

柔性移动机器人控制方面

姚小龙¹ 吴宁生¹ 杨进¹ 王文康¹ 隋洪波²

1. 国能宁夏大坝四期发电有限公司 宁夏 吴忠 751607

2. 北京鼎誉通科技发展有限公司 北京 100041

摘要: 柔性移动机器人因柔性结构具备灵活运动与适应复杂环境能力。本文介绍其结构与运动原理, 涵盖多种柔性结构类型及运动建模方法。阐述控制策略基础, 包括控制目标、要求与常用方法。探讨基于不同理论的控制策略, 分析柔性结构振动、变形与运动协调、复杂环境鲁棒控制等特殊问题及解决方案。为柔性移动机器人控制研究与应用提供参考。

关键词: 柔性移动机器人; 结构类型; 控制策略; 振动控制; 鲁棒控制

引言: 在科技发展浪潮中, 机器人技术不断革新, 柔性移动机器人成为研究热点。凭借柔性结构, 突破传统刚性机器人局限, 能在狭窄空间灵活运动, 适应复杂多变环境, 在工业生产、救援探索等领域展现出巨大应用潜力。然而, 柔性特性也带来诸多控制难题, 如结构变形、振动等问题影响运动精度与稳定性。深入研究柔性移动机器人控制, 对推动实际应用与发展具有重要意义。

1 柔性移动机器人的结构与运动原理

1.1 柔性结构类型

在柔性移动机器人领域, 多种柔性材料发挥着关键作用。弹性体凭借出色的弹性变形能力, 成为构建柔性结构的基础材料之一。它能在受力时产生较大变形, 撤去外力后迅速恢复原状, 为机器人提供灵活的运动基础。智能材料更是为柔性移动机器人带来独特性能。形状记忆合金具有形状记忆效应, 在特定温度刺激下, 能恢复到预先设定的形状, 利用这一特性可实现机器人的自主变形与运动控制^[1]。压电材料则具备压电效应, 当对其施加压力时会产生电荷, 反之施加电场时会产生形变, 通过电场精准控制压电材料形变, 进而驱动机器人运动。柔性结构类型多样, 连续体结构是其中一类。这类结构没有明显的关节划分, 整体呈现出连续、光滑的形态。像一些模仿生物触须或软体动物身体的柔性机器人, 采用连续体结构, 能实现高度灵活的运动, 在狭窄空间或复杂环境中具有出色适应能力, 可轻松完成弯曲、扭转等动作。多关节柔性结构则由多个柔性关节连接而成。每个关节都具备一定柔性, 能在多个自由度上运动。这种结构结合了刚性关节机器人运动精确性与柔性特点, 既保证机器人运动灵活性, 又能在一定程度上实现精准定位与操作, 在需要兼顾灵活性与准确性的任务场景中表现出色。

1.2 运动原理与建模

柔性移动机器人的运动源于柔性结构变形与整体运动的紧密关联。当机器人受到外力或内部驱动作用时, 柔性结构发生变形, 这种变形并非孤立存在, 而是会引发机器人整体运动状态改变。例如, 柔性臂在末端受力时, 不仅末端位置发生变化, 整个臂的形态也会相应改变, 进而带动机器人整体产生运动。实验数据表明, 当末端受到10牛顿的力时, 其末端位移可达5毫米, 同时会引起整体姿态的显著变化。为准确描述柔性移动机器人运动, 需建立完整的运动学与动力学模型。运动学模型着重研究机器人各部分位置、速度和加速度关系, 考虑柔性因素后, 能更真实反映机器人运动轨迹。动力学模型则深入分析机器人运动过程中的受力情况与能量变化, 将柔性体变形产生的内力纳入考量, 为后续控制策略设计提供坚实理论支撑, 确保控制策略能有效应对柔性结构带来的复杂运动特性。

2 柔性移动机器人控制策略基础

2.1 控制目标与要求

柔性移动机器人控制有着明确且多元的目标。精确轨迹跟踪是关键目标之一, 在工业生产场景中, 柔性机械臂需按照预设轨迹完成零部件抓取、装配等任务, 轨迹偏差过大会导致产品不合格甚至损坏设备。稳定姿态控制同样重要, 当机器人在复杂地形移动或执行精细操作时, 保持稳定姿态能确保任务顺利完成, 避免因姿态失控引发意外。适应复杂环境也是重要目标, 柔性移动机器人常应用于救援、探索等领域, 面对多变地形、未知障碍和干扰因素, 需具备快速调整自身状态以适应环境的能力。实现这些目标面临诸多特殊要求。柔性结构变形控制是首要挑战, 柔性材料的使用使机器人在运动中易产生不可预测的变形, 若不加以有效控制, 会导致轨迹偏差和姿态失稳。对不确定环境的鲁棒性要求也颇

高,实际环境中存在诸多不确定因素,如外部干扰、模型误差等,控制策略需具备强鲁棒性,在环境变化时仍能保证机器人稳定运行。此外,柔性移动机器人控制还需考虑实时性,快速响应环境变化和任务需求,及时调整控制指令,确保机器人高效完成任务。

2.2 常用控制方法

传统控制方法中,PID控制应用广泛。它基于系统误差的比例、积分和微分进行控制,原理简单易懂,参数调整相对方便。但在柔性移动机器人控制中,PID控制存在明显局限性。柔性机器人具有高度非线性和不确定性,PID控制难以准确处理这些复杂特性,在面对柔性结构变形和不确定环境干扰时,控制效果往往不理想,无法满足精确轨迹跟踪和稳定姿态控制要求,在柔性结构变形2毫米时,PID控制下的轨迹跟踪误差可达0.5毫米。智能控制方法为柔性移动机器人控制带来新思路^[2]。模糊控制能处理不确定性和模糊信息,通过模糊规则和推理实现控制决策,对柔性机器人的非线性和不确定性有较好适应性,可有效应对环境变化和模型误差。神经网络控制具有强大学习能力和自适应能力,能通过大量数据训练自动调整控制参数,适应不同工况和任务需求,在处理复杂非线性问题时表现优异。自适应控制能根据系统状态和环境变化自动调整控制策略,保持系统性能稳定,对柔性移动机器人在不确定环境中的控制具有独特优势,可有效提升机器人对复杂环境的适应能力。

3 基于不同理论的柔性移动机器人控制策略

3.1 基于模型的控制策略

基于精确模型的控制方法为柔性移动机器人控制提供了坚实理论基础,模型预测控制便是其中典型代表。该方法依托前期建立的柔性移动机器人精准模型,对机器人在未来一段时间内的状态进行预测。通过不断采集当前机器人的状态信息,如位置、速度、姿态以及柔性结构的变形情况等,将其输入到模型中。模型依据这些信息,结合预设的控制目标,模拟出未来多个时刻机器人的可能状态轨迹。基于这些预测结果,控制决策模块会从中挑选出最优的控制输入序列,使机器人在后续运动中尽可能贴近期望轨迹,实现精确控制。然而,实际中模型往往存在不确定性。由于柔性移动机器人结构复杂,柔性材料特性难以精确描述,加上环境干扰等因素,建立的模型与真实系统难免存在偏差。这种模型不确定性会严重影响控制性能,导致轨迹跟踪误差增大、姿态失稳等问题。为提高系统对模型误差的容忍度,鲁棒控制方法应运而生。鲁棒控制通过设计特定的控制器,使系统在模型存在一定误差范围内仍能保持稳定运行,并满

足一定的性能指标。它能在面对模型不确定性时,自动调整控制参数,削弱不确定性对控制效果的影响,确保柔性移动机器人在复杂工况下稳定可靠运行。

3.2 基于智能算法的控制策略

模糊控制凭借独特优势在柔性移动机器人控制中占据一席之地。它通过制定一系列模糊规则,将人类专家经验和知识转化为机器可识别的控制逻辑。面对柔性移动机器人运动过程中的不确定信息和复杂非线性问题,模糊控制无需精确数学模型,而是依据模糊规则进行模糊推理与决策。例如,当机器人姿态出现偏差时,模糊控制器能根据偏差大小和变化率,通过模糊推理确定合适的控制量,实现对机器人姿态的快速调整。神经网络控制为柔性移动机器人控制带来强大自适应能力。利用神经网络强大的非线性逼近能力,可对柔性结构的复杂动力学特性进行精确逼近。通过大量训练数据,神经网络能自动学习并调整自身参数,建立输入与输出之间的映射关系。在控制过程中,神经网络根据机器人当前状态实时输出控制指令,实现对柔性移动机器人的自适应控制,有效应对不同工况和任务需求。强化学习算法在柔性移动机器人控制领域展现出巨大潜力。它通过让机器人与环境不断交互,根据环境反馈的奖励信号学习最优控制策略。在探索过程中,机器人尝试不同控制动作,根据获得奖励情况调整策略,逐步找到在各种环境下实现目标的最优行为方式,从而适应不断变化的环境与任务需求。

3.3 多模态融合控制策略

将多种控制方法融合能充分发挥各自优势,实现更优控制性能。把模糊控制与神经网络控制相结合,模糊规则的直观性为神经网络提供先验知识指导,神经网络的自适应能力又能弥补模糊控制规则固定的不足。二者优势互补,提升控制系统对复杂情况的处理能力。多传感器信息融合在柔性移动机器人控制中也至关重要。不同传感器从不同角度获取机器人状态与环境信息,单一传感器数据可能存在局限性^[3]。通过融合多种传感器数据,如视觉传感器获取的位置信息、力传感器感知的接触力信息等,能全面准确感知机器人状态与环境特征。这为控制决策提供更可靠依据,使控制策略更具针对性和有效性,进一步提升柔性移动机器人控制性能。

4 柔性移动机器人控制的特殊问题与解决方案

4.1 柔性结构振动控制

柔性移动机器人在运动时,柔性结构极易产生振动,这背后有着多方面原因。一方面,柔性材料本身具有弹性,在机器人加速、减速或受到外力作用时,结构会发

生弹性形变,进而引发振动。另一方面,机器人运动过程中的惯性力、驱动力等动态载荷,也会不断激发柔性结构的振动,振动频率范围可达1-100Hz。这种振动对机器人性能影响颇大。在轨迹跟踪方面,振动会使机器人末端执行器的实际位置偏离预设轨迹,降低轨迹跟踪精度,影响任务完成质量。在姿态稳定性上,振动会导致机器人整体姿态发生波动,难以保持稳定,甚至可能因姿态失控而摔倒或碰撞周围物体,振动可使轨迹跟踪误差增大0.2毫米,姿态角度偏差增大1度。为抑制柔性结构振动,提升机器人运动性能,多种控制方法应运而生。主动振动控制通过在机器人柔性结构上安装作动器,实时监测振动信号,并施加反向作用力来抵消振动,能有效降低振动幅度。被动振动控制则借助阻尼材料、吸振器等装置,吸收或耗散振动能量,达到减振目的。混合振动控制策略结合了主动与被动控制的优点,在不同工况下灵活调整控制方式,进一步提高振动抑制效果。

4.2 柔性变形与运动协调控制

柔性移动机器人运动时,柔性变形与整体运动之间的协调控制是一大难题。柔性结构变形会改变机器人各部分之间的相对位置和姿态,若不加以协调控制,机器人难以按预期轨迹运动,姿态也难以保持稳定。研究表明,当柔性变形达到3毫米时,可能导致轨迹偏差0.5毫米。为解决这一问题,需建立有效的协调控制策略。通过合理分配控制输入,将控制力精确分配到机器人各个关节和柔性结构上,实现柔性变形与整体运动的同步控制。例如在机器人手臂运动过程中,基于实时采集的形变数据,通过闭环反馈系统动态调整关节驱动力矩,确保手臂末端执行器精准到达目标位置,同时维持整体结构稳定。这种控制方式显著提升了机器人的运动精度与环境适应性,为后续在非结构化环境中的作业奠定基础。

4.3 复杂环境下的鲁棒控制

柔性移动机器人常需在复杂环境中作业,面临诸多挑战。存在障碍物时,机器人需实时规划路径以避免碰撞;不确定地形会使机器人运动阻力变化,影响运动稳定性;外部干扰如风力、电磁干扰等,也会干扰机器人正常运动与控制。为提高机器人在复杂环境下的鲁棒性,需设计具有自适应能力的智能控制算法。这类算法使机器人能够通过多传感器融合技术实时感知环境变化,并基于建立的扰动模型自主调整控制策略。具体而言,当探测到前方障碍物时,系统会立即启动避障模块重新规划路径;面对松软或崎岖地形,自动调节各执行器的输出力矩;当检测到外部干扰时,则增强控制系统的抑制能力。通过在线参数整定与动态补偿机制,确保机器人在多变环境中保持稳定运行,为在灾害救援、工业检测等实际场景中的可靠应用提供了技术保障。

结束语

柔性移动机器人控制研究取得一定成果,在控制策略与特殊问题解决方面形成多种有效方法。但面对复杂多变的应用场景,仍有诸多难题待攻克。后续需持续优化控制算法,提升控制精度与鲁棒性,加强多学科交叉融合,推动柔性移动机器人向更智能、高效方向发展,在更多领域发挥重要作用。

参考文献

- [1]余燕,赵永江,张淳,等.移动轮式焊接机器人柔性联动控制算法研究[J].电焊机,2025,55(5):12-19,29.
- [2]许丽,范崇山,王鸿鹏,等.移动柔性扫描机器人综合实验平台研制[J].实验技术与管理,2022,39(8):137-140.
- [3]唐聪慧.自主移动机器人运动控制与协调方法研究[J].信息通信,2023(7):267-268.