

华中科技大学本科生自然科学创新基金 申请书（机械学院初步申报版）

项目名称：爬壁加工机器人在复杂制造环境下的加工区域划分与集群协作避障方法研究。

申请人：游子震

申请人学号：U202110607

移动电话：13317334502

电子邮件：u202110607@hust.edu.cn

所在院系：机械科学与工程学院

填表日期：2024 年 5 月 19 日

华中科技大学本科生院制

2024 年 5 月

基本信息

申请人信息	姓名	游子震		性别	男	
	出生年月	2003 年 6 月		民族	汉族	
	导师姓名	龚泽宇		导师职称	副教授	
	学籍单位	机械科学与工程学院（系）		学号	U202110607	
	电子邮箱	u202110607@hust.edu.cn				
	手机号码	13317334502		QQ	2432794959	
	研究领域	机械电子工程				
	是否基础学科拔尖学生培养计划 2.0 基地				<input type="checkbox"/> 是 <input checked="" type="checkbox"/> 否	
项目基本信息	项目名称	爬壁加工机器人在复杂制造环境下的加工区域划分与集群协作避障方法研究。				
	英文名称	Research on the division of processing area and cluster collaborative obstacle avoidance method of wall-climbing processing robot in complex manufacturing environment.				
	研究期限	2024 年 5 月 30 日---2025 年 5 月 30 日				
	研究方向	机器人与机构学				
	申请金额	5（万元）				
	中文关键词	大型复杂构件；爬壁机器人；运动规划；集群算法				
	英文关键词	large and complex components; wall-climbing robots; Motion planning; Clustering algorithms				
中文摘要	<p>（本部分内容字数不超过 500 字）</p> <p>本研究聚焦于爬壁加工机器人在复杂制造环境下的加工区域划分与集群协作避障方法。鉴于大型复杂构件在航空、航天等领域的重要性，以及单个爬壁机器人加工能力的局限性，本研究提出通过集群制造模式来提升加工效率和精度。研究内容包括：首先，对机器人集群路径规划基础架构和规划方法的分析与优化，旨在构建适用于爬壁加工集群机器人的集群方法；其次，探讨爬壁加工机器人加工区域划分的力学与几何原理，并设计相应的任务规划方法；最后，基于生物集群行为的理论，对协作避障方法进行理论分析与模拟，以优化集群机器人的运动轨迹。</p> <p>本研究不仅将促进爬壁加工机器人在大型复杂构件制造中的应用，而且将为集群机器人技术的发展提供理论支持和技术参考。</p>					

报告正文（从以下三方面进行阐述，不超过 3000 字。请勿删除或改动下述提纲标题及括号中的文字。） 建议 2-3 页

研究初衷	<p>（为什么选择该研究课题？）</p> <p>制造业是立国之本、强国之基、富国之源，肩负创造物质财富的历史责任，是科技创新和民生发展的坚实基础。大力发展制造业，是实现高水平科技自立自强的重要之路。</p> <p>在新时代背景下，机器人智能制造模式在航空、航天、海洋工程等行业大型复杂部件制造中发挥先锋作用，赋能“制造强国”建设。而爬壁加工机器人凭借其广阔的工作空间和灵活的部署，可以为大型复杂部件创造革命性的制造范本。</p> <p>但是，大型复杂构件尺寸超大、形状复杂，单个爬壁加工机器人难以实现其高效精准加工。一是单个机器人的加工能力有限，限制了构件的加工效率，二是由于单个爬壁机器人加工范围的限制，使得构件中部分曲率过大或过小区域无法得到有效加工。针对上述问题，爬壁加工机器人的集群制造是最优价。为了实现既定的加工效果，需要对不同的加工构件和不同型号的加工机器人进行合理的加工区域划分，实现制造任务的自主分配和集群成员故障时的编队重排；同时，随着集群规模的增大，多机器人协同控制的复杂性急剧增加。为了避免加工时机器人产生碰撞，就需要对集群协作避障方法进行研究。</p>
前期工作	<p>（前期做了哪些思考和准备？包括但不限于查阅文献、理论分析、实验验证等）</p> <p>一、选题调研与文献查阅</p> <p>首先，我广泛查阅了国内外关于机器人智能制造、爬壁机器人技术、集群协同控制以及避障策略等领域的最新文献。这些文献不仅为我提供了项目研究的理论基础，还帮助我识别了当前研究的热点和难点，明确了项目的研究方向。</p> <p>二、理论分析</p> <p>在理论分析方面，我针对大型复杂构件的加工需求，分析了单个爬壁加工机器人的工作局限性和集群制造的潜在优势。我深入校企横向项目，对集群制造的加工效率、加工质量以及成本效益进行了预测和评估。同时，我还研究了多机器人协同控制的算法和策略，为后续的编队重排和避障方法设计奠定了基础。</p> <p>三、平台保障</p> <p>本人加入陶波、龚泽宇老师团队，深入参与“超大型风电叶片吸附式移动机器人表面后处理系统研究”。课题组搭建的爬壁机器人平台，为实地实验演示提供了物质基础，为后续研究的开展提供便利。同时，我也积极与导师和同行进行交流讨论，不断完善项目的研究内容和方案。</p>
研究内容	<p>（包括研究目标和拟解决的关键问题，以及拟采取的研究方法、技术路线等）</p> <p>一、研究内容</p> <p>➤ 研究内容 1：机器人集群路径规划基础架构和规划方法的分析与优化。</p> <p>受社会型生物群体行为启发，群体智能得到日益广泛的关注，机器人集群作为群体智能的重要承载者得到了大量研发和广泛应用。机器人集群路径规划技术作为一项核心技术也得到快速发展。在近几年的研究中，研究人员归纳出冗余计算架构、分布计算架构和分层计算架构等集群路径规划基础架构。分类梳理了仿生学方法、人工势场法、几何学方法、经典搜索法和进化学习法等路径规划方法。本研究旨在分析上述集群路径规划基础架构和规划方法的基本原理，找出其共性与异性，并综合优化决策出适用于爬壁加工集群机器人的集群方法，建立集群协作底层算法逻辑。</p>

➤ **研究内容 2：爬壁加工机器人加工区域划分的力学与几何原理及规划方法。**

由于具有大型复杂构件尺寸超大、形状复杂的特点，因此对不同机器人加工区域的划分与任务规划显得尤为重要。首先不同加工区域的表面曲率不同，自然适用于不同尺寸的机器人进行加工；其次在不同加工区域，爬壁机器人对工件产生的力学效应也有所差异，也需要机器人对加工力与吸附力进行调整。本研究旨在**从加工区域划分的力学与几何原理出发，提出任务规划方法，为加工效率优化提供有力支撑。**

➤ **研究内容 3：基于生物集群行为的协作避障理论分析与模拟。**

集群机器人设计方法大量借鉴了生物集群行为，如组织器官形成、昆虫群体聚集、导航、决策以及鸟类、鱼群等的一致性运动等。因此，生物集群运动涌现机制的理论研究是集群机器人进一步发展的重要基础。本研究旨在**从研究生物集群行为出发，探寻协作避障理论的底层生物逻辑，同时对现有的协作避障理论进行分析，并结合仿真软件对避障理论进行模拟，优化集群机器人运动轨迹。**

二、研究目标

本项目从爬壁加工机器人对加工大型复杂零件时的集群化要求出发，探索其在复杂制造环境下的加工区域划分与集群协作避障方法：**通过分析并优化机器人集群路径规划基础架构和规划方法，建立集群协作底层算法逻辑；**通过分析爬壁机器人加工区域划分的力学与几何原理，同时研究生物集群行为，对协作避障理论进行分析，再结合底层算法逻辑框架，**优化得到加工区域的规划方法和集群机器人的避障方法，**为优化集群机器人运动轨迹，提高集群机器人生产效率提供理论基础与技术源泉。

三、关键科学问题

- **关键科学问题一：复杂构件的力学与几何信息的提取与分析方法。**
- **关键科学问题二：协作避障行为的生物学基础研究与应用方法的理论化抽象提取。**

四、研究方案

➤ **路线一：基于仿真模拟与优化策略分析集群路径规划基础架构和规划方法**

为了分析各类集群算法的控制效果，我们采用仿真模拟和实物验证等多种方法对各类算法进行分析，并通过优化策略选择综合决策出适用于爬壁加工集群机器人的集群方法，建立集群协作底层算法逻辑。

1、仿真模拟

我们首先建立了机器人集群的**动力学模型**：

$$\ddot{X}(t) = -\lambda \Phi_s \Phi_s^T X(t) - \lambda \Phi_s G, \quad s \in S.$$

然后分析聚合的**路径的平滑程度**，判断尝试的次数与聚合的准确性；随后分析**Lyapunov 函数和目标函数**，观察其**收敛性与收敛速度**，分析其聚合效果；最后研究不同算法在**不同蜂群规模**下的性能，将机器人集群的规模从 100 到 1000 大小变化，分析仿真效果，验证算法在不同群体规模的程度下的控制效果。同时为了消除代理人和目标的初始位置对结果的影响，性能差距被引入为我们的算法和最优切换策略的收敛时间比。

2、实物验证

此外，还可以将所提算法在一个由若干移动机械臂组成的集群系统中进行了验证，如下图所示。最终得到机器人集群实现的任务安排表和不同事件的触发时刻，对数据进

	<p>行分析获得结论。</p> <p>在得到各类集群算法后的仿真与实验数据后，结合爬壁加工机器人的应用场景决策得到最终选定的集群路径规划基础架构和规划方法。</p> <p>➤ 路线二：基于力学、几何信息提取与分析及任务信息的加工区域划分方法</p> <p>1、力学、几何信息分析</p> <p>大型复杂构件加工区域划分以构件的三维模型（CAD 或点云等）为输入，可由设计文件或实物扫描重构得到。几何划分时，构件的三维模型统一转化为 STL 格式，即网格模型，然后根据构件表面的几何特征，如：曲率、法矢等信息，将其划分为若干个具有几何属性一致性的曲面；再耦合材料信息，通过有限元分析能够得到构件的力学性能。</p> <p>2、任务划分</p> <p>任务划分需要根据机器人的作业要求，如：可达性、无奇异、无碰撞等，依次将各曲面进一步划分为若干个形状规整、面积相近的子区域轨迹点，来源于构件几何信息，且与机器人任务直接相关，可作为任务划分的最佳媒介。每个子区域有对应的力学与几何特征，针对不同特征子区域，施加不同的控制信息，将各曲面的整体点云“化整为零”，实现任务划分要求下的最佳加工效果。</p> <p>➤ 路线三：基于生物集群现象与共型映射原理的路径规划与避障分析。</p> <p>1、协作避障行为的生物学基础研究与应用方法的理论化抽象提取。</p> <p>（1）生物学基础研究</p> <p>选择具有典型协作避障行为的生物群体（如鸟类、鱼类等）作为研究对象；通过论文查找、录像记录等方式收集生物群体的协作避障行为数据；利用行为学、生态学等理论对收集到的数据进行深入分析，揭示协作避障行为的生物学机制。</p> <p>（2）协作避障行为的关键要素提取</p> <p>根据生物学基础研究的结果，识别协作避障行为中的关键要素；利用数学方法（如统计分析、图论等）对关键要素进行量化描述；提取关键要素之间的关联关系，构建协作避障行为的数学模型。</p> <p>（3）协作避障方法理论体系的构建</p> <p>将协作避障行为的数学模型与机器人集群协同控制的理论相结合；借鉴现有的协同控制算法（如领航者-跟随者算法、人工势场法等），构建用于机器人集群的协作避障方法；利用仿真实验和实地测试对构建的协作避障方法进行验证和优化。</p> <p>2、基于共形映射的路径规划与避障分析</p> <p>采用共形映射的方法可以将复杂的三维图形降维为二维图形，则可以在二维图形中应用路径规划算法。完成共形映射后在二维参数平面上，规划等间距路径点，确保在参数平面上的均匀分布。进一步地，将这些路径点逆向映射回三维空间，重构至叶片表面的原始几何坐标。</p>
--	--

申请人简历

教育经历	<p>（从高中开始；大学期间教育经历需写明所在院系）</p> <p>高中：2018-2021 年 株洲长鸿实验学校</p> <p>大学：2021 至今 华中科技大学机械科学与工程学院</p>
项目经历	<p>（曾参与的科技活动或项目）</p> <p>2024 年机械创新设计大赛-省级三等奖-第一负责人；</p> <p>2024 年美国大学生数学建模比赛-H 奖-第一负责人；</p> <p>一项大创在申请（魔芋精准施肥机设计）-第一负责人；</p> <p>科学思维与研究方法-“优秀报告获得者”-第二负责人；</p> <p>无碳小车综合训练-课程第二名-第一负责人。</p>
成绩奖励	<p>本科学业成绩、加权排名和获得奖励情况（如论文、专利、奖项等，高中期间获得全国性学科竞赛奖项也可列出）</p> <p>加权 90.99，排名专业第 2（2/26）。</p> <p>连续 2 年获得校三好学生称号；</p> <p>获得过 2 次国家奖学金·国家励志奖学金；</p> <p>两项社会奖学金（机缘奖学金、圆梦东风奖学金）；</p> <p>校优秀共青团干部·校优秀共青团员·本科生优秀寝室等十余项荣誉称号。</p>

项目承诺

本人承诺遵守学术伦理,承诺遵守国家和学校规定,合法合规使用项目经费;承诺按照申请书制定的目标和计划完成项目;如在项目结题之前毕业,本人承诺按本科生院要求结题。

承诺人: 游子震

2024 年 5 月 22 日

导师意见

对项目创新性及申请者的思想素质、科研能力、创新潜力和拟开展的研究工作的评价,是(否)同意申报。

导师:

年 月 日