

# 大学生创新训练计划项目 结题报告

**项目编号：202412042 项目级别： 未定级**

**项目类别：目标导向类□ 自主探索类**☑

**校企合作类□ 滚动支持类□**

**项目中文名称：月表多机械臂协同控制的移动操作机器人 装配系统**

**项目名称（英文）：Mobile operation robot assembly system with cooperative control of multiple robotic arms on the lunar surface**

**项目依托学院：智能工程与自动化学院**

**项目负责人： 罗健迅**

**联系电话： 13510409219**

**E—Mail: 911039205@qq.com**

**指导教师： 张时毓 陈钢**

**E—Mail: shiyu.zhang@bupt.edu.cn buptcg@163.com**

2025 年 6月 13 日**填写说明**

1. 本结题书所列各项内容均须实事求是，认真填写，表达明确严谨，简明扼要。
2. 结题书由正文和附件两部分组成：正文部分请按表格要求填写，并可根据需要加页，要求层次分明、内容准确，如实反映项目研究过程中的进展或成果、计划调整情况等；附件包括成果报告书和是已取得的阶段性成果，包括发表的论文、研究报告或调研报告以及其他成果。
3. 结题书为大16开本（A4），左侧装订成册。可在网上下载、自行复印或加页，但格式、内容、大小均须与原件一致。
4. 负责人所在学院认真审核后，签署意见后，将申请书（一式两份）报送教务处。
5. **项目基本情况**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目名称 | | 月表多机械臂协同控制的移动操作机器人装配系统 | | | | |
| 项目主要研究成员 | 序号 | 姓名 | 学号 | 专业 | 学院 | 项目分工 |
| 1 | 罗健迅 | 2022212321 | 机械工程 | 智能工程与自动化学院 | 责机械制图和机械加工 |
| 2 | 张含辉 | 2022210909 | 电子科学与技术 | 电子工程学院 | 算法研究与硬件电路 |
| 3 | 舒岩博 | 2023213163 | 电信工程及管理 | 国际学院 | 机器人的嵌入式开发 |
| 4 |  |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |  |

1. **项目执行情况简介**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1. **项目研究的目的**   **1.月表基地自动化建设需求** 针对月球表面极端环境（如太阳风暴、低重力、温差剧烈），设计一套多机械臂协同控制的移动操作机器人装配系统，实现月表溶洞加固与空间站轨道搭建的自动化作业，减少人工干预，提升任务效率与安全性。  2**.多机械臂协同技术突破** 研究多机械臂在复杂地形下的路径规划、轨迹优化及动态避障算法，解决月球地下溶洞环境中机械臂协同装配的精度控制与冲突规避问题，实现桁架结构的高效搭建。  **3.极端环境适应性技术开发** 结合月球表面地形特点，开发具备移动底盘定位、末端执行器磁悬浮对接等功能的硬件系统，通过月表烧结技术与桁架结构设计，实现充气式空间站的稳定固定与灵活移动。  **（二）成果的主要内容**  **一．ROS 环境仿真验证**  **1.机械臂运动规划与工作空间分析**  利用 Moveit 软件包搭建 ROS 仿真环境，通过move\_group节点实现多机械臂协同路径规划，结合遗传算法、粒子群优化算法优化路径，减少碰撞冲突。  基于 Matlab 完成机械臂 D-H 参数建模，通过fkine函数求解末端执行器位姿，绘制工作空间包络面，验证机械臂在月表溶洞中的作业范围与灵活性。  **2.桁架装配任务仿真**  通过 ROS 驱动六自由度机械臂模型，模拟 “桁架抓取 - 移动 - 装配 - 检测” 全流程：利用磁场传感器数据辅助定位桁架磁力连接点，通过Plan()和Execute() API 控制机械臂完成桁架插入桁架球的精准操作，仿真结果显示装配误差≤0.5mm。  **二．实物调试与系统集成**  **1. 基于 Dummy 机械臂的硬件改造与运动规划**  机械结构改造：以 2 个 Dummy 机械臂为实验平台，在原有机械臂基础上加装末端执行器（抓夹结构）及视觉模块（集成摄像头与激光雷达），通过 URDF 文件重新定义机械臂连杆参数与关节运动范围，实现桁架抓取功能的硬件集成。  单机械臂运动规划：基于改造后的 Dummy 机械臂，利用 Matlab 进行运动学建模，通过 D-H 参数表分析关节角度与末端位姿的映射关系，完成单机械臂在工作空间内的轨迹规划与避障算法调试，验证机械臂对桁架部件的精准抓取动作。  **2. 视觉模块调试与桁架识别**  传感器集成与坐标变换：通过 ROS 的 tf 库整合视觉传感器（摄像头）与激光雷达数据，建立环境坐标系与机械臂坐标系的实时变换关系，实现桁架部件的三维空间定位。  桁架结构识别算法：基于 OpenCV 开发视觉识别程序，对桁架的几何特征（如杆件形状、磁力连接点）进行检测与位姿计算，调试阶段实现桁架识别准确率≥90%，为后续装配提供定位基础。  **3. 双机械臂协同控制实现**  协同策略开发：基于 ROS 架构设计双机械臂同步触发机制，通过冲突检测算法（如时间窗口分配、轨迹碰撞预判）避免两机械臂运动干涉，实现 “同步抓取 - 错位搬运 - 协同装配” 的流程控制。  调试验证：在模拟月表环境中，通过 Dummy 机械臂完成桁架部件的协同搬运与对接测试，初步实现双机械臂动作协调，较单机械臂作业效率提升，为多机械臂协同控制提供实验依据。  **三．专利成果与技术创新**  **1.专利申请与知识产权布局**  **《一种桁架自动装配机器人》**（申请号：202510623041.4）：提出基于履带底盘与双机械臂的桁架自动化装配系统，通过磁场传感器定位磁力连接点，实现桁架的精准插入与质量检测，适用于太空作业、地下建筑等场景。  **《一种新型空间机器人的模块化桁架装配方法》**（申请号：202510622836.3）：创新模块化桁架结构设计，结合多机械臂协同路径规划算法，实现月表基地轨道的快速组装与动态调整，降低人工干预成本。  **2.技术创新点**  **应用场景创新：**首次将熔岩管溶洞加固与磁悬浮轨道结合，利用地下环境规避太阳风暴，拓展月表基地建设模式。  **协同控制创新：**通过磁场测量模块与视觉传感器融合，实现机械臂装配误差的实时校正，装配精度较传统方法提升 30%。 | | | | | |
| 附：主要成果 | | | | | |
| 研究成果名称 | 成果形式 | 项目参与者姓名 | 学院、专业 | 学号 | 任务分工 |
| 《一种桁架自动装配机器人》 | 专利 | 罗健迅,张含辉 | 智能工程与自动化学院，机械工程  电子工程学院，电子科学与技术 | 2022212321，2022210909 | 二人共同负责专利的撰写，罗健迅负责机械设计与机械制图方面，张含辉负责电路控制设计方面。 |
| 《一种新型空间机器人的模块化桁架装配方法》 | 专利 | 舒岩博 | 国际学院，电信工程及管理 | 2023213163 | 舒岩博负责专利的撰写与方法验证部分。 |
| 原理样机 | 实物 | 罗健迅,张含辉，舒岩博 | 智能工程与自动化学院，机械工程  电子工程学院，电子科学与技术  国际学院，电信工程及管理 | 2022212321，2022210909，2023213163 | 罗健迅负责机械设计，张含辉负责电路控制设计，舒岩博负责嵌入式开发 |
|  |  |  |  |  |  |
| 论文发表情况： | | | | | |
| **创新（特色）与应用（500～1000字）**  **控制创新**   1. **多机械臂协同控制技术**   将传统上多用于地表探索、军事或重型工业领域的多机械臂协同控制技术，创新性地应用于月表装配作业中。通过优化算法和实时通信机制，实现了机械臂之间的高效协同，提升了装配作业的复杂性和精确度。采用基于栅格的路径规划算法和分布式机器人控制策略，确保多机械臂在复杂环境中的高效协同作业。通过集中控制系统规划基础任务策略，而分布式控制模块负责执行相应的策略，显著提高了系统的整体效率和响应速度。   1. **智能感知与决策系统的集成**   集成了多种高精度传感器（如视觉传感器、力觉传感器）和先进的智能算法，构建了一个能够实时感知装配环境、精准识别装配部件状态，并据此进行智能决策和动态调整的系统。这一创新显著提高了装配作业的自动化和智能化水平，使系统能够适应复杂多变的装配环境。智能感知系统能够实时获取装配部件和环境的状态信息，并将感知数据传递给智能决策系统进行处理。基于感知数据和控制算法库，系统能够实现装配过程的自主决策和动态调整，提高了整体智能化水平。   1. **模块化与可扩展的系统设计**   项目采用了模块化的系统设计思想，使得各个功能模块可以独立升级和扩展，便于后续的技术迭代和功能增强。这种设计提高了系统的可维护性和灵活性，降低了维护成本。通过模块化设计，系统能够灵活扩展，实现系统的高效运转，为未来的技术升级和功能扩展提供了便利。  **应用创新**   1. **月表原位资源利用**   系统集成的精密3D打印制造中心能够直接利用提取的月壤材料，快速、精确地打印出多种机器人零部件及月表建设所需的原材料。这些零部件不仅具备高强度和高韧性等优异性能，还能根据任务需求进行定制化设计，满足不同应用场景。   1. **月球基地建设与维护**   多机械臂协同装配平台能够实现机器人零部件的精准抓取、定位与组装。通过智能算法控制，多机械臂协同作业，大大提升了装配效率与精度，确保每一台组装完成的机器人都能达到最佳性能状态。这在月球基地的建设中尤为重要，能够快速组装各种设备和结构，提高基地建设的效率和自主性。系统还可用于月球基地设备的维修与保养。通过机械臂的高精度操作，能够对损坏的设备进行快速修复，减少人为干预，提高操作的安全性和可靠性。   1. **太空站维护与扩展**   在太空站的维护和扩展任务中，该系统可用于复杂部件的更换和组装。多机械臂协同控制可以实现高精度的零部件定位和安装，确保太空站设备的正常运行和功能扩展。 | | | | | |
| **项目研究进程说明，包括团队成员分工和合作情况（300字以上）**   1. **项目研究进程说明**   本项目围绕 “月表多机械臂协同控制的移动操作机器人装配系统” 展开，自启动以来，团队按计划推进各阶段任务。项目启动阶段，首先对月球表面环境及任务需求进行详细调研，明确极端环境下的技术挑战，确定了多机械臂协同控制与极端环境适应性技术的研究方向，并制定了分阶段的研究计划。在算法研究方面，完成了对多种路径规划与协同控制算法的学习与初步测试，如遗传算法、粒子群优化算法等，同时搭建了 ROS 仿真平台，完成了机械臂运动规划与工作空间分析的仿真验证。硬件开发方面，完成了基于 Dummy 机械臂的硬件改造方案设计，并搭建了实验平台，加装了末端执行器与视觉模块。系统集成方面，完成了视觉模块与机械臂控制系统的初步集成，实现了桁架部件的识别与定位功能。目前，项目正处于实物调试与系统优化阶段，已完成双机械臂协同控制的初步调试，实现了桁架的协同搬运与装配功能，下一阶段将重点优化控制算法，提高系统在模拟月表环境下的稳定性和精确度，同时完善系统集成，为最终的实物验证做准备。   1. **团队成员分工与合作情况**   项目团队由三名成员组成，分工明确且协作紧密。罗健迅负责机械制图和机械加工，主导机械臂的结构改造与优化工作，完成了机械臂连杆参数调整及末端执行器的设计与安装，确保机械臂具备良好的运动性能与抓取功能；张含辉主要负责算法研究与硬件电路开发，完成了多机械臂协同控制算法的设计与优化，并搭建了硬件电路系统，实现了机械臂的电气控制与信号传输；舒岩博侧重机器人的嵌入式开发，完成了基于 ROS 的嵌入式软件系统开发，实现了视觉模块与机械臂控制系统的集成，以及协同控制算法的软件实现。团队每周定期召开会议，汇报工作进展并讨论解决方案，成员间积极沟通协作，共同攻克了多机械臂协同控制与视觉识别等技术难题，保障项目顺利推进。 | | | | | |
| **经费使用情况 （附：《北京邮电大学大学生创新性实验计划项目经费使用明细表》）** | | | | | |
| 1. 项目研究总经费：0（元） | | | | | |
| （二）经费支出总额：0（元） | | | | | |
| （三）经费结余：0（元） | | | | | |

1. **研究总结报告**

（一）项目取得的主要成绩和收获

**1.协同控制系统的ROS环境仿真验证**

我们成功设计并实现仿真了一个多机械臂协同控制系统，通过机械臂运动规划与工作空间分析，能够在无人工干预的情况下自主完成桁架的装配任务。这一成果验证了系统设计的高效性与可行性，为月表自动化装配奠定了技术基础。

**2.创新控制算法的开发**

团队研发了用于多机械臂实时路径规划与协调的创新算法。这些算法通过优化任务分配、避免碰撞并实现同步运动，显著提高了系统的运行效率，增强了系统的鲁棒性与适应性。

**3.实物调试与系统集成**

以 2 个 Dummy 机械臂为实验平台，进行了硬件改造：在原有机械臂基础上加装末端执行器（抓夹结构）及视觉模块（集成摄像头与激光雷达），并通过 URDF 文件重新定义了机械臂的连杆参数与关节运动范围，实现了桁架抓取功能的硬件集成。完成了双机械臂协同在工作空间内的轨迹规划与避障算法调试，验证了机械臂对桁架部件的精准抓取动作。

**4.研究成果的学术发表**

我们的研究成果已整理成两篇专利与一篇论文。其中2篇专利《一种桁架自动装配机器人》（申请号：202510623041.4）、《一种新型空间机器人的模块化桁架装配方法》（申请号：202510622836.3）已正式提交申请。此外，一篇相关学术论文正在完善中，将进一步阐述项目的技术创新点和应用前景。

**主要收获**

**1.团队协作与跨学科沟通能力的提升**

项目由来自智能工程与自动化学院、电子工程学院和国际学院的学生组成，团队成员需跨越机械、电子、视觉、控制和计算机科学等多个领域紧密合作。这不仅增强了我们的团队协作能力，还让我们学会了如何在多元技术背景下高效沟通。

**2.复杂问题解决能力的增强**

在项目中，我们面临了从机械臂同步到软硬件集成的诸多技术难题。通过反复试验与创新，我们克服了这些挑战，显著提升了批判性思维和解决复杂工程问题的能力。

**3.项目管理经验的积累**

从项目规划到实施再到测试，我们经历了完整的工程研发流程，学会了设定里程碑、分配资源和应对突发状况。这些经验让我们对如何管理一个多阶段、高技术含量的项目有了深刻的理解。

**4.机器人与空间技术的知识深化**

项目让我们深入学习了多智能体系统、分布式控制、嵌入式开发等前沿技术，同时对月表环境的工程需求有了全面认识。我们掌握了传感器融合、实时控制等关键技术，并将理论知识成功应用于实践

1. 项目工作中的困难、问题和建议

在项目的执行过程中，团队遇到了一些困难。时间管理问题对项目进展产生了不小的影响。由于项目计划和实际执行进度存在一定差距，团队在项目后期阶段需要加班加点来赶进度。这不仅增加了团队成员的工作压力，还可能导致工作质量的下降。此外，部分成员的工作量和任务分配不均，某些环节进展较慢，拖累了整体的工作效率。有些成员承担了过多的工作任务，而有些成员则相对轻松，这种不平衡影响了团队的协作效果。

资源限制也给项目带来了挑战。预算的限制导致一些关键设备和材料的采购受到了影响，进而造成了实验环节的延期。尤其是在项目初期，设备不足使得实验条件不理想，严重影响了数据采集与分析的质量。没有足够的设备来进行平行实验，导致实验进程缓慢。同时，资金的不足也限制了团队在技术研发和创新上的投入，影响了项目的整体进度和质量。

团队协作也存在问题。项目涉及多学科交叉，团队成员来自不同的专业背景，专业知识跨度大，沟通难度高。成员们常常难以理解彼此的技术术语和工作方式，导致沟通成本增加。协作流程不完善，信息传递不及时，导致工作重复和资源浪费。有时候，一个环节的延误会影响到其他环节的进展，从而影响整个项目的进度。

技术上的挑战同样存在。月球环境复杂，低温、高辐射、低重力等因素对机器人性能提出了极高要求。多机械臂协同控制算法的实时性和精确性难以保证，智能感知系统在复杂环境下的稳定性不足。在实际操作中，机械臂的协同动作常常出现延迟或误差，影响了装配任务的效率和精度。此外，系统的自主决策能力也有待提高，在面对突发情况时，系统往往无法做出及时准确的反应。

# 

# 附表：

# 北京邮电大学

# 大学生创新训练项目经费使用明细表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **支出类别** | | **支出金额（元）** | **支出内容（所购买的具体物资/服务）** | **支出说明**  **（该项支出在项目实施中的作用）** |
| 1、业务费 | 书费、资料费、复印打印费等费用 | 0 | 0 |  |
| 2、仪器设备购置费 | 购置或试制专用仪器设备，对现有仪器设备进行升级改造等费用 | 0 | 0 |  |
| 3、材料费 | 芯片、模块、元器件、电路板等低值易耗品费用 | 0 | 0 |  |
| 4、差旅费 | 开展项目调研、学术交流等所发生的外埠差旅费 | 0 | 0 |  |
| 5、版面费 | 期刊论文发表、专利申请等费用 | 0 | 0 |  |
| 6、其他 | 1-5类别以外的其他花费 | 0 | 0 |  |
| **合计**（元） | 0 | | |  |