008, 3(2): 115-120.
- [18] ZHANG S Y, PECORA F. Online sequential task assignment with execution uncertainties for multiple robot manipulators[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(4): 6993-7000.
- [19] 郭娟, 林勇. 自动铺丝机器人运动学逆解的求解算法[J]. *机电工程*, 2015, 32(4): 575-578.
- GUO Juan, LIN Yong. Inverse kinematics algorithm for the automated fiber placement robotic manipulator[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(4): 575-578.
- [20] 栗伟周, 葛伟峰. 自动铺丝机器人的运动学性能指标分析研究[J]. *机电工程*, 2018, 35(8): 892-897.
- LI Weizhou, GE Xinfeng. Kinematics performance index of automated fiber placement robotic manipulator[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(8): 892-897.
- [21] TIAN L F, COLLINS C. An effective robot trajectory planning method using a genetic algorithm[J]. *Mechatronics*, 2004, 14(5): 455-470.
- [22] WANG X W, SHI Y P, DING D Y, et al. Double global optimum genetic algorithm-particle swarm optimization-based welding robot path planning[J]. *Engineering Optimization*, 2016, 48(2): 299-316.
- [23] SUCAPUCA-DIAZ A J, CORNEJO-LUPA M A, TEJADA-BEJAZO M, et al. Local coordination diagrams for collision avoidance in multi-robot path planning[C]//2019 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2019 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2019 Workshop on Robotics in Education (WRE). Piscataway, 2019.
- [24] CHIDRARWAR S S, BABU N R. Dynamic priority allocation for conflict free coordinated manipulation of multiple agents[C]//2009 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. Piscataway, 2009.
- [25] 吴鸿敏, 苏满佳, 管贻生, 等. 动态调整操作序列的多机器人无碰运动规划[J]. *机器人*, 2016, 38(6): 651-658.
- WU Hongmin, SU Manjia, GUAN Yisheng, et al. Collision-free motion planning for multiple robots using dynamic modification of operating sequence[J]. *Robot*, 2016, 38(6): 651-658.
- [26] 关英姿, 刘文旭, 焉宁, 等. 空间多机器人协同运动规划研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(12): 37-43.
- GUAN Yingzi, LIU Wenxu, YAN Ning, et al. Research on cooperative motion planning of space multi-robots[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(12): 37-43.
- [27] MONTAÑO A, SUÁREZ R. An on-line coordination algorithm for multi-robot systems[C]//2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. Cagliari, 2013.
- [28] ZHANG X M, XIE W F, HOA S V. Semi-offline trajectory synchronized algorithm of the cooperative automated fiber placement system[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 51: 53-62.
- [29] ZHANG J Y, ZHAO C, ZHANG D W. Pose accuracy analysis of robot manipulators based on kinematics[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 201-203: 1867-1872.
- [30] 戴维蓉, 杨涛, 王天琪, 等. 基于变刚度纤维曲线铺放的机器人铺放路径规划及运动仿真[J]. *宇航材料工艺*, 2013, 43(5): 17-21.
- DAI Weirong, YANG Tao, WANG Tianqi, et al. The path planning and motion simulation of the fiber-placed robot based on variable stiffness curved-fiber placed[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2013, 43(5): 17-21.
- [31] GE X, ZHAO D, LU Y, et al. Study of dynamics performance index of the automated fiber placement robotic manipulator[J]. *Journal of Information and Computational Science*, 2011, 8(14): 2975-2982.
- [32] JEFFRIES K A. Enhanced robotic automated fiber placement with accurate robot technology and modular fiber placement head[J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2013, 6(2): 774-779.
- [33] SHIRINZADEH B, TEOH P L, TIAN Y, et al. Laser interferometry-based guidance methodology for high precision positioning of mechanisms and robots[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010, 26(1): 74-82.
- [34] 纪慧君, 苗鸿宾, 李孟虔, 等. 双机器人基坐标系标定方法的研究[J]. *制造技术与机床*, 2021(11): 72-76.
- JI Huijun, MIAO Hongbin, LI Mengqian, et al. Research on calibration method of base coordinate system for dual robots[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2021(11): 72-76.
- [35] 燕浩, 程小虎, 杨正蒙, 等. 基于手眼关系与基坐标关系的协作焊接机器人标定[J]. *机械工程与自动化*, 2020(4): 27-30.
- YAN Hao, CHENG Xiaohu, YANG Zhengmeng, et al. Calibration of cooperative welding robot based on hand-eye relationship and base coordinate relationship[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2020(4): 27-30.
- [36] 向勇, 田威, 洪鹏, 等. 双机器人钻铆系统协同控制与基坐标系标定技术[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(16): 87-92.
- XIANG Yong, TIAN Wei, HONG Peng, et al. Collaborative control and base coordinates calibration technology for dual-robot drilling and riveting system[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(16): 87-92.
- [37] 魏振忠, 张博, 张广军. 双机器人系统的快速手眼标定方法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1895-1902.
- WEI Zhenzhong, ZHANG Bo, ZHANG Guangjun. Rapid hand-eye calibration of dual robot system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1895-1902.
- [38] QU W W, HE R M, CHENG L, et al. Placement suitability analysis of automated fiber placement on curved surfaces considering the influence of prepreg tow, roller and AFP machine[J]. *Composite Structures*, 2021, 262: 113608.
- [39] JIANG M, WU B L, LI F. Path optimization for open-contoured structures in robotic fibre placement[C]//2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC). Hefei, 2017.
- [40] SHIRINZADEH B, CASSIDY G, OETOMO D, et al. Trajectory generation for open-contoured structures in robotic fibre placement[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23(4): 380-394.
- [41] BRUYNEEL M, ZEIN S. A modified Fast Marching Method for defining fiber placement trajectories over meshes[J]. *Computers & Structures*, 2013, 125: 45-52.
- [42] 邵冠军, 游有鹏, 熊慧. 自由曲面构件的纤维铺放路径规划[J]. *南京航空航天大学学报*, 2005, 37(S1): 144-148.
- SHAO Guanjun, YOU Youpeng, XIONG Hui. Optimal fiber placement paths for free-form surface parts[J]. *Journal of Nanjing University of*

- Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(S1): 144–148.
- [43] LI L N, DE XU, WANG X G, et al. A survey on path planning algorithms in robotic fibre placement[C]//The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC). Qingdao, 2015.
- [44] HÉLY C, BIRGLEN L, XIE W F. Feasibility study of robotic fibre placement on intersecting multi-axial revolution surfaces[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 48: 73–79.
- [45] 邵忠喜, 富宏亚, 韩振宇, 等. S形进气道纤维铺放轨迹规划和优化方法[J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 855–861.
- SHAO Zhongxi, FU Hongya, HAN Zhenyu, et al. Path planning and optimization algorithm for fiber placement of S-shaped inlet[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(3): 855–861.
- [46] JIANG M, WU B L, MA L P. A novel path planning algorithm in robotic fibre placement for complex closed surface structures[C]//2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Takamatsu, 2017.
- [47] VIJAYACHANDRAN A A, DAVIDSON P, WAAS A M. Optimal fiber paths for robotically manufactured composite structural panels[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2020, 126: 103567.
- [48] RUDBERG T, NIELSON J, HENSCHIED M, et al. Improving AFP cell performance[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2014, 7(2): 317–321.
- [49] OROMIEHIE E, PRUSTY B G, COMPSTON P, et al. Automated fibre placement based composite structures: Review on the defects, impacts and inspections techniques[J]. Composite Structures, 2019, 224: 110987.
- [50] CROFT K, LESSARD L, PASINI D, et al. Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(5): 484–491.
- [51] WANG X P, AN L L, ZHANG L Y, et al. Uniform coverage of fibres over open-contoured freeform structure based on arc-length parameter[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(6): 571–577.
- [52] UHART M, PATROUX O, Aoustin Y. Improving accuracy in robotized fibre placement using force and visual servoing external hybrid control scheme[J]. Acta Materialia, 2014, 2: 20–44.
- [53] SCHMIDT C, DENKENA B, VÖLTZER K, et al. Thermal image-based monitoring for the automated fiber placement process[J]. Procedia CIRP, 2017, 62: 27–32.
- [54] BRÜNING J, DENKENA B, DITTRICH M A, et al. Machine learning approach for optimization of automated fiber placement processes[J]. Procedia CIRP, 2017, 66: 74–78.
- [55] 文立伟, 宋清华, 秦丽华, 等. 基于机器视觉与UMAC的自动铺丝成型构件缺陷检测闭环控制系统[J]. 航空学报, 2015, 36(12): 3991–4000.
- WEN Liwei, SONG Qinghua, QIN Lihua, et al. Defect detection and closed-loop control system for automated fiber placement forming components based on machine vision and UMAC[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(12): 3991–4000.
- [56] SACCO C, BAZ RADWAN A, ANDERSON A, et al. Machine learning in composites manufacturing: A case study of automated fiber placement inspection[J]. Composite Structures, 2020, 250: 112514.
- [57] CEMENSKA J, RUDBERG T, HENSCHIED M. Automated in-process inspection system for AFP machines[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2015, 8(2): 303–309.

通讯作者: 朱伟东, 教授, 博士, 研究方向为柔性构件自动化装配、复合材料构件铺丝、机器人应用与机器视觉。

(责编 七七)

Cooperative Robots Automatic Fiber Placement

CHEN Lixiao¹, FU Yun², ZHU Weidong¹

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Xizi Spirit Aerospace Industry (Zhejiang) Ltd, Hangzhou 310018, China)

[ABSTRACT] Cooperative robots automatic fiber placement is an effective method to improve the efficiency of fiber placement, which has attracted great attention from the aerospace industry. Firstly, the research status at home and abroad is introduced. Meanwhile, the key technology is summarized, including task assignment and motion planning. The factors affecting placement quality and efficiency are analyzed. The methods of location of fiber placement head and base coordinate calibration are introduced emphatically. The methods of precise planning of fiber laying path are summarized. Besides, the causes of defects in robot fiber placement are studied. The technique of defect detection on the surface of lay-up is discussed. The method of optimizing process is also described. Finally, the development trend of robotic automatic placement equipment to achieve more efficient placement is prospected.

Keywords: Cooperative robots; Task assignment; Motion planning; Base coordinate calibration; Fiber path planning; Defect detection

(责编 七七)