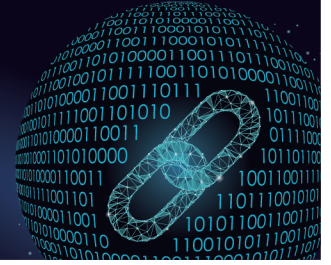




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



柔索驱动机器人运动规划与控制方法研究综述

钱森, 李长奇, 周斌, 訾斌

引用本文:

钱森, 李长奇, 周斌, 訾斌. 柔索驱动机器人运动规划与控制方法研究综述[J]. 控制与决策, 2024, 39(9): 2817–2832.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1661>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

移动机器人运动规划中的深度强化学习方法

Deep reinforcement learning for motion planning of mobile robots

控制与决策. 2021, 36(6): 1281–1292 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0470>

基于 $\text{pm}3\sigma$ 正态概率区间分族遗传蚁群算法的移动机器人路径规划

Path planning of mobile robot based on $\text{pm}3\sigma$ normal probability interval population division using genetic ant-colony algorithm

控制与决策. 2021, 36(12): 2861–2870 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0745>

一种基于免疫机理的确定性移动机器人路径规划算法

A path planning algorithm of deterministic mobile robot based on immune mechanism

控制与决策. 2021, 36(10): 2418–2426 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0059>

机器人抓取检测技术的研究现状

Recent researches on robot autonomous grasp technology

控制与决策. 2020, 35(12): 2817–2828 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1145>

基于免疫优化的平面Acrobot线性自抗扰鲁棒镇定

Robust stabilization of planar Acrobot using linear active disturbance rejection control with immune optimization

控制与决策. 2020, 35(12): 3053–3058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0289>

柔索驱动机器人运动规划与控制方法研究综述

钱森, 李长奇, 周斌, 訾斌[†]

(合肥工业大学 机械工程学院, 合肥 230009)

摘要: 在柔索驱动机器人中采用柔性索代替传统的刚性连杆, 可以显著降低机构的重量及运动部件的惯性, 突破铰链转角及连杆伸缩长度的制约, 因而在工作空间、负载自重比以及适应性方面展现出明显的优势. 这不仅体现了机器人设计中的轻量化理念, 也符合人机共融的发展趋势. 鉴于此, 深入探讨柔索驱动机器人在运动规划、轨迹跟踪、索力分配、振动抑制和容错控制5个方面的代表性理论、典型应用和研究进展, 分析不同运动规划与控制方法的设计思路和优点, 并进一步总结各领域面临的挑战. 最后针对自主重构、变刚度以及人机协同控制问题, 展望柔索驱动机器人运动规划与控制方法的发展趋势.

关键词: 柔索驱动机器人; 运动控制; 索力分配; 振动抑制; 重构策略; 运动规划

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1661

引用格式: 钱森, 李长奇, 周斌, 等. 柔索驱动机器人运动规划与控制方法研究综述[J]. 控制与决策, 2024, 39(9): 2817-2832.

Overview of trajectory planning and control methods for cable-driven robots

QIAN Sen, LI Chang-qi, ZHOU Bin, ZI Bin[†]

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Cable-driven robots are driven by flexible cables instead of traditional rigid links, significantly reducing the weight of the mechanism and the inertia of the moving components, breaking through the limitations of the hinge angle and telescopic length, and offering obvious advantages in terms of workspace, load-to-weight ratio, and adaptability. The development of cable-driven robots represents a lightweight design concept and a development trend of human-robot cooperation. In this review, the representative theories, typical applications and research advancements of cable-driven robots are discussed in areas such as motion planning, trajectory tracking control, tension distribution strategies, vibration suppression and fault-tolerant control. The design approaches and advantages of various motion planning and control methods are analyzed and the challenges in each area are concluded. Finally, the development trends for motion planning and control methods of cable-driven robots are summarized in three aspects, including research on autonomous reconfiguration, variable stiffness control and natural interaction and human-robot cooperative control.

Keywords: cable-driven robots; motion control; tension distribution; vibration suppression; reconfiguration strategy; motion planning

0 引言

柔索驱动机器人是一种特殊的并联机器人, 通过多根柔性索连接底座与末端执行器, 并通过精确控制柔索的长度或柔索连接点的位置来驱动末端执行器进行预定的运动. 与传统采用刚性连杆的驱动方式相比, 柔索驱动机器人显著降低了整体结构的重量及运动部件的惯性, 克服了铰链转角及伸缩长度的局限, 在工作空间、负载自重比、适应性等方面展现出

明显的优势^[1-6], 图1展示了柔索驱动机器人的多个研究方向与应用领域. 然而, 柔索驱动机器人涵盖刚性框架、弹性体、柔性索及传动件等多种组件, 在运动过程中, 各子系统与模块之间的相互作用构成了一个强耦合、非线性、时变的复杂动力学系统^[11], 关键结构与子系统如图2所示, 这些子系统紧密协作, 共同实现复杂的运动控制. 其中, 刚性框架(O)为整体提供稳定的支撑结构, 卷扬机构通过收放柔索提供必要

收稿日期: 2023-11-30; 录用日期: 2024-05-16.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52175013); 国家重点研发计划项目(2022YFB4702501); 国家自然科学基金重点项(52335002).

[†]通讯作者. E-mail: zibinhfut@163.com.

的动力,弹性体与柔性索(k_i)的协同作用有效缓冲了动力输出中的震动,导向机构(A_i)负责调整柔性索的方向以及与末端执行器(B_i)的连接,确保末端执行器(P)可以精确地完成预定的运动轨迹,执行复杂任务.

柔索的大范围整体运动、小幅度弹性振动以及大跨度柔索自重与索长变化引起的载荷分配不均等问题对柔索驱动机器人控制提出了更高的要求^[12-17].此外,柔索受拉而不受压的物理限制,导致传统运动规划和控制方法无法直接应用于柔索驱动机器人,需要针对柔索的特殊性进行相应的调整和优化^[18-21],相较于刚性连杆机器人,柔索驱动机器人在运动规划与控制方面的研究还存在不足.近年来,随着该领域研究关注度的逐渐增加,研究者们提出了众多创新的控制策略,以提升柔索驱动机器人的性能^[22].柔索驱动机器人的实现方式多样化,在自由度、驱动方式和应用领域上表现出独特性,如表1所述.

运动规划对于柔索驱动机器人的精细控制起着至关重要的作用,它通过复杂的算法实现机器人在各种环境下的高精度移动和操作,特别是在超出静态工

作空间的轨迹规划、末端执行器的避障能力以及速度和加速度的柔顺控制方面.这些技术的发展和运用不仅极大地提升了柔索驱动机器人的稳定性和能效,而且推动了其在天文、航空、航天、医疗等高科技要求领域中的广泛应用^[32,38-41].精确的运动规划使得柔索机器人能够在复杂和动态的环境中进行高效、安全的操作,这对于推进这些领域的技术进步和创新具有重要意义.

精确的运动规划为轨迹跟踪控制提供了基础,轨迹跟踪控制技术则确保运动规划能够高效精确地执行.轨迹跟踪控制通过同步控制、自适应控制、滑模控制、模糊控制等先进算法,实现了柔索驱动机器人末端执行器沿给定轨迹的精确移动.这些方法的应用不仅依托于机械工程、控制理论和计算机科学的综合知识,还特别针对柔索机器人的动力学和运动特性进行了优化设计^[42-43].通过这些精密的控制技术,可以显著提高机器人在执行任务时的轨迹跟踪精度和稳定性,从而有效提升机器人的操作性能和工作效率,尤其在需要高度精确控制的应用场景中表现突出.

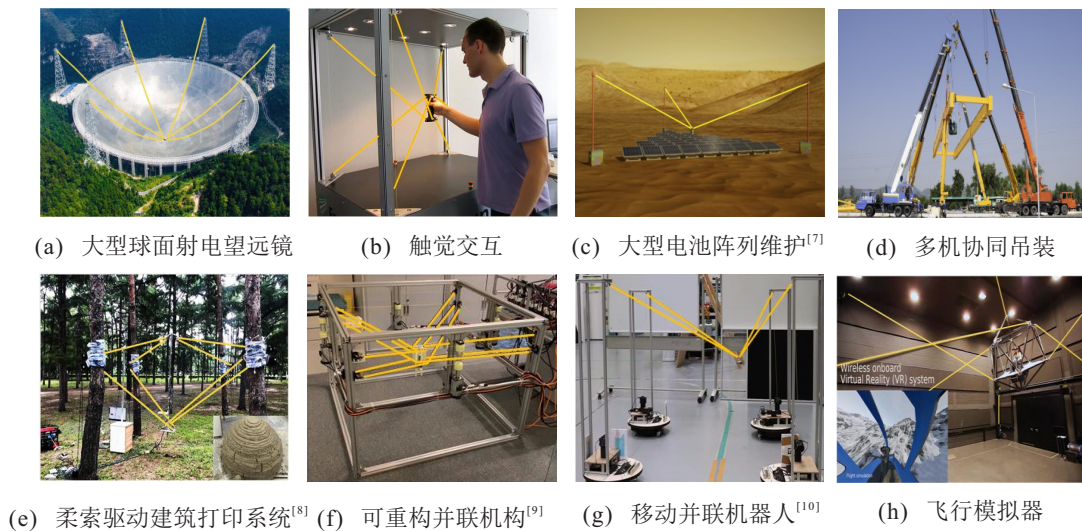


图1 柔索驱动机构的研究与应用

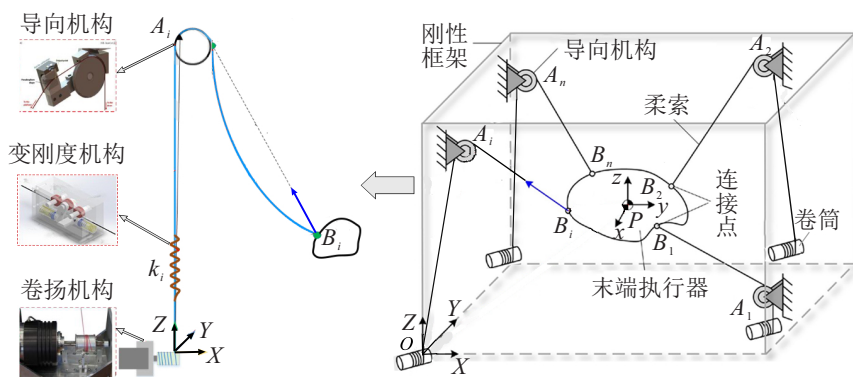


图2 柔索驱动机器人关键结构与子系统

表1 近年柔索驱动机器人控制方法典型研究统计

控制目的	文献	控制方法	自由度	驱动方式	传感器	应用领域
运动规划控制	Wang等 ^[23]	约束路径规划方法	空间(3T)	PLC+直流伺服	微张力传感器	/
	Zhang等 ^[24]	连续路径运动规划	空间(3T3R)	直流伺服	张力传感器	/
轨迹跟踪	Harandi等 ^[25]	自适应阻尼分配控制	平面(2T1R)	PCI卡+直流电机	3D视觉	/
	Zake等 ^[26]	姿态伺服控制	空间(3T3R)	直流伺服	3D视觉	/
	Wang等 ^[27]	自适应非奇异终端滑模	空间(3T)	交流伺服	/	/
	Zhang等 ^[28]	快速终端滑模控制	空间(3T3R)	PLC+直流伺服	张力传感器	/
索力分配	Li等 ^[29]	索力分布与控制策略	空间(3T)	力矩电机	张力传感器	康复训练
	Ueland等 ^[30]	优化力分配策略	平面(2T1R)	/	张力传感器	船舶
	Fazeli等 ^[31]	鲁棒容错约束控制	平面(2T1R)	直流电机	3D视觉	/
	Gouttefarde等 ^[32]	通用索力分配策略	空间(3T3R)	PLC+直流伺服	张力传感器	仓储
振动抑制	Jamshidifar等 ^[33]	抑振稳定器	平面(2T1R)	PLC+直流伺服	加速度传感器	仓储
	Sun等 ^[34]	主动抑振控制策略	空间(1R1T)	交流电机	3D视觉	航天
	Sancak等 ^[35]	面外抑振策略	平面(2T1R)	PLC+交流伺服	加速度传感器	/
负载自适应	Picard等 ^[36]	滑模鲁棒控制	空间(3T3R)	同步电机	张力传感器	/
避障	Meziane等 ^[37]	人机交互控制策略	空间(3T3R)	伺服电机	张力传感器	/

索力分配控制对柔索驱动机器人的性能和操作效率有重要影响。通过精确的索力分配,机器人能够实现更为精准的运动控制和稳定的力学平衡,这对于执行复杂或精细的任务尤为重要^[29-30,44]。索力控制算法需要根据机器人的具体构造、应用场景和任务需求进行定制,以确保最优的力量传递和作用效率。此外,选择合适的柔索材料也是确保索力分配控制成功的一个关键因素,它直接影响到机器人的灵活性、耐久性以及操作的准确性。

柔索驱动并联机器人在执行精密任务时面临诸多挑战,如子系统间相互作用、柔索弹性变形及载荷变化,这些因素均可导致末端执行器位置误差和振动,通过精确调整柔索拉力,优化机器人的动力学性能,索力分配控制减少因索力不平衡引起的振动^[35,45-46]。振动抑制对于优化这类机器人的性能至关重要,有效的振动控制能够显著提升定位精度、操作稳定性,降低维护成本,并延长设备使用寿命。此外,振动控制策略的优化不仅增强机器人在复杂环境下的适应性和可靠性,而且对完成高精度任务至关重要,从而确保了机器人在设计和应用中的高效稳定运行。

多柔索交叉导致在运动过程中可能会出现柔索碰撞导致危险情况,有效的振动控制策略能够显著增强机器人的操作精度与稳定性,并为容错控制体系的构建提供坚实基础。通过降低振动频率,此类策略有效降低了意外故障的发生率,进一步减轻了容错控制系统所需承担的负荷,从而提升了整个机器人系统的

可靠性与鲁棒性^[47-50]。柔索驱动机器人的容错控制方法需要结合控制策略、传感器技术、模拟仿真和远程操作等多种方法,使柔索驱动机器人在面对硬件故障、软件缺陷或外部干扰时,仍能保持正常运行或安全停机。特别是在高风险环境或执行复杂任务时,容错控制提高了机器人系统的适应性和韧性,是实现高度自动化和智能化生产的关键技术之一。

本文旨在分析柔索驱动机器人运动规划与控制方法的发展趋势和研究方向,将详细讨论运动规划、轨迹跟踪控制、索力分配、振动抑制及容错控制这五大核心领域内的代表性方法,并针对移动柔索驱动机器人的自主重构、柔索驱动机器人的变刚度控制、自然交互与人机协同控制等方面,进行深入地总结与未来趋势的展望。鉴于柔索驱动机器人研究的不断深入与发展,本文的目标是对现有的典型柔索驱动机器人进行详尽地阐述,为关注此主题的研究人员提供参考,并激发新的设计思考。

1 运动规划方法

柔索机构的运动规划不仅关系到机器人的运动性能,还影响其力位控制。本节探讨了多种运动规划技术和方法^[51-55],旨在解决柔索机构运动规划中面临的特定挑战和问题。采用基于凸优化的算法和改进B样条曲线方法,可有效利用柔索的动态特性,实现光滑且精确的轨迹规划。通过结合动态轨迹规划、多项式和三角函数,以及等效被动机械系统法,可实现柔索张力和长度的优化调节。同时,采用摆动轨迹技术和等效被动机械系统法减少由柔索弹性引起的

振动,可以保证运动的平滑性和稳定性.这些策略的综合应用,不仅有效解决了运动规划中的挑战,而且提升了系统的效率和可靠性^[56-59].

Capua等^[60-61]针对七条柔索悬挂的移动机器人SpiderBot提出基于凸优化的运动规划算法,综合考虑机器人的静态和动态特性,为复杂地形和障碍物的规避提供了有效的解决方案.此外,柔索驱动机器人面临的一个关键挑战是保证运动的平滑性和精确度,轨迹规划时加加速度不为零,会导致关节电机承受突然的力矩变化,进而引起机械结构的震动和噪音,降低系统的运动平滑性和精确度.Qian等^[62]引入一种改进的B样条曲线,通过插值一组给定的路径点生成捡放路径.同时,使用改进的B样条的一阶和二阶导数表达末端执行器的位置和加速度,将柔索张力约束以B样条参数的形式描述,改进B样条曲线的拉索力峰值和标准偏差均小于传统B样条曲线.

柔索驱动机器人的静态工作空间为只考虑重力影响时末端执行器可以静态达到的姿态集合,但不是所有的姿态都可以在静态条件下达到,它是柔索驱动机器人工作空间的一个子集^[63].对此,Gosselin等^[64-65]研究了探索柔索驱动机器人的动态点对点轨迹规划,提出基于多项式和三角函数的技术,以保证加速度的连续性和柔索张力的约束,从而扩展了机器人的工作空间,并确保了其动态运动的稳定性和可行性.Jiang等^[66-67]引入一个等效的被动机械系统,考虑动态约束,确保柔索保持张紧,解决超出静态工作空间之外的轨迹规划问题.通过保证轨迹端点处有零平移和旋转速度,段与段之间具有平移和旋转加速度的连续性过渡,使末端平台以可控、可预测的方式到达静态工作空间之外的目标点.Sheng等^[68]提出能够到达机器人静态工作空间之外点位的多次摆动轨迹的技术,利用树搜索算法自动确定中间点,并提供运动基元的封闭形式表达和相应的快速可行性检查,以实现轨迹规划目标.目前,相对于静态工作空间,动态工作空间轨迹规划效果仍然不够理想,对此问题Dion-Gauvin等^[69-70]提出点对点运动规划框架,超越了传统静态工作空间的限制.基于改进的环形运动轨迹,引入理想运动状态的概念来保持柔索张力,从而生成可行的轨迹.对轨迹的旋转分量提出四元数和球形线性插值,可有效生成复杂的可行轨迹,而实际效果尚未在柔索驱动机器人的应用中得以验证.

运动学奇异点问题是柔索驱动机器人运动规划中另一个重要的影响因素.运动学奇异点是指机器人在其工作空间中的某些特定位置,其运动学方程变

得不适用或解决方案变得不确定.机器人的某些运动可能需要无限大的速度或加速度,从而使得这些位置的控制变得极其困难,导致机器人末端执行器的位置和姿态控制精度下降,特别是在高速运动或精密操作中.为实现连续路径运动规划,Zhang等^[24]考虑动态约束,给出了运动学奇异点处柔索张力保持正值和连续的充分必要条件;使用几何分析,有效选择中间点,设计了满足无碰撞运动和动态约束要求的分段线性轨迹.进一步,需要对三自由度和六自由度冗余柔索驱动机器人进行连续路径运动规划研究.

柔索驱动机器人的路径规划主要是避免碰撞和柔索干涉,轨迹优化是在路径规划的基础上细化机器人的运动过程,建立位姿关于时间的函数.柔索驱动机器人的轨迹优化目标通常涉及时间、功耗和振动等方面,在优化过程中需要考虑机构运动学和动力学等方面的约束,如速度、加速度、力和力矩及其变化率等.图3为柔索驱动机器人在复杂环境中避障示意图,且避障时路径规划过程中拐点往往不可避免,这使得机器人在路径拐点处发生运动方向突变,加速度和速度急剧变化造成机器人本体振动,缩短了零部件的使用寿命,影响控制精度.

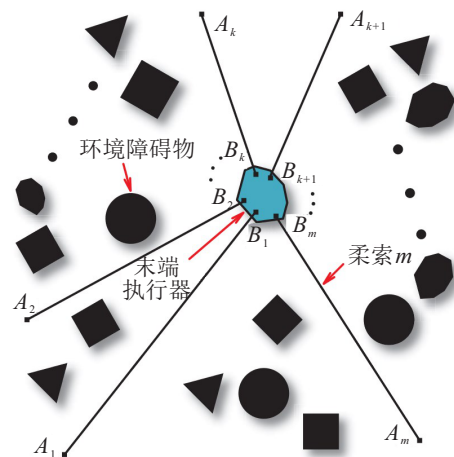


图3 柔索驱动机器人复杂环境避障

为了实现图4所示平滑柔顺的避障路径,钱森等^[71]采用蚁群算法规划多机协调吊装路径,针对局部最优以及无解蚂蚁数量多等问题,提出三值法平面栅格环境建模、基于最佳次佳路径的信息素分阶更新策略和信息素挥发因子动态调整函数,明显提高了最佳路径长度、运算效率等指标.Wang等^[23]针对柔索在工作空间中的交叉分布、复杂环境避障问题,制定闭环约束条件,利用双向快速探索随机树在流形的切线空间中生成分支,结合所设计的扭矩可行检测和碰撞检测,在整个受限配置空间中发现可行路径.为实现动态避障,所述方法性能需要进一步提高.

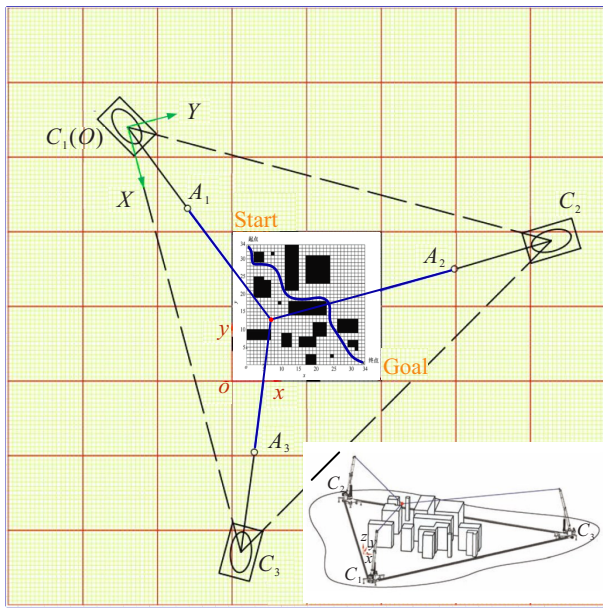


图4 柔索机器人路径规划方法

柔索驱动机器人的运动规划方法在确保机器人的高效与精确运动方面发挥着至关重要的作用. 这一方法包含了从基础的运动轨迹规划到处理复杂的动态约束与奇异点避免, 以及进行细致轨迹优化的全过程. 合理的运动规划策略不仅有助于提升工作效率和降低柔索发生故障风险, 同时能够增强机器人的运动平稳性, 确保末端执行器在速度与加速度方面实现平滑过渡. 此外, 该方法还重点考虑了在避免碰撞和柔索间干扰的同时, 对时间、能耗和振动等多个优化目标进行综合考量, 从而显著提升机器人的操作性能并增强其在多变环境下的适应性.

2 轨迹跟踪控制

柔索驱动机构的轨迹跟踪控制关键在于利用柔索作为驱动元件, 通过调整柔索的长度和拉力, 精确控制末端执行器在空间中的位置和姿态, 实现对其灵活运动的指导. 这种控制方式极大地扩展了机器人在各种工作环境和任务需求下的适应性, 使其能够在危险或人类难以直接到达的区域执行监测、搬运、摄像等多种操作^[25,72-75]. 然而, 柔索驱动机构在末端位姿控制上亦面临众多挑战, 这主要源于其运动学和动力学模型的复杂性, 以及柔索自身的特性, 如柔性、单向约束力、自重和悬垂等问题^[76-81]. 这些特性使得柔索驱动机器人在运动和控制上展现出高度的非线性、耦合性及不确定性, 为其分析与设计过程增添了极大的难度^[27,82-87].

早年, 为解决传统PID控制器在动态建模不完整时性能受限的问题, Babaghasabha等^[88]提出如图5所示的适用于完全约束型柔索驱动机器人的自适应鲁

棒滑模控制器. 该控制器不需要预先知道不确定性上界, 且不需要测量末端执行器加速度. 由于柔索驱动机器人在执行各种轨迹时的控制性能不一致, Bak等^[89]通过考虑柔索弹性和环境噪声, 设计了用于控制过约束平面柔索驱动机器人的滑模控制器. 滑模控制器会因颤振现象性能降低. Niu等^[90]提出一种用于控制柔索驱动康复机器人的非线性干扰观测器与滑模控制器的结合方案, 有效提高了轨迹跟踪性能. Qian等^[91]研究了基于视觉的连续切换滑模控制器, 进一步提高了柔索驱动机器人的轨迹跟踪精度和稳定性, 如图6所示.

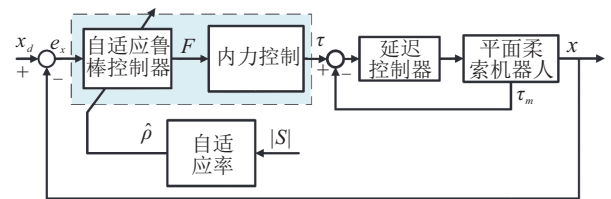


图5 自适应鲁棒控制器

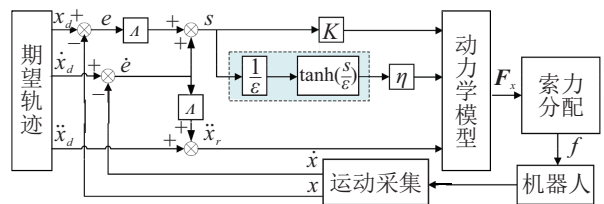


图6 双曲正切函数滑模控制器

柔索驱动机器人轨迹跟踪控制的主要挑战是在运动控制过程中的多柔索协调问题. 每根柔索的同步误差都包含来自自身和相邻柔索的误差, 这种误差的传播导致机器人的运动不协调, 某些柔索张力过大或过小, 使机器人末端执行器可能无法精确地跟踪预定轨迹, 轨迹跟踪精度降低, 特别是在执行复杂或精细动作时更为明显. 为解决三根柔索驱动的空间三自由度机器人多柔索协调问题, Shang等^[92]设计了带期望索力补偿的同步控制器(SC-DTC)和带实际索力补偿的同步控制器(SC-RTC), 图7为所设计的带期望索力补偿的同步控制器控制框图, 通过考虑柔索间的同步运动关系, 该控制方法使末端移动平台的跟踪误差和同步误差显著减少.

Jia等^[93]进一步将二阶滑模与多柔索同步思想相结合, 提出了一种新的基于二阶滑模(SOSM)的柔索驱动机器人同步控制策略, 改善了各个柔索间的同步运动关系; 通过SOSM抑制模型不确定性和外部干扰, 显著降低了柔索跟踪误差和柔索同步误差, 提高了移动平台的控制精度. 但当前参数控制方法仍需改进, 以提升其识别效率.

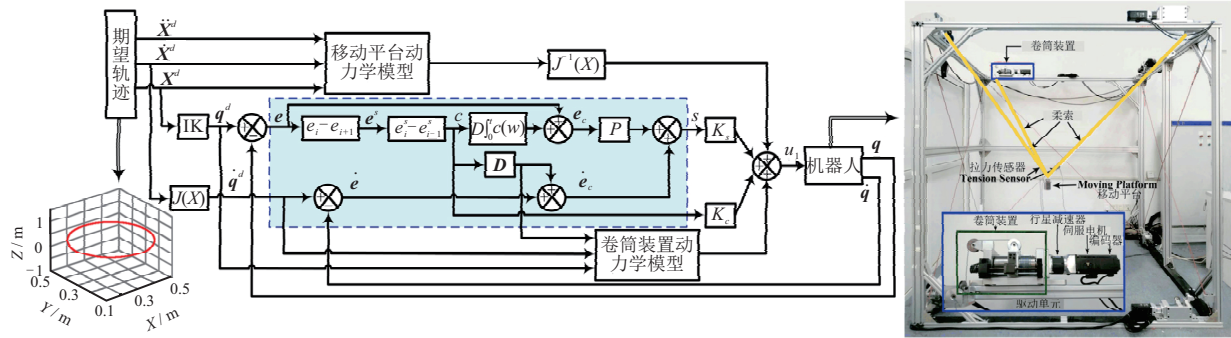


图7 带期望索力补偿的同步轨迹跟踪控制

此外,柔索驱动机器人的摩擦不确定性、动态建模误差和多柔索运动协调问题给控制带来挑战,导致机器人的实际运动与预期轨迹存在偏差,降低了控制精度.摩擦不确定性导致机器人响应速度减慢,影响运动实时性能,动态建模误差导致系统稳定性降低,在高速运动时尤为显著.同时,控制器需要投入更多的能量来克服摩擦和其他未建模的动态因素,使系统能量效率降低. Shang等^[94]提出能够实现高精度轨迹跟踪控制的新型自适应交叉耦合控制(ACCC)方案.通过定义新的同步误差变量调整相邻柔索的协调运动,并设计自适应动态控制策略来补偿与柔索相连的卷筒的惯性和摩擦力,同时,利用适应性鲁棒控制抑制未建模动力学和外部干扰. Xie等^[86]针对建模不确定性和外部干扰的影响提出一种鲁棒同步控制(RSC)方案,确保所有柔索的运动协调,防止跟踪误差引起的柔索松弛.该方案结合鲁棒控制和同步控制方法的优点,实现多柔索协调控制,控制方法需要在六自由度机器人上进行推广,以验证其性能.

四根柔索冗余驱动的空间三自由度机器人不仅存在模型不确定性和多柔索协调的问题,还存在冗余约束引起的柔索张紧问题.张彬等^[95-96]提出双空间自适应同步控制(DASC)方案,将卷筒在索长空间的自适应同步与任务空间内移动平台的自适应补偿相结合,通过索长同步误差表示柔索之间的协调运动,并实时补偿模型参数不确定性,有效地处理多柔索间的同步问题和移动平台的模型参数不确定性. Ji等^[97]利用误差反馈有效完成模型参数的修正,提出一种新型自适应同步控制(ASC)方案,同时抑制运动学和动力学不确定性、调节多索协调运动,显著提高各柔索的跟踪精度与各柔索之间的同步精度.为处理冗余柔索驱动机器人的协调问题,提高任务空间轴间协调效果, Zhang等^[98]通过分析轮廓误差,结合移动平台的轨迹误差,提出可用于表示任务空间中轴间协调运动关系的同步误差.在此基础上设计一种任

务空间协调动态控制(CDCT)方案,可以提高任务空间中各轴的跟踪精度和轴间的协调精度.实验表明,任务空间中轴之间的差异明显减小,且所有轴都具有更好的性能.该方案仅针对空间三自由度机器人,尚未对末端旋转姿态进行考虑.

针对八根柔索控制的空间六自由度柔索驱动机器人,通过研究多柔索同步,将柔索之间的同步协调运动与快速终端滑模技术相结合, Zhang等^[28,99]通过定义同步误差和新型滑模面,旨在改善柔索间的同步运动和提高错误收敛速度,并提出一种新的具有同步误差的快速终端滑模控制(FTSMC-SE)策略.通过协调相邻柔索的运动有效抑制绳索的松弛,保证柔索张力为正,借助快速终端滑模的有限时间收敛特性,加快误差收敛,提高系统的轨迹跟踪精度.此外,影响柔索驱动机器人末端位置精度的模型不确定性的几何参数误差和非几何参数误差具有非常强的非线性且相互耦合.对此,李国江等^[100]建立末端位置误差与柔索长度之间的映射关系,并在关节空间中进行位置误差补偿;设计了基于多种群协同进化算法和反向传播算法的神经网络优化方法,进一步提升神经网络的拟合精度和泛化能力.当训练数据的样本空间遍历性不足时,将影响末端执行器的位置精度,因此运动空间的划分是下一步需要进行的工作.表2展示了所提及的多种控制方法对应的末端执行器误差.

柔索驱动机器人的运动学和动力学参数的不确定性是不可避免的,在柔索驱动机器人与环境交互及大规模部署的情况下,运动学和动力学参数的不确定性对末端控制影响更加显著且在实践中几乎无法精确测量末端执行器的状态. Harandi等^[101]指出不确定条件下柔索驱动机器人控制的挑战之一是通过分离雅可比矩阵的行列式和伴随矩阵,求解回归形式的逆雅可比矩阵,在此基础上设计自适应动态反馈控制器^[102],保证未知扰动下的快速可行跟踪轨迹.通过设计对关节和任务空间变量进行位置反馈的自适应

表2 同步控制方法末端轨迹跟踪误差

柔索数量	自由度	控制方法	轨迹类型	均方根跟踪误差/m
3根	空间(3T)	SC-DTC ^[92]	平面圆轨迹 ($r = 0.2\text{ m}$)	4.4208×10^{-5}
		SC-RTC ^[92]	平面圆轨迹 ($r = 0.2\text{ m}$)	1.6603×10^{-5}
		SOSM-SC ^[93]	平面圆轨迹 ($r = 0.1\text{ m}$)	2.8789×10^{-5}
		ACCC ^[94]	平面圆轨迹 ($r = 0.2\text{ m}$)	9.6×10^{-4}
		RSC ^[86]	平面圆轨迹 ($r = 0.2\text{ m}$)	4.472×10^{-4}
4根	空间(3T)	DASC ^[95-96]	空间圆轨迹 ($r = 0.4\text{ m}$)	2.24×10^{-3}
		ASC ^[97]	平面圆轨迹 ($r = 0.4\text{ m}$)	3.17×10^{-4}
		CDCT ^[98]	空间圆轨迹 ($r = 0.1\text{ m}$)	1.9×10^{-3}
8根	空间(3T3R)	FTSMC-SE ^[28,99]	螺旋线	1.36×10^{-5}

轨迹跟踪控制器^[103],仅使用位置反馈来实现轨迹跟踪控制. 尽管存在动力学和运动学的不确定性,但通过适当估计参数,可以在不需要精确的初始参数估计的情况下获得轨迹跟踪. 此外,需要进一步增强该方案的自适应能力以应对干扰状况.

控制系统颤振是指系统输出或控制信号在一段时间内快速振荡的现象,是导致柔索驱动机器人动态性能与稳定性降低的因素之一. 频繁的颤振会加速机械部件的磨损,降低机器人的使用寿命和可靠

性,增加机器人系统能量消耗,降低整体的能效和性能. 有效地消除或降低系统颤振对于保证柔索驱动机器人的高性能和长期稳定运行至关重要. 对此,文献[43,104]提出如图8所示的监督自适应模糊滑模控制策略,采用自适应模糊方法近似传统滑模控制器中的切换项,并提出一种监督式模糊增益调度方法,用于在线调整PID滑模面的增益. 该方法可以有效减少控制器的颤振效应,同时保持对参数不确定性和负载干扰的鲁棒性.

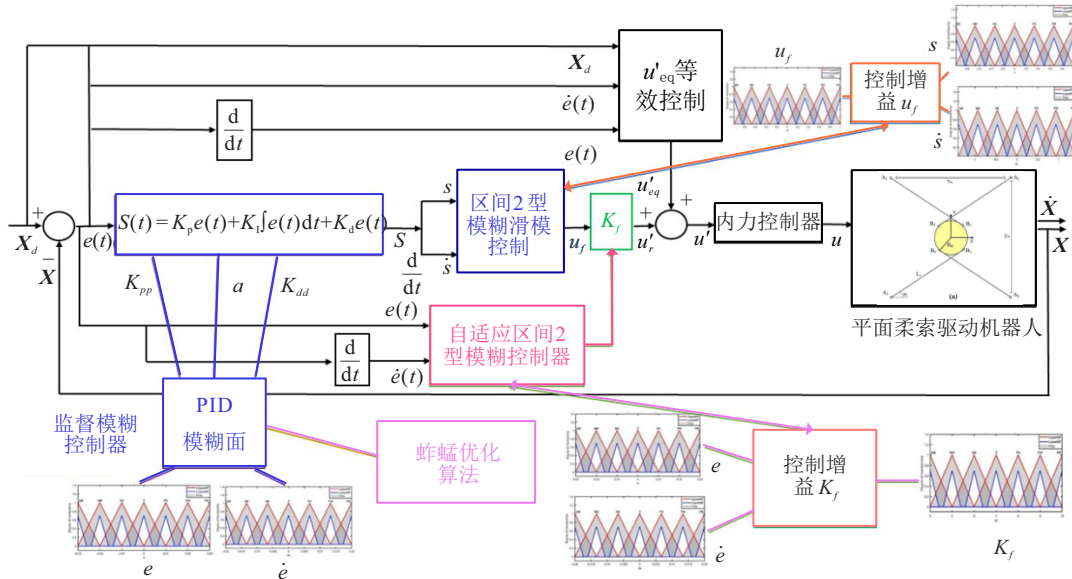


图8 消除颤振的平面柔索驱动机器人控制

轨迹跟踪控制在柔索驱动机器人中是一项充满挑战的任务,主要原因包括多柔索之间的协调问题、摩擦力的不确定性、动态建模误差以及由冗余约束引起的柔索张紧问题. 同步控制、自适应控制、滑模控制以及模糊控制等策略已被成功用于柔索驱动机器人中,有效提升了机器人的操作性能,扩展了其在多种环境和任务下的应用范围,并显著增强了轨迹跟

踪的精度与稳定性. 此外,机器学习和深度学习技术的快速发展,为柔索驱动机器人控制策略的优化与动态性能的提升提供了新的可能性,进一步扩大了柔索驱动机器人的应用领域和动态性能.

3 索力分配策略

柔索驱动机器人的索力分配是柔索机构控制中的核心问题之一,关键在于在确保柔索保持张紧的前

前提下,通过合理地分配多根柔索的拉力,达到机器人末端所需的特定运动和姿态目标^[105-110],同时有效调节机构的整体刚度和灵敏度^[29,37,111-112].通过精确的索力分配,不仅可以显著提升机构的运动性能、负载能力、定位精度和安全性,还能使机器人更好地适应各种工作环境和任务需求.

Oh等^[113]为冗余柔索驱动机器人开发正张力控制器,阐述了确保所有柔索张力保持正值的同时保持理想控制性能的方法. Abdolshah等^[114]提出的柔索张力分配方法动态修改柔索的最小张力,在精度和能耗方面优于传统方法,对提高机器人的运动效率和精度具有重要意义. Liu等^[115]研究具有较大柔索质量的柔索驱动机器人的柔索张力分布优化,提出两步张力优化算法来解决柔索下垂对柔索张力的影响,为柔索驱动并联机器人的张力优化提供了更好的理解和解决方案.

柔索驱动机器人在索力分配时容易出现加速度不连续的问题,加速度不连续性会导致机器人运动的不平滑,同时要考虑索力约束与控制扭矩之间的关系、柔索张力限制以及过度约束引起的冗余问题. Ueland等^[30]提出一种可灵活调整的损失函数以适应不同数量的柔索、 p 范数和执行器配置,克服了现有方法的缺陷,保证索力的连续可导. Cao等^[116]针对柔索张力连续性问题,采用包含双曲正切函数的张力函数来计算索力,并将梯度下降法应用于该张力函数,简化张力分配的问题处理方式,避免复杂的结构矩阵分析,提高系统的能效和稳定性,同时降低系统能耗. 进一步,需要在真实场景中验证碰撞处理和索力控制等任务的处理效果.

冗余柔索驱动机器人中的柔索拉力一般通过基于迭代优化的冗余解析方法来维持^[31]. 优化方法的引入导致模型不确定,且计算时间是不可预测的,增加了控制的复杂性,限制了其应用. Ameri等^[45,117-118]从控制的角度出发,通过将柔索张力作为扩展模型的新状态变量,使用正索力分配算法生成柔索张力. 在控制架构中引入正饱和型函数和非线性扰动观察器,以消除冗余解算(RR)方法带来的复杂性,在不确定性环境下末端执行器依旧具有很好的跟踪效果. 而 Gouttefarde等^[32,119-120]提出了一种基于顺序确定多边形顶点的高效算法,用于计算柔索驱动机器人的柔索张力分布. 如图9所示,此算法不仅能够确定各种最优柔索张力分配,而且效率高,可以处理不同类型的柔索驱动机器人(包括悬挂式和完全约束式),并根据所需特性(例如高刚度、低能耗)确定所需的柔索张

力分布.

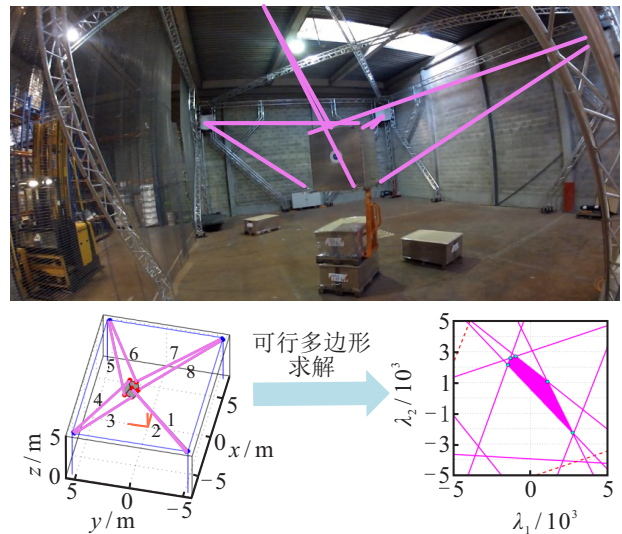


图9 柔索机器人索力分配求解方法

在柔索驱动机器人设计和操作中,恰当的张力控制对于维持或改善系统的刚度和性能至关重要. Li^[121]指出,柔索驱动机器人的系统刚度主要由索力张力决定,当柔索张力保持一定时,机器人结构的刚度可以通过改变张力分配进行调节. Haghghipannah等^[122]强调柔索必须保持张力才能获得最佳性能,介绍了估算柔索预张力和作用在机器人上的外力的方法,强调了张力对于保持系统刚度的重要性. Abdolshah等^[123]探讨了调整柔索的最小张力如何提高柔索机器人的刚度和性能,提供了柔索张力与系统刚度之间的直接联系,然而在冗余自由度机器人的索力估计与变刚度中还需要进一步验证.

鉴于机器人的构型、应用领域以及任务要求的多样性,柔索驱动机器人的索力分配控制方法也呈现出各异的特点. 索力分配策略的关键在于确保柔索保持张紧状态下,合理调配多根柔索的拉力,以满足机器人末端的特定运动和姿态目标. 索力分配的目标是降低索力差异,实现索力的均匀分布,这对于提升机器人的运动性能、负载能力、定位精度和安全性至关重要,使其能够更好地适应不同的工作环境和任务需求. 然而,当面对动态环境的适应性挑战和控制策略的复杂性时,索力分配控制依旧面临一系列挑战,这将成为限制机器人性能提升和应用范围拓展的障碍.

4 振动抑制

柔索驱动机器人各子系统的运动、柔索的弹性变形以及环境载荷的变化均可能引发柔索的振动现象,抑制这些振动是柔索驱动机器人理论研究和工程

应用中的关键课题.抑振方法主要分为被动抑振和主动抑振两种.被动抑振主要依靠机器人自身的阻尼和摩擦来耗散振动能量,但难以确保机器人末端运动的连续性和流畅性.相比之下,主动抑振方法,如内力抑振和输入整形抑振等,不仅能有效减少振动,而且能在抑振的同时保障末端执行器的连续运动.由于柔索驱动机器人特有的空间多闭环结构和复杂的运动学特性,使得抑振算法在数学上呈现出强耦合和非线性的特征,这进一步增加了实现有效抑振控制和确保末端运动精度的难度和挑战性^[124-126].

在柔索驱动机器人中,柔索一般由纤维绳或钢丝绳制成,具有相对较低的刚度.当机器人的末端执行器运动时,柔索中的张力不断变化,产生动态负载.这种动态负载引起柔索振动,使得末端执行器偏离其预定的路径或位置,降低了机器人的运行精度.此外,柔索振动还会加速机械部件的磨损,并在涉及人机交互的环境中增加潜在的安全风险.在某些情况下,剧烈的振动甚至可能导致机器人无法正常运行,进而引起柔索驱动机器人的损坏.为解决柔索驱动机器人在大工作空间内快速运动出现的振动,Jamshiaifar等^[33,127]探讨了一种基于反应的稳定器,仅需要将3个执行器连接到非平衡旋转惯量(摆锤),即能够在所有自由度中抑制任何柔索驱动机器人的不期望振动.在柔索具有显著非线性效应、建模计算成本高的情况下,该稳定器的有效性更为显著.Jamshidifar等^[128]为增强柔索张力以抵消不良振动,通过将末端执行器中无期望振动方程与其期望的运动方程解耦,设计了一种鲁棒振动补偿器来计算轨迹跟踪所需的柔索张力.Sun等^[34,129-131]为实现快速振动抑制,分析了机器人在可控索力下的动力学行为,将模糊控制与PID控制相结合,优化包括稳定时间、最大柔索力和能耗在内的指标,实现以相当小的可控力快速抑制柔性结构的振动.

由于柔性零部件的低刚度特性,在机器人停止运动后仍然存在残余振动.Yoon等^[132]指出,常用的输入整形方法适用于单模系统,提出了多模输入整形方法,通过重新设计输入整形方法,使其适用于多模系统来消除振动.Chen等^[133]考虑柔索的轴向变形,提出一种改进的柔索驱动机器人输入整形方案,在动态建模中将运动平台的柔性位移作为广义坐标,对于主要残余振动和高阶残余振动的抑制精度均有提高.输入整形方案数量提升会优化抑制精度,但会导致时延增加.

柔索驱动机器人的抑振方法和位置控制方法往

往存在耦合,影响到末端位置控制精度.Sancak等^[35]采用一种用于控制平面机器人面内动力学和抑制面外振动的组合控制方法,解耦平面内外动力学,使用柔索拉力控制面外振动,成功地抑制了平面法线方向的振动,且未对平面内定位控制造成任何影响.

振动的产生源于多种因素,包括机器人的运动、柔索的弹性变形以及环境载荷的变化,这些因素均会降低机器人的精度和安全性.抑振方法主要分为被动抑振和主动抑振两种类型,其中主动抑振在维持末端运动连续性方面展现出更高的效果.然而,柔索驱动机器人独特的结构和运动学特性,如强耦合和非线性特征,给抑振控制带来了显著的挑战.合理的抑振控制策略成为确保机器人末端位姿精度和实现高效率高质量作业的关键.尽管如此,针对柔索驱动机器人的振动特性与机理尚存在不明确之处,振动抑制的精度、实时性能和模型不确定性等问题仍需进一步研究和深入探讨.

5 容错控制

柔索驱动机器人的构型复杂性和潜在的故障来源众多,通过合理的容错决策机制实施对机器人运行状态的实时动态监测与故障恢复,对于提升系统的可靠性,尤其是在工程应用中尤为关键.柔索在运行过程中不可避免地会出现疲劳、磨损和断裂等故障情况,这些故障可能导致系统构型发生突变和控制器失效等问题,从而影响柔索驱动机器人的持续、安全和可靠运行.柔索驱动机器人容错控制研究的意义在于不仅提高了机构的可靠性、灵活性和适应性,而且确保了机构在柔索部分损坏的情况下仍能继续运行,并有效避免进一步损失,如与地面的碰撞等.此外,容错控制研究还有助于降低维护成本,延长柔索驱动机构的使用寿命,减轻维修和更换柔索的经济负担.

实现容错控制需要考虑可靠的故障检测方案、高效的重新配置策略和安全合理的协调避障方法.Raman等^[47,134]开发出针对柔索驱动机器人的创新型故障容忍控制(FTC)框架,特别关注在柔索故障情况下的轨迹追踪和任务恢复.图10为柔索故障与快速恢复,展示了一种结合互动多模型(IMM)自适应估计滤波器的FTC框架,实现了故障检测、诊断和任务恢复的同时进行.进一步研究需要将闭环动态控制器与运动规划策略相结合,以实现快速从故障点恢复轨迹.

柔索故障后柔索驱动机器人的工作空间会大大降低,柔索的故障减少了机器人的驱动能力和灵活性,影响了机器人末端执行器的可达区域,导致机器

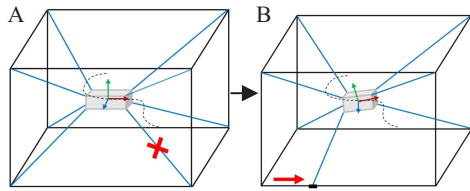


图10 柔索故障与快速恢复

人无法完成原本能够达到的操作. 引入可移动锚点, 对机器人柔索进行重新配置是故障恢复的途径之一, Boumann等^[49,135]提出一种基于系统动能最小化的应急策略, 通过添加可移动滑轮实现机器人运动学冗余, 使用可移动滑轮防止系统崩溃、平台倾斜; 基于全局数值优化, 提出几何重构方案, 在故障后恢复大部分工作空间. Xiong等^[48]将重配置规划的非线性约束转化为成本函数, 提出了一种重构规划与动态控制相融合的实时重构方法, 如图11所示. 通过离线计算减少在线阶段的重配置规划时间, 与单次迭代重配置规划方法相比, 该方案大大缩短了重新配置规划的计算时间.

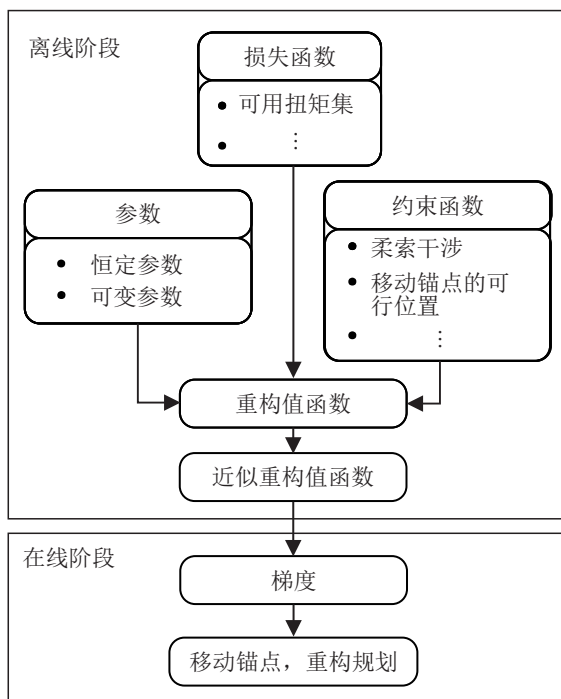


图11 柔索驱动机器人实时自重构规划方法

可重构柔索驱动机器人在重新规划配置时, 机器人的结构和姿态会发生变化, 自身结构与环境障碍物间有较高的碰撞风险, 尤其是在空间狭窄或障碍物密集的环境中, 这种碰撞风险更加显著. 訾斌等^[136]设计一种基于临界支撑线及多指抓握的可重构柔索机器人协同避障方法, 可有效求解机器人的二维最简模型、无碰撞区域和对应力封闭工作空间.

柔索驱动机器人在容错控制方面的研究, 旨在提高系统的可靠性和安全性. 鉴于机器人构型的复杂

性及故障来源的多样性, 开发可靠的故障检测方案、高效的重新配置策略, 以及安全合理的协调避障方法, 成为确保机器人持续安全运行的关键. 虽然目前已经探索了如故障容忍控制框架和基于系统动能最小化的应急策略等多种方法, 但仍存在若干亟待解决的问题, 例如柔索故障的可靠检测、紧急情况下的实时位置确定与故障点轨迹恢复, 以及柔索动态重新配置的解算效率尚无法满足动态实时性的要求.

6 总结与展望

近年来, 面向柔索驱动机器人的研究取得了很多代表性成果, 但随着现代制造业水平的不断发展, 对于柔索驱动机器人的运动规划与控制性能要求也不断提高. 作为一种新型机器人, 柔索驱动机器人使用柔索代替刚性连杆, 体现了机器人轻量化的设计理念和人机共融的发展趋势. 本文综述了柔索驱动机器人的运动规划与控制的国内外研究进展, 针对其中有待进一步思考和解决的问题, 从以下3个方面对未来的研究工作进行了分析和展望.

1) 移动式柔索驱动机器人的自主重构.

移动式柔索驱动机器人具有构型可重组特性, 能够突破刚性连杆和框架对系统工作空间的限制, 根据任务需求调整机构构型, 从而在一定的约束下获得更好的性能. 然而, 柔索锚点运动的不确定性引起索力突变与振动, 增加了振动抑制和索力分配的难度, 柔索与环境之间的碰撞对避障路径规划的实时性和轨迹跟踪控制精度要求较高, 因此有必要开展移动式柔索驱动机器人的自主重构策略研究. 综合考虑工作空间约束、动态负载能力限制、索力分配等因素, 揭示机器人中柔索位置、数量、分布等参数对机构动态性能与关键指标的影响机理, 优化自主重构轨迹与路径, 提高柔索驱动机器人的自主重构的效率与鲁棒性, 进而提高复杂环境中机器人的故障修复能力和维护性.

2) 柔索驱动机器人变刚度控制.

刚性机器人在工作空间、灵活性、能效等方面仍存在不足, 柔索驱动机器人系统刚度由柔索张力决定, 其变刚度特性是传统刚性机器人不具备的, 适用于人-机器人-环境共融作业, 是新一代机器人的显著特征. 柔索驱动的低刚度导致轨迹跟踪与刚度建模存在较大误差, 加大了振动抑制的难度, 因此需要根据系统期望刚度实时分配柔索张力, 采用多传感器融合监测索力、关节位移和外载荷, 使其在需要高刚度的任务中保持稳健和高效, 而在需要适应复杂环境和人机交互的任务中展现出更好的灵活性和柔顺性.

3) 柔索驱动机器人的自然交互与人机协同控制.

柔索驱动方式类似于人体肌腱,具有良好的柔韧性和弹性缓冲特性,同时大幅降低了机器人本体质量,可以增强自然交互与人机协同的安全性. 为了实现人-机-环境之间高效自然的交互目标,需要合理的避障规划方法、可靠的故障检测方案与安全的容错控制策略,同时结合机器视觉、柔索力控等多元感知的机制,构建更为智能的信息融合模型,设计柔索驱动机器人自然交互与人机协同控制策略,使机器人更好地理解人类意图,适应环境变化,确保交互的流畅和安全.

参考文献(References)

- [1] 邹宇鹏, 王诺, 刘凯, 等. 可移动式柔索驱动下肢康复机器人设计及分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2019, 47(1): 22-26.
(Zou Y P, Wang N, Liu K, et al. Design and analysis of movable cable-driven lower limb rehabilitation robot[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2019, 47(1): 22-26.)
- [2] 张飞, 张彬, 周烽, 等. 面向自动仓储的绳索牵引并联机器人构型选择与参数优化[J]. 机械工程学报, 2020, 56(1): 1-8.
(Zhang F, Zhang B, Zhou F, et al. Configuration selection and parameter optimization of redundantly actuated cable-driven parallel robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(1): 1-8.)
- [3] Wang Y L, Wang K Y, Li X, et al. Control strategy and experimental research of cable-driven lower limb rehabilitation robot[J]. IEEE Access, 2021, 9: 79182-79195.
- [4] 张琦, 田梦倩, 李伟强, 等. 复式套索人工肌肉驱动的下肢外骨骼的运动控制[J]. 机器人, 2021, 43(2): 214-223.
(Zhang Q, Tian M Q, Li W Q, et al. Motion control of a lower-limb exoskeleton actuated by compound tendon-sheath artificial muscles[J]. Robot, 2021, 43(2): 214-223.)
- [5] Iturralde K, Feucht M, Illner D, et al. Cable-driven parallel robot for curtain wall module installation[J]. Automation in Construction, 2022, 138: 104235.
- [6] Zhang Z K, Shao Z F, You Z, et al. State-of-the-art on theories and applications of cable-driven parallel robots[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2022, 17(3): 37.
- [7] Seriani S, Gallina P, Wedler A. A modular cable robot for inspection and light manipulation on celestial bodies[J]. Acta Astronautica, 2016, 123: 145-153.
- [8] Zhang D, Zhou D, Zhang G, et al. 3D printing lunar architecture with a novel cable-driven printer[J]. Acta Astronautica, 2021, 189: 671-678.
- [9] Wang R, Li S, Li Y. A suspended cable-driven parallel robot with articulated reconfigurable moving platform for schönflies motions[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(6): 5173-5184.
- [10] Rasheed T, Long P, Roos A S, et al. Optimization based trajectory planning of mobile cable-driven parallel robots[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: ACM, 2019: 6788-6793.
- [11] Qian S, Zi B, Shang W W, et al. A review on cable-driven parallel robots[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 66.
- [12] 薛峰, 张立勋, 王振汉, 等. 柔索驱动式航天员虚拟微重力训练系统控制与实验[J]. 宇航学报, 2022, 43(10): 1410-1419.
(Xue F, Zhang L X, Wang Z H, et al. Control and experiment of flexible-cable-driven virtual microgravity training system for astronauts[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(10): 1410-1419.)
- [13] 王晓光, 林麒. 风洞试验绳牵引并联支撑技术研究进展[J]. 航空学报, 2018, 39(10): 022064.
(Wang X G, Lin Q. Progress in wire-driven parallel suspension technologies in wind tunnel tests[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(10): 022064.)
- [14] Yang Q Q, Xie C L, Tang R R, et al. Hybrid active control with human intention detection of an upper-limb cable-driven rehabilitation robot[J]. IEEE Access, 2020, 8: 195206-195215.
- [15] Ji Y F, Peng M J, Lin Q, et al. Wire-driven parallel robot suspension system for SDM in a low-speed wind tunnel[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2023, 15(4): 168781322311702.
- [16] Li B, Wang Y, Zhu K, et al. Structure design and control research of a novel under water cable-driven manipulator for autonomous under water vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers—Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2020, 234(1): 170-180.
- [17] Xie G, Zhang Z, Shao Z, et al. Research on the orientation error of the translational cable-driven parallel robots[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2022, 14(3): 031003.
- [18] 乔尚岭, 刘荣强, 郭宏伟, 等. 3-DOF 索杆桁架式欠驱动机械手运动控制[J]. 机械工程学报, 2020, 56(23): 78-88.
(Qiao S L, Liu R Q, Guo H W, et al. Motion control of 3-DOF under-actuated cable-truss robotic hand[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(23): 78-88.)
- [19] Liu H, Huang X, Wang J, et al. A novel cable-driven based puncture robotic system for CT guided needle position[C]. The 6th IEEE International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics. Budapest, 2021: 687-692.
- [20] Zarebidoki M, Dhupia J, Xu W L. Dynamics modelling

- and robust passivity-based control of cable-suspended parallel robots in fluidic environment[C]. The 7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering. Budapest, 2021: 48-53.
- [21] Xu W F, Yan P H, Wang F X, et al. Vision-based simultaneous measurement of manipulator configuration and target pose for an intelligent cable-driven robot[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 165: 108347.
- [22] Zarebidoki M, Dhupia J, Xu W L. A review of cable-driven parallel robots: Typical configurations, analysis techniques, and control methods[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2022, 29(3): 89-106.
- [23] Wang X, Zhang B, Shang W, et al. Constrained path planning for reconfiguration of cable-driven parallel robots[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023, 28(4): 2352-2363.
- [24] Zhang N, Shang W, Cong S. Dynamic trajectory planning for a spatial 3-DoF cable-suspended parallel robot[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 122: 177-196.
- [25] Harandi M R J, Khalilpour S A, Taghirad H D. Adaptive energy shaping control of a 3-DOF underactuated cable-driven parallel robot[J]. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers—Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2023, 19(6): 7552-7560.
- [26] Zake Z, Chaumette F, Pedemonte N, et al. Vision-based control and stability analysis of a cable-driven parallel robot[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(2): 1029-1036.
- [27] Wang Y, Yan F, Jiang S, et al. Adaptive nonsingular terminal sliding mode control of cable-driven manipulators with time delay estimation[J]. *International Journal of Systems Science*, 2020, 51(8): 1429-1447.
- [28] Zhang B, Deng B B, Gao X Y, et al. Design and implementation of fast terminal sliding mode control with synchronization error for cable-driven parallel robots[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, 182: 105228.
- [29] Li L, Zhang L, Wang B, et al. Running experimental research of a cable-driven astronaut on-orbit physical exercise equipment[J]. *Machines*, 2022, 10(5): 377.
- [30] Ueland E, Sauder T, Skjetne R. Optimal force allocation for overconstrained cable-driven parallel robots: Continuously differentiable solutions with assessment of computational efficiency[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(2): 659-666.
- [31] Fazeli S M, Abedi M, Molaei A, et al. Active fault-tolerant control of cable-driven parallel robots[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2023, 111(7): 6335-6347.
- [32] Gouttefarde M, Lamaury J, Reichert C, et al. A versatile tension distribution algorithm for n -DOF parallel robots driven by $n+2$ cables[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(6): 1444-1457.
- [33] Jamshidifar H, Rushton M, Khajepour A. A reaction-based stabilizer for nonmodel-based vibration control of cable-driven parallel robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(2): 667-674.
- [34] Sun H N, Tang X Q, Cui Z W, et al. Dynamic response of spatial flexible structures subjected to controllable force based on cable-driven parallel robots[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(6): 2801-2811.
- [35] Sancak C, Itik M. Out-of-plane vibration suppression and position control of a planar cable-driven robot[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(3): 1311-1320.
- [36] Picard E, Plestan F, Tahoumi E, et al. Control strategies for a cable-driven parallel robot with varying payload information[J]. *Mechatronics*, 2021, 79: 102648.
- [37] Meziane R, Cardou P, Otis M J D. Cable interference control in physical interaction for cable-driven parallel mechanisms[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 132: 30-47.
- [38] 游虹, 尚伟伟, 张彬, 等. 基于高速视觉的绳索牵引并联机器人轨迹跟踪控制[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(5): 19-26.
(You H, Shang W W, Zhang B, et al. Trajectory tracking control of cable-driven parallel robots by using high-speed vision[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(5): 19-26.)
- [39] Fang J, Haldimann M, Marchal-Crespo L, et al. Development of an active cable-driven, force-controlled robotic system for walking rehabilitation[J]. *Frontiers in Neurobotics*, 2021, 15: 651177.
- [40] Li X, Yang Q, Song R. Performance-based hybrid control of a cable-driven upper-limb rehabilitation robot[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2021, 68(4): 1351-1359.
- [41] Zhang Z K, Shao Z F, Wang L P. Optimization and implementation of a high-speed 3-DOFs translational cable-driven parallel robot[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 145: 103693.
- [42] Chen Y, Li J, Wang S, et al. Dynamic modeling and robust adaptive sliding mode controller for marine cable-driven parallel derusting robot[J]. *Applied Sciences-basel*, 2022, 12(12): 6137.
- [43] Aghaseyedabdollah M, Abedi M, Pourgholi M. Supervisory adaptive interval type-2 fuzzy sliding mode control for planar cable-driven parallel robots using grasshopper optimization[J]. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 2022, 19(5): 111-129.
- [44] Rodriguez-Barroso A, Saltaren R. Tension planner for cable-driven suspended robots with unbounded upper cable tension and two degrees of redundancy[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 144: 103675.
- [45] Ameri A, Molaei A, Khosravi M A, et al. Control-based tension distribution scheme for fully constrained cable-driven robots[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(11): 11383-11393.
- [46] Song D, Zhang L X, Xue F. Configuration optimization and a tension distribution algorithm for cable-driven parallel robots[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 33928-33940.

- [47] Raman A, Walker I, Krovi V, et al. A failure identification and recovery framework for a planar reconfigurable cable driven parallel robot[J]. IFAC-Papers OnLine, 2022, 55(37): 369-375.
- [48] Xiong H, Cao H H, Zeng W F, et al. Real-time reconfiguration planning for the dynamic control of reconfigurable cable-driven parallel robots[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2022, 14(6): 060913.
- [49] Boumann R, Bruckmann T. Simulation and model-based verification of an emergency strategy for cable failure in cable robots[J]. Actuators, 2022, 11(2): 56.
- [50] An H, Yuan H, Tang K, et al. A novel cable-driven parallel robot with movable anchor points capable for obstacle environments[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(6): 5472-5483.
- [51] Mei J, Zhang F, Zang J, et al. Trajectory optimization of the 6-degrees-of-freedom high-speed parallel robot based on B-spline curve[J]. Science Progress, 2020, 103(1): 0036850419880115.
- [52] Wei H, Qiu Y, Su Y, et al. A smoothing motion method for high-speed cable-driven parallel camera robots[J]. Current Science, 2019, 117(12): 2040-2048.
- [53] Scalera L, Gasparetto A, Zanotto D. Design and experimental validation of a 3-DOF underactuated pendulum-like robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(1): 217-228.
- [54] Idà E, Bruckmann T, Carricato M. Rest-to-rest trajectory planning for underactuated cable-driven parallel robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2019, 35(6): 1338-1351.
- [55] Longval J M, Gosselin C. Dynamic trajectory planning and geometric analysis of a two-degree-of-freedom translational cable-suspended planar parallel robot using a parallelogram cable loop[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(2): 020903.
- [56] Xiang S, Gao H, Liu Z, et al. Trajectory optimization for a six-DOF cable-suspended parallel robot with dynamic motions beyond the static workspace[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Paris, 2020: 3903-3908.
- [57] Wang S A, Wu S L, Kang C L, et al. Trajectory planning of a parallel manipulator based on kinematic transmission property[J]. Intelligent Service Robotics, 2015, 8(3): 129-139.
- [58] Mottola G, Gosselin C, Carricato M. Dynamically feasible periodic trajectories for generic spatial three-degree-of-freedom cable-suspended parallel robots[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2018, 10(3): 031004.
- [59] Han L, Xu W F, Kang P, et al. Unified neural adaptive control for multiple human-robot-environment interactions[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(2): 1166-1175.
- [60] Capua A, Shapiro A, Shoval S. Motion planning algorithm for a mobile robot suspended by seven cables[C]. IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. Singapore, 2010: 504-509.
- [61] Capua A, Shapiro A, Shoval S. SpiderBot: A cable-suspended walking robot[J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 82: 56-70.
- [62] Qian S, Bao K, Zi B, et al. Dynamic trajectory planning for a three degrees-of-freedom cable-driven parallel robot using quintic B-splines[J]. Journal of Mechanical Design, 2020, 142(7): 073301.
- [63] Duan Q J, Duan X C. Workspace classification and quantification calculations of cable-driven parallel robots[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 358727.
- [64] Gosselin C, Foucault S. Dynamic point-to-point trajectory planning of a two-DOF cable-suspended parallel robot[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(3): 728-736.
- [65] Jiang X L, Gosselin C. Dynamic point-to-point trajectory planning of a three-DOF cable-suspended parallel robot[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(6): 1550-1557.
- [66] Jiang X, Barnett E, Gosselin C. Dynamic point-to-point trajectory planning beyond the static workspace for six-DOF cable-suspended parallel robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(3): 781-793.
- [67] Jiang X L, Barnett E, Gosselin C. Periodic trajectory planning beyond the static workspace for 6-DOF cable-suspended parallel robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(4): 1128-1140.
- [68] Sheng X, Gao H B, Liu Z, et al. Dynamic point-to-point trajectory planning for three degrees-of-freedom cable-suspended parallel robots using rapidly exploring random tree search[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2020, 12(4): 041007.
- [69] Dion-Gauvin P, Gosselin C. Beyond-the-static-workspace point-to-point trajectory planning of a 6-DoF cable-suspended mechanism using oscillating SLERP[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 174: 104894.
- [70] Dion-Gauvin P, Gosselin C. Dynamic point-to-point trajectory planning of a three-DOF cable-suspended mechanism using the hypocycloid curve[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(4): 1964-1972.
- [71] 钱森, 钱鹏飞, 王春航, 等. 多机协作吊装机器人动力学分析与路径规划[J]. 机械工程学报, 2022, 58(7): 20-31.
(Qian S, Qian P F, Wang C H, et al. Dynamics and path planning of multi-crane cooperative lifting robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(7): 20-31.)
- [72] 姜雷杰, 高丙团, 刘传德, 等. 2-DOF 绳索驱动并联机构轨迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(5): 1103-1108.
(Jiang L J, Gao B T, Liu C D, et al. Trajectory tracking control of a 2-DOF cable-driven parallel mechanism[J]. Control and Decision, 2019, 34(5): 1103-1108.)
- [73] Jiang S, Wang Y, Ju F, et al. A new fuzzy time-delay

- control for cable-driven robot[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, DOI: 10.1177/1729881419835017.
- [74] Kino H, Yoshitake T, Wada R, et al. 3-DOF planar parallel-wire driven robot with an active balancer and its model-based adaptive control[J]. *Advanced Robotics*, 2018, 32(14): 766-777.
- [75] Lu Y J, Zhu W B, Ren G X. Feedback control of a cable-driven gough-stewart platform[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(1): 198-202.
- [76] Bettega J, Piva G, Richiedi D, et al. Model predictive control for path tracking in cable driven parallel robots with flexible cables: Collocated vs. noncollocated control[J]. *Multibody System Dynamics*, 2023, 58(1): 47-81.
- [77] Wang N, Cao G. Adaptive fuzzy back stepping control of under actuated multi-cable parallel suspension system with tension constraint[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2021, 43(9): 1971-1984.
- [78] Sancak C, Itik M, Nguyen T T. Position control of a fully constrained planar cable-driven parallel robot with unknown or partially known dynamics[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2023, 28(3): 1605-1615.
- [79] Inel F, Medjbouri A, Carbone G. A non-linear continuous-time generalized predictive control for a planar cable-driven parallel robot[J]. *Actuators*, 2021, 10(5): 97.
- [80] Yoo S, Kim T, Seo M, et al. Position-tracking control of dual-rope winch robot with rope slip compensation[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, 26(4): 1754-1762.
- [81] Vu M T, Hsia K H, El-Sousy F F M, et al. Adaptive fuzzy control of a cable-driven parallel robot[J]. *Mathematics*, 2022, 10(20): 3826.
- [82] Godbole H A, Caverly R J, Forbes J R. Dynamic modeling and adaptive control of a single degree-of-freedom flexible cable-driven parallel robot[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2019, 141(10): 101002.
- [83] Chen Z S, Wang X S, Cheng Y H. Adaptive super-twisting algorithm-based fractional-order sliding mode control of redundantly actuated cable driving parallel robot with uncertainty and disturbance estimation[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2021, 15(18): 2243-2257.
- [84] Wang W P, Wang X G, Shen C L, et al. Reinforcement learning-based composite controller for cable-driven parallel suspension system at high angles of attack[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 36373-36384.
- [85] Mu Z, Liu T, Xu W, et al. Dynamic feed forward control of spatial cable-driven hyper-redundant manipulators for on-orbit servicing[J]. *Robotica*, 2019, 37(1): 18-38.
- [86] Xie F, Shang W W, Zhang B, et al. High-precision trajectory tracking control of cable-driven parallel robots using robust synchronization[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(4): 2488-2499.
- [87] Grimshaw A, Oyekan J. Applying deep reinforcement learning to cable driven parallel robots for balancing unstable loads: A ball case study[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2021, 7: 611203.
- [88] Babaghasabha R, Khosravi M A, Taghirad H D. Adaptive robust control of fully-constrained cable driven parallel robots[J]. *Mechatronics*, 2015, 25: 27-36.
- [89] Bak J H, Yoon J H, Hwang S W, et al. Sliding-mode control of cable-driven parallel robots with elastic cables[C]. 2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems. New York: ACM, 2016: 1057-1060.
- [90] Niu J, Yang Q, Chen G, et al. Nonlinear disturbance observer based sliding mode control of a cable-driven rehabilitation robot[J]. *IEEE Int Conf Rehabil Robot*, 2017, 2017: 664-669.
- [91] Qian S, Zhao Z Y, Qian P F, et al. Research on workspace visual-based continuous switching sliding mode control for cable-driven parallel robots[J]. *Robotica*, 2024, 42(1): 1-20.
- [92] Shang W W, Zhang B Y, Zhang B, et al. Synchronization control in the cable space for cable-driven parallel robots[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(6): 4544-4554.
- [93] Jia H Y, Shang W W, Xie F, et al. Second-order sliding-mode-based synchronization control of cable-driven parallel robots[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(1): 383-394.
- [94] Shang W W, Xie F, Zhang B, et al. Adaptive cross-coupled control of cable-driven parallel robots with model uncertainties[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(3): 4110-4117.
- [95] 张彬, 张飞, 周烽, 等. 绳索牵引并联机器人的双空间自适应同步控制[J]. *机器人*, 2020, 42(2): 139-147. (Zhang B, Zhang F, Zhou F, et al. Dual-space adaptive synchronization control of cable-driven parallel robots[J]. *Robot*, 2020, 42(2): 139-147.)
- [96] Shang W W, Zhang B, Cong S, et al. Dual-space adaptive synchronization control of redundantly-actuated cable-driven parallel robots[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 152: 103954.
- [97] Ji H, Shang W W, Cong S. Adaptive synchronization control of cable-driven parallel robots with uncertain kinematics and dynamics[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(9): 8444-8454.
- [98] Zhang B, Shang W W, Cong S, et al. Coordinated dynamic control in the task space for redundantly actuated cable-driven parallel robots[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, 26(5): 2396-2407.
- [99] 邓槟槟, 尚伟伟, 张彬, 等. 6自由度绳索牵引并联机器人的快速终端滑模同步控制[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(13): 50-58. (Deng B B, Shang W W, Zhang B, et al. Fast terminal sliding mode control with synchronization error

- for a 6-DOF cable-driven parallel robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(13): 50-58.)
- [100] 李国江, 张飞, 李露, 等. 基于多种群协同进化算法的绳索牵引并联机器人末端位置误差补偿[J]. *机器人*, 2021, 43(1): 81-89.
(Li G J, Zhang F, Li L, et al. Error compensation of end-effector position for the cable-driven parallel robot based on multi-group co-evolutionary algorithm[J]. *Robot*, 2021, 43(1): 81-89.)
- [101] Harandi M R J, Khalilpour S A, Taghirad H D, et al. Adaptive control of parallel robots with uncertain kinematics and dynamics[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 157: 107693.
- [102] Harandi M R J, Ahmad Khalilpour S, Taghirad H D. Adaptive dynamic feedback control of parallel robots with unknown kinematic and dynamic properties[J]. *ISA Transactions*, 2022, 126: 574-584.
- [103] Harandi M R J, Hassani A, Hosseini M I, et al. Adaptive position feedback control of parallel robots in the presence of kinematics and dynamics uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, 21(1): 989-999.
- [104] Aghaseyedabdollah M, Abedi M, Pourgholi M. Supervisory adaptive fuzzy sliding mode control with optimal Jaya based fuzzy PID sliding surface for a planer cable robot[J]. *Soft Computing*, 2022, 26(17): 8441-8458.
- [105] Gosselin C, Grenier M. On the determination of the force distribution in overconstrained cable-driven parallel mechanisms[J]. *Meccanica*, 2011, 46(1): 3-15.
- [106] Piao J L, Kim E S, Choi H, et al. Indirect force control of a cable-driven parallel robot: Tension estimation using artificial neural network trained by force sensor measurements[J]. *Sensors*, 2019, 19(11): 2520.
- [107] Liu Z, Qin Z W, Gao H B, et al. Initial-pose self-calibration for redundant cable-driven parallel robot using force sensors under hybrid joint-space control[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 8(3): 1367-1374.
- [108] Caverly R J, Forbes J R. Flexible cable-driven parallel manipulator control: Maintaining positive cable tensions[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 26(5): 1874-1883.
- [109] Chen Q, Zi B, Sun Z, et al. Design and development of a new cable-driven parallel robot for waist rehabilitation[J]. *ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(4): 1497-1507.
- [110] Geng X Y, Li M, Liu Y F, et al. Analytical tension-distribution computation for cable-driven parallel robots using hypersphere mapping algorithm[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 145: 103692.
- [111] Taghirad H D, Bedoustani Y B. An analytic-iterative redundancy resolution scheme for cable-driven redundant parallel manipulators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(6): 1137-1143.
- [112] Zou Y, Zhang L, Li L, et al. Running experimental research of a wired riven astronaut rehabilitative training robot[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 11464-11471.
- [113] Oh S R, Agrawal S K. Cable suspended planar robots with redundant cables: Controllers with positive tensions[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(3): 457-465.
- [114] Abdolshah S, Rosati G. First experimental testing of a dynamic minimum tension control (DMTC) for cable driven parallel robots[C]. *Cable-Driven Parallel Robots*. Cham: Springer, 2015: 239-248.
- [115] Liu P, Qiu Y. Tension optimization for a cable-driven parallel robot with non-negligible cable mass[J]. *The Open Automation and Control Systems Journal*, 2015, 7(1): 1973-1980.
- [116] Cao S, Luo Z W, Quan C Q. Real-time tension distribution design for cable-driven parallel robot[J]. *Applied Sciences*, 2022, 13(1): 10.
- [117] Ameri A, Molaei A, Khosravi M A, et al. Modeling and control of cable-driven parallel robots with non-affine dynamics[C]. *The 60th IEEE Conference on Decision and Control*. Austin, 2021: 5582-5587.
- [118] Ameri A, Molaei A, Khosravi M A. Nonlinear observer-based tension distribution for cable-driven parallel robots[C]. *International Conference on Cable-Driven Parallel Robots*. Cham: Springer, 2021: 105-116.
- [119] Lamaury J, Gouttefarde M. Control of a large redundantly actuated cable-suspended parallel robot[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Karlsruhe, 2013: 4659-4664.
- [120] Lamaury J, Gouttefarde M, Michelin M, et al. Design and control of a redundant suspended cable-driven parallel robots[C]. *Latest Advances in Robot Kinematics*. Dordrecht: Springer, 2012: 237-244.
- [121] Li H. On the static stiffness of incompletely restrained cable-driven robot[C]. *Cable-Driven Parallel Robots*. Cham: Springer, 2015: 55-69.
- [122] Haghhighipanah M, Miyasaka M, Hannaford B. Utilizing elasticity of cable-driven surgical robot to estimate cable tension and external force[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(3): 1593-1600.
- [123] Abdolshah S, Rosati G. Improving performance of cable robots by adaptively changing minimum tension in cables[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2017, 18(5): 673-680.
- [124] Baklouti S, Courteille E, Lemoine P, et al. Vibration reduction of cable-driven parallel robots through elasto-dynamic model-based control[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 139: 329-345.
- [125] Goodarzi R, Korayem M H, Tourajzadeh H, et al. Nonlinear dynamic modeling of a mobile spatial cable-driven robot with flexible cables[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 108(4): 3219-3245.
- [126] 彭苗娇, 王晓光, 林麒. 风洞试验 WDPR 支撑牵引绳

- 与模型耦合振动研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(1): 140-148.
(Peng M J, Wang X G, Lin Q. Coupled vibration between cables and aircraft model of WDPR in wind tunnel test[J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(1): 140-148.)
- [127] Rushton M, Jamshidifar H, Khajepour A. Multiaxis reaction system (MARS) for vibration control of planar cable-driven parallel robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2019, 35(4): 1039-1046.
- [128] Jamshidifar H, Khosravani S, Fidan B, et al. Vibration decoupled modeling and robust control of redundant cable-driven parallel robots[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(2): 690-701.
- [129] 孙海宁, 唐晓强, 王晓宇, 等. 基于索驱动的大型柔性结构振动抑制策略研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(11): 53-60.
(Sun H N, Tang X Q, Wang X Y, et al. Vibration suppression of large flexible structure based on cable-driven parallel robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(11): 53-60.)
- [130] Sun H, Hou S, Li Q, et al. Research on the configuration of cable-driven parallel robots for vibration suppression of spatial flexible structures[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 109: 106434.
- [131] Sun H N, Tang X Q, Hou S H, et al. Vibration suppression for large-scale flexible structures based on cable-driven parallel robots[J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 27(21/22): 2536-2547.
- [132] Yoon J, Hwang S W, Bak J H, et al. Multi-mode input shaping for vibration suppression of over-constrained cable-driven parallel robots with cable stiffness[C]. The 7th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering. London, 2016: 363-367.
- [133] Chen Z S, Wang X S. Dynamic modeling and residual vibration suppression of the redundantly-actuated cable driving parallel manipulator[J]. IEEE Access, 2020, 8: 99422-99430.
- [134] Raman A, Walker I, Krovi V, et al. Cable failure tolerant control and planning in a planar reconfigurable cable driven parallel robot[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2023, 10: 1070627.
- [135] Boumann R, Bruckmann T. An emergency strategy for cable failure in reconfigurable cable robots[C]. International Conference on Cable-Driven Parallel Robots. Cham: Springer, 2021: 217-229.
- [136] 訾斌, 王炳尧, 刘浩, 等. 可重构柔索并联机器人协同避障方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 593-601.
(Zi B, Wang B Y, Liu H, et al. Study on the collaborative obstacle avoidance method for reconfigurable cable driven parallel robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 593-601.)

作者简介

钱森(1988—), 男, 副教授, 博士生导师, 从事柔索驱动机器人动力学、运动规划与控制等研究, E-mail: qiansenhfut@126.com;

李长奇(1998—), 男, 硕士生, 从事柔索驱动机器人动力学与控制的研究, E-mail: lichangqi@mail.hfut.edu.cn;

周斌(1992—), 男, 讲师, 硕士生导师, 从事机器人不确定性与可靠性的研究, E-mail: bzhfut@163.com;

訾斌(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 从事柔性驱动机器人理论、技术与装备以及智能制造系统控制与自动化等研究, E-mail: zibinhfut@163.com.

科研团队简介

合肥工业大学“智能机器人”研究团队以訾斌教授为学术带头人, 现有中青年骨干教师10余人. 近年来, 团队承担了国家重点研发计划、国家杰出青年基金项目、国家自然科学基金重点项目等80余项, 先后获教育部技术发明奖、安徽省科技进步奖、中国电子学会技术发明奖等多项省部级科技奖励.

团队坚持“四个面向”, 聚焦先进制造、智能材料、信息技术、生命医学等领域的汇聚融通, 以智能机器人研究为特色, 涵盖机构学、材料科学、力学科学、仿生学、信息科学、控制科学、人工智能、生物医学、仪器科学等学科. 团队研究方向为刚柔耦合智能机器人理论、技术与装备, 智能制造系统控制与自动化等交叉学科方向, 主要包括刚柔耦合机器人机构学、移动机器人技术及其智能控制、智能复合材料驱动理论与应用、高性能工业机器人及其智能作业关键技术与应用、共融机器人理论与应用、智能康复医疗机器人等领域, 以有组织科研推进高水平科技自立自强, 统筹服务国家战略需求与区域经济社会发展, 赋能拔尖创新人才培养.