

1. 博士论文研究方向：三臂可重构空间机器人动力学控制及运动规划研究

选题类别：☐基础性研究☒应用性研究☐工程技术攻关研究

☐新开辟的研究方向☐已有研究方向的继续☐其他

2. 博士论文的选题背景及意义和主要研究内容简介

由于空间机器人需要兼具大操作空间和轻质、小发射包络的设计需求，导致空间机器人本体及其面向的工作载体普遍具有跨度大、质量轻、柔性强的特点，因此，空间机器人的建模与操作控制需要解决在基座柔性、关节柔性、操作柔性、接触柔性等多柔性因素并存的情况下的内应力控制、爬行时的闭链动力学建模及求解、精细操作的安全力控及精确定位、多臂协调操作等问题。研究难点主要包括：

1）在机器人构型重构过程中，机器人的自由度、连接方式或尺寸参数发生变化，运动学和动力学模型会发生巨大变化，空间机器人根据不同的任务需求表现出不同的变构型特征，例如单臂支撑构型、双臂支撑构型、多臂支撑构型、多臂串联构型、多臂操作构型等，不同构型具有独立的运动学及动力学约束特征，因此，如何解决多约束变结构特征的动力学建模问题、建立可快速适应重构需求的模型和实时控制算法是亟需解决的难点之一；

2）由于空间机器人末端位姿误差导致操作后的闭链状态极易产生内应力，引起操作端可靠性降低甚至破坏闭链结构，严重影响闭链稳定性及空间机器人的操作安全性，因此，如何消除闭链操作运动学约束下的结构内应力是执行闭链操作任务的关键所在；

3）由于空间机器人赖以工作的载体结构具有轻质薄壁特点，导致空间机器人基座柔性明显，加之空间机器人的本体柔性，使得整个系统呈现出结构基频低、抖动幅值大的特点。因此，如何解决柔性基下空间机械臂多柔性因素影响下的精准定位及精细安全操作问题是在轨操作任务的成败所在。

论文的主要研究内容为：

1）针对空间机器人变结构动力学建模问题，根据多体系统建模原则，构建可重构机器人系统的多刚体拓扑模型，采用空间矢量法搭建多体系统浮动基座动力学模型，开发具有模块化、递推性且与物理结构一一对应的模型和算法，根据不同的任务需求实时调整算法参数及结构，分析并建立各种变构构型下与任务匹配的运动学及动力学约束方程，基于增广拉格朗日法求解差分动态规划及多约束优化问题，获得不同任务约束下的空间机器人动力学可行解。

2）针对闭链操作运动学约束下的结构内应力问题，设计空间机器人多模式控制框架及模式切换控制律，解决自由空间运动位姿残差与约束空间力/位匹配难题。设计零力随动控制算法，消除在机器人末端锁紧拖动运动时的结构内应力，实现零力跟随下的末端可靠锁紧。

3）针对空间机器人柔性基下多柔性因素影响下的精准定位及精细安全操作问题，研究机械臂的大范围刚性运动与基座柔性及本体柔性的耦合振动机理，设计振动抑制算法。通过关节力矩控制改善机械臂和关节柔性行为带来的影响，解决低结构基频下柔性机械臂的精确位置控制问题和关节力矩精确控制问题。针对约束资源下视觉测量精度受限及毫米级误差精度链下机器人末端亚毫米级精细操作问题，设计机械臂力控制方案，研究类人化操作方法及随机搜索策略，实现末端位姿监督下的力精细操作控制。

3. 该选题所依托的科研项目或研究经费来源情况

课题来源于国家部委某项目，开展可爬行多臂机器人设计，关键技术验证及地面试验。

1. 博士论文研究方向：三臂可重构空间机器人载荷操作及末端精细力控制方法研究

选题类别：☐基础性研究                      ☒应用性研究                      ☐工程技术攻关研究

☐新开辟的研究方向                      ☐已有研究方向的继续                      ☐其他

2. 博士论文的选题背景及意义和主要研究内容简介

三臂爬行可重构机器人由于基座摄动、结构柔性、跨时间尺度下的运动耦合行为等影响因素，严重限制了其末端运动精度及约束空间作业时的灵巧调整能力。因此，需要深入研究多源耦合因素下的多臂系统动力学演化原理，建立多臂协调控制框架，突破空间多臂机器人协调控制和灵巧操作的关键技术。

论文研究方向主要为深入研究三臂空间机器人精准定位与柔顺控制、标准模块对接机构设计、多臂协调灵巧操作及控制策略设计等关键技术，突破空间三臂机器人多点约束动力学建模方法、结构柔性耦合下空间多臂系统的精准定位控制、多源误差影响下模块亚毫米级间隙的组装方法与协调控制等关键技术问题。

三臂机器人爬行或末端操作时，运动自由度为14-21个。针对机械臂的超冗余特点，存在碰撞风险、基座扰动风险、末端残余抖动风险等多种不确定因素，建立任务约束模型，在终端约束、路径约束及闭链约束下进行非线性优化问题求解。

针对空间机械臂在轨载荷操作中的适配器主被动端的插拔对接及精细作业问题，研究机械臂的安全精细对接技术，重点解决在多源误差作用下如何实现亚毫米级销孔插拔对接及载荷适配器主被动端复杂接触表面下的精细力控制问题，解决低结构基频下柔性机械臂的精确位置控制和关节力矩精确控制。在约束资源下诸如视觉测量精度受限及毫米级误差精度链下机器人末端亚毫米级精细操作问题。研究类人化装配的智能操作方法及随机搜索策略，实现对接模块主被动端末端位姿监督下的力精细操作控制。

3. 该选题所依托的科研项目或研究经费来源情况

国家部委重点项目可重构xxxx研究，研究周期202404-202603，总经费3200万。