

机械臂结构的发展与应用综述



吴琪¹, 王志刚^{1,2}, 杨宇¹, 芦奕菲¹, 刘钢¹, 石欣桐¹, 鲍盘盘¹

1. 中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065

2. 北京航空航天大学, 北京 100191

摘要:机械臂以其独特的灵活性、强大的感知能力以及突出的适应能力被广泛应用于国防军事领域,如太空探索、工业装配、战场防爆等危险场景。通过仿生结构设计模仿生物体内微结构的排布方式与应急调控机理,可大幅度提升机械臂结构在复杂服役环境下的多功能适应性,提高生产效率、拓宽应用领域,推动科技进步。本文依据刚度特性将机械臂主要分为刚性机械臂、刚柔耦合机械臂和柔性机械臂三类,分别阐述了三类机械臂的优势、劣势、研究现状及应用情况,并从机械臂运动原理及结构设计方法、机械臂仿生设计的驱动方法及控制策略角度阐述了机械臂设计制造中的关键技术。最后介绍了仿生柔性机械臂在航空航天领域的应用现状及发展趋势。

关键词:机械臂; 发展现状; 关键技术; 仿生结构

中图分类号: V214.9

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.05.005

机器辅助人或替代人是人类一直以来追求的目标。目前,机械臂是各领域中最常见的一种机器人。机械臂以其独特的灵活性、强大的感知能力,以及突出的适应能力被广泛应用于太空探索、工业装配、战场防爆等危险场景^[1-2]。通过机械臂代替人类完成繁琐、危险的重复性工作或复杂工作,可有效提高生产效率,保证人类生命安全,改善工作环境以及拓宽应用领域,推动科技进步等^[3-4]。在工业生产中,机械臂主要用于搬运、包装、自动化装配与焊接等重复性工作^[5]。在医疗领域,机械臂可用于微型手术^[6]。在深海、强辐射、高电压及有毒有害等极端环境下,机械臂可减少人工伤害和职业病风险^[7]。尤其是在太空探索中,机械臂可用于承担遥控探测及协助航天员维修航天器等重要任务^[8-9]。随着人类对太空探索的不断深入,每年新增的各类航天器数量不断增加,这些航天器在运行过程中难免出现燃料不足、老化、故障等问题,导致产生了大量人造空间碎片,给在轨运行的航天器带来了严重的安全隐患^[10]。使用空间机械臂对受损的航天器进行及时维修可以显著节约成本,提高经济效益^[11]。因此,机械臂的广泛应用是经济与科技发展的必然趋势。

因其具有巨大的优势与发展潜力,国内外针对机械臂的设计与应用开展了大量研究,并取得了一些积极的进展。机械臂种类繁多,依据刚度特性,可将其分为刚性机械臂、

柔性机械臂和刚柔耦合机械臂三类。本文将分别介绍三类机械臂结构设计的研究现状及其设计制造的关键技术,并着重阐述其在航空航天领域的研究进展。

1 机械臂结构分类与发展现状

机械臂仿生设计可以最大限度地模仿人类真实手臂工作,且控制简单,易于与其他设备一起实现集成控制,有着良好的安全性及人机交互性,在很多科研领域有着较为广泛的应用。本节主要介绍刚性、柔性、刚柔耦合三类机械臂仿生结构设计的研究现状。

1.1 刚性机械臂

刚性机械臂由多个关节组成,各个关节之间呈直线或者旋转关系,形成一个刚性链式结构。由于关节和链条之间不存在弹性变形,因此刚性机械臂具有高负载、高精度、高重复性和高速度等特点^[12],适用于对精度要求较高的场合^[13],可用于物体抓取、搬运、电子组装、精密机械加工、医疗手术等行业。

1954年,Merlet^[14]设计了第一个可编程机器人,机器人可依据记忆完成人类演示动作的复现,但其不具备传感功能。因此,其应用范围受到了较大限制。20世纪60年代,Unimation公司正式推出了第一台商用机器人——

收稿日期: 2023-10-26 退修日期: 2024-01-10; 录用日期: 2024-03-15

引用格式: Wu Qi, Wang Zhigang, Yang Yu, et al. Review on development and application of structure of manipulator[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(05): 60-73. 吴琪, 王志刚, 杨宇, 等. 机械臂结构的发展与应用综述[J]. 航空科学技术, 2024, 35(05): 60-73.

Unimation,如图1(a)所示,并于1979年完成了Puma系列的设计制造,如图1(b)所示,该系列机器人采用两级微机控制和全电式驱动关节,并配置视觉、触觉等传感器^[15]。此外,独有的闭环控制系统可将触手检测到的信息及时反馈并实时调整,提高该类机器人的动态运动精度。



(a) Unimation机器人



(b) Puma机器人

图1 世界上早期机器人

Fig.1 Early robots in the world

1973年,世界首台通过电机驱动,且安装有动态视觉的六轴刚性机械臂诞生,如图2^[16]所示。1978年,Makino等^[17]发明了选择顺应性装配机器手臂,该类机器人的特点是体积小、速度快、灵活性强。与六轴机械臂相比,其成本、使用难度更低,末端执行器的相对误差也较小。Asada等^[18]介绍了一种基于电机直接驱动的新型机械臂的设计思想,取消电机与负载之间的所有传动机构(如减速器和链带),该设计可有效地提高机械臂的精度与稳定性,使其自由、平稳地完成移动,且电机的高扭矩、轻质和小巧等特点,使该类机械臂性能更高、更轻质^[19]。

德国KUKA KR-100工业机械臂在各关节处采用不同的连接方法,可实现各种复杂的活动轨迹,将其固定于生产线特定位置,以较高的精度完成各种各样的重复性工作^[20]。1985年,KUKA开发出一款新的Z形机械臂,可实现6个自由度的运动维度,极大地节省了运行空间。1997年,Pernette等^[21]提出了基于柔性关节的并联机械臂。该类机械臂主要通过示教编程系统实现目标物体的捕捉,确定抓



图2 六轴机械臂

Fig.2 A six-axis manipulator

取夹具的理论空间位置,实现目标物体的运输、加工等操作,具有高速、轻质、承载能力强等特点。1998年,瑞士Güdel公司开发出“RoboLoop”系统,该系统使单个机械臂或多个搬运机械臂能够在一个完全封闭的弧形轨道中循环操作,为工厂自动化发展创造了可能^[22]。

综上所述,刚性机械臂在各个领域的发展已较为成熟,主要用于产品搬运、加工、装配等工艺环节,这些环节均涉及了对工件、工具的拾取与移动。所使用的机械拾取手爪通常也以刚性为主,有着较高的定位准确性及抓持可靠性。但受小型化、低自由度以及小巧性等特点约束,该类机械臂的缺点也较为突出,如要求被移动物体需要具有稳定的外形和坚固的表面,且难以满足在狭窄环境中自由穿越、实现障碍物躲避及灵巧作业的需求。

1.2 柔性机械臂

在实际生产工业应用中,为了提高生产效率、节省成本,需要减轻机械臂的重量或提高它们的操作速度。因此,使用轻型机械臂、制造柔性机械臂是减小能耗的主要途径之一^[23]。目前,柔性机械臂的设计制造已成为许多工程学科的研究热点,与传统的笨重刚性机器人相比,柔性机器人具有质量轻、尺寸小、能耗低、工作空间更大、可运输性好、操作速度快以及安全性高等优点^[24]。近年来,针对柔性机械臂的研究主要集中在柔性机械臂的动力学建模,轻质、高强度、高自由度的结构设计及智能控制等方面。

1.2.1 传统柔性机械臂

Wei Dunwen等^[25]以章鱼的触手肌肉为灵感模拟其收缩行为,设计了一种柔性仿生机械臂,如图3所示。该柔性机械臂以弹性弹簧为骨架,通过电动4根绳索和可变形结构机构实现柔性机械臂的收缩、弯曲和扭转运动。结果表明,该机械臂具有良好的环境适应性和操纵能力,且各节段自由度可控。未来可对该模型结构进行进一步优化,设计闭环控制策略,以实现更精确的位置和刚度控制。

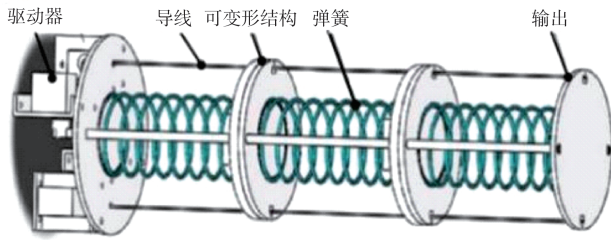


图3 基于绳索和可变形结构的柔性机械臂

Fig.3 Flexible manipulator based on rope and deformable structure

受软体机械臂启发^[26],结合柔性杆驱动的原理及特点,Wang Peiyi等^[27]设计并制造了一种用于最小接触手术的模块化柔性机械臂,该结构由硅胶主体、底座和端盘、三个硅胶管及三个锁环组成,如图4所示。硅胶软体则布置于底盘和端盘之间,通过控制驱动杆运动,实现柔性机械臂的伸长、缩短和弯曲运动。结果表明,这一结构也达到了外科医生需要的规格。未来可进一步提高软体臂的运动控制,构建分布自感知传感器模型,增加柔性机械臂的感知能力。

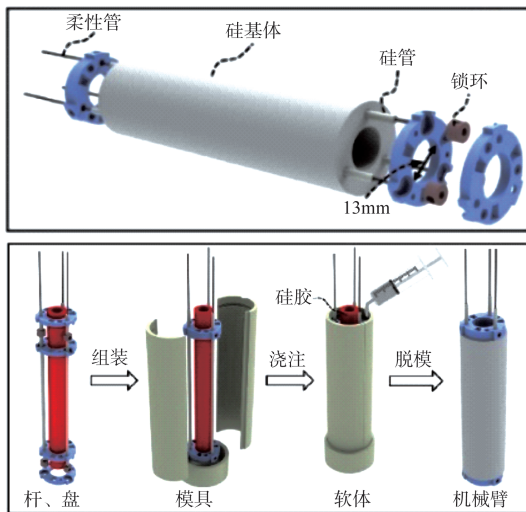


图4 杆驱动软体机械臂系统结构设计

Fig.4 System structure design of rod-driven soft manipulator

Jiang Hao等^[28]受象鼻启发,开发了基于蜂窝气动网络(HPN)结构的柔性机械臂,如图5所示。该蜂巢网格结构是气囊和蜂巢的结合,以蜂巢结构为骨架,通过气囊的充气—放气实现结构的伸展或弯曲,并利用非线性有限元方法(FEM)与物理试验进行验证,结果表明,HPN结构可较好地平衡结构的变形与承载能力,具有较好的灵活性。

Falco等^[29]提出了一种可变刚度多模块柔性机械臂,重现章鱼手臂的运动。该机械手由三个几何形状和刚度性能完全相同的单元组成,这些单元的外部骨架均由硅胶制成,内部通过流体介质驱动器驱动变形,并在结构内部设置阻

塞装置,实现结构的刚度变化。通过位置跟踪系统,验证了该机械臂的活动能力以及抓取能力,如图6所示。

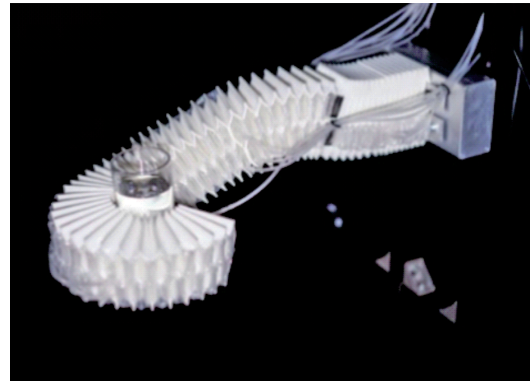
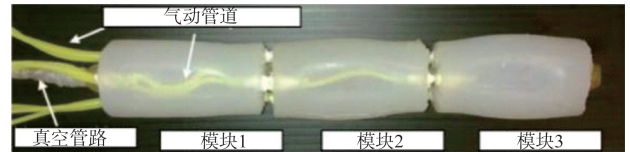
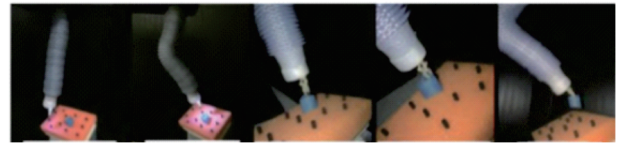


图5 HPN操作器端着水杯

Fig.5 The HPN operator holds a glass of water



(a) 集成管道和模块内部的粒状干扰



(b) 软体机械臂抓取示例

图6 可变刚度的软体机械臂

Fig.6 Flexible manipulator with variable stiffness

1.2.2 力学超材料柔性机械臂

近年来,力学超材料结构的形状变换成为新兴研究热点,使得力学超材料在软体机器人、柔性电子设备等领域有巨大的应用潜力。力学超材料依据其变形方式与状态可分为细梁、折纸和剪纸三大类。目前,在软体机械臂领域应用较多的是折纸结构。折纸结构由于其出色的结构自适应能力、大范围运动能力及丰富的力学特性受到机器人学界的普遍关注。

Kresling折纸结构具有扭转—收缩的耦合运动模式^[30], Miura折纸结构具有面内的折展运动模式^[31], Yoshimura折纸结构具有沿轴向的折展运动模式^[32]。许多最新研究将折纸结构与软体机器人进行有机结合,以实现更加丰富的运动模式与更大的工作空间。Wu Shuai等^[33]提出了一种基于磁力驱动与Kresling型折纸单元的软体机械臂,可实现多模态变形,如图7所示。单个折纸单元仅能通过面内磁化实现折展开功能或通过面外磁化实现周向弯曲功能,但当结构包含两个以上折纸单元时,该结构可实现拉伸、压缩、全周向弯曲

及扭曲功能等。此外,团队分别设计了12单元和18单元的仿生机械臂,除了模拟章鱼触手可控伸缩与不同弯曲形态外,还展示了与触手捕食功能相似的抓取和操作物体的能力。结果表明,该结构具有十分灵活的自由度,通过改变单元的数目以及磁化方向,可满足不同场景的功能需求。未来可用于开发内窥镜、插管、导管等小型医疗设备。

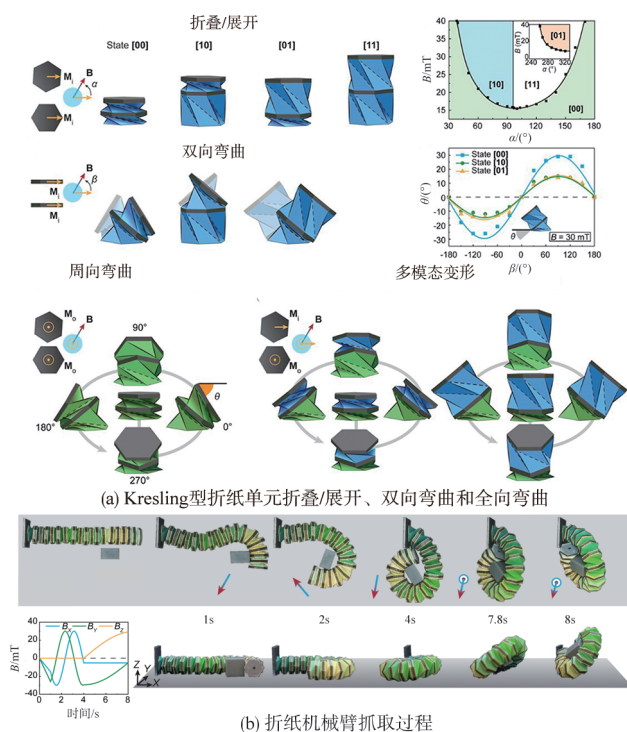


图7 Kresling型折纸机械臂

Fig.7 Kresling origami manipulator

Li Shuguang等^[34]提出一个基于流体驱动的柔性机械臂。该系统制备只需三部分:一个可压缩的固体骨架、灵活封闭的皮肤和流体介质。在这个系统中,皮肤将骨架结构完全包裹,流体介质用于骨骼和皮肤之间。在初始平衡状态下,内外流体的压力相等。随着内部流体体积的改变,内外的压力差作用于骨架产生变形。通过不同材料及不同形状的骨架结构制备了不同尺度的柔性机械臂,实现了扭转、弯曲、拉伸、压缩等多种自由度的变形模式,如图8所示。试验表明,该类机械臂可以达到90%的收缩率,且驱动效率高、成本低。

Zhang Chao等^[35]基于传统的Kresling型折纸单元,增加了一个额外的对角线折痕,形成了一种新型折纸单元,如图9所示。在该对角线折痕处集成一个微小气囊,可以形成一个独立控制的充气—放气单元。另外,每个单元结构中均预留了螺栓孔,可以串联形式呈现模块数量可调的机械臂。对两个以上的新型折纸单元进行叠加可实现扭转、

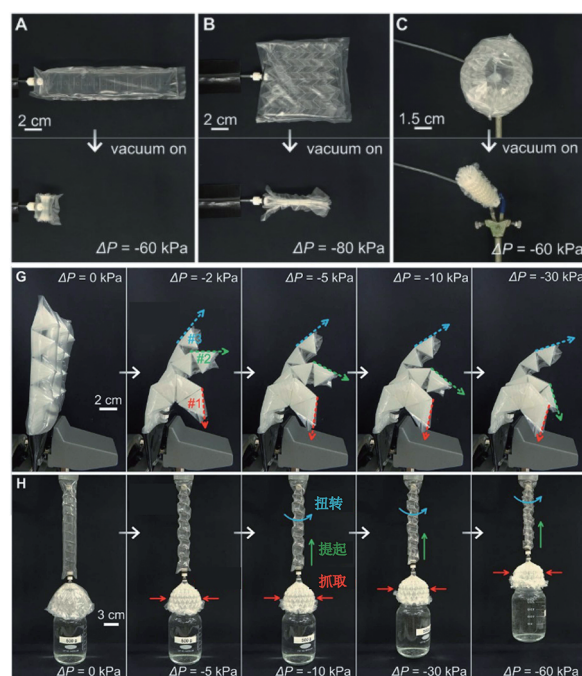


图8 各种基本驱动运动和可编程的多自由度驱动

Fig.8 Various basic drive movements and programmable multi-degree of freedom drives

拉伸、压缩、弯曲,以及基础运动模式的任意组合。该机械臂可以任意流体介质为驱动单元,既可满足陆地应用,也可满足水上应用。

细梁结构是力学超材料结构的另一种重要表现形式,点阵结构以其轻质、高比强度、高比模量和较灵活的可设计性等特点被广泛用于其他研究领域^[36]。美国国家航空航天局(NASA)将点阵结构用于飞翼布局无人机设计,成功地实现机翼可变形。Cheung等^[37]提出了基于力学超材料的数字变形机翼概念,并通过单个扭转碳管实现了机翼的主动扭转变形。此外,Jenett等^[38]通过可逆装配法用离散晶格完成机翼的组装。这些研究工作表明,基于可逆装配力学超材料结构的变形结构在加入驱动系统后,不仅具有轻量化和高可靠性的特点,而且可以实现主动变形,具有巨大的应用潜力。

程基彬等^[39]设计了以点阵结构为基础结构的柔性机械臂,如图10所示,并通过分段常曲率假设建立胞元组合变形的数学模型预测,通过力学超材料的调配设计实现多重弯曲运动。最后通过实物试验验证了变形预测模型的有效性,完成了超过正负90°的弯曲并对末端周围的环境进行探索,可应用于复杂狭小空间的检视。

综上所述,无论是传统软体机械臂还是基于力学超材料结构的柔性机械臂,其本质均是一种具有弹性变形的机械臂,其均具有良好的环境适应性、灵活性和安全性等特

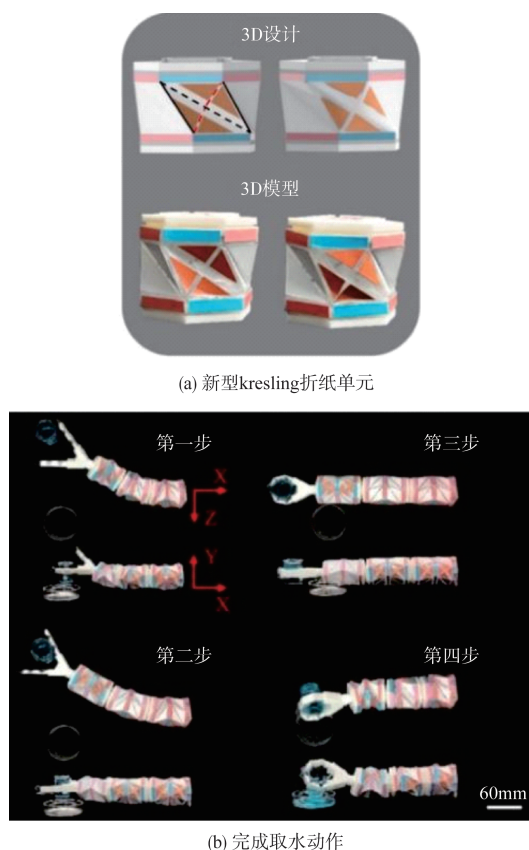
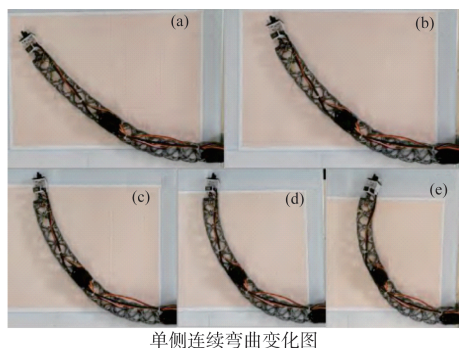


图9 新型Kresling折纸单元及其变形模式

Fig.9 New Kresling origami unit and its deformation mode



单侧连续弯曲变化图

图10 点阵柔性机械臂变形模式

Fig.10 Deformation mode of lattice flexible manipulator

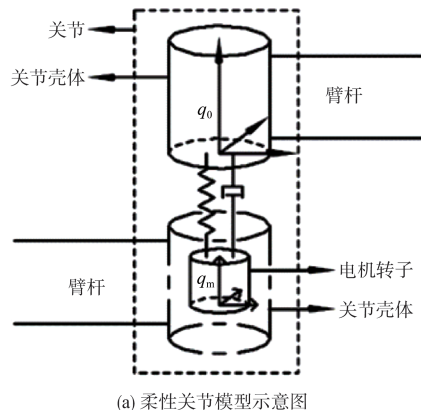
点。其可以适应复杂环境中的操作,如在狭窄空间进行搜救、在危险环境下进行物体搬运等。但柔性机械臂的刚度较低,容易导致结构疲劳,且精度受到弹性变形的影响,在运动过程中或受到外界干扰时,容易引起振动问题,从而降低控制精度,使系统的稳定性变差。

1.3 刚柔耦合机械臂

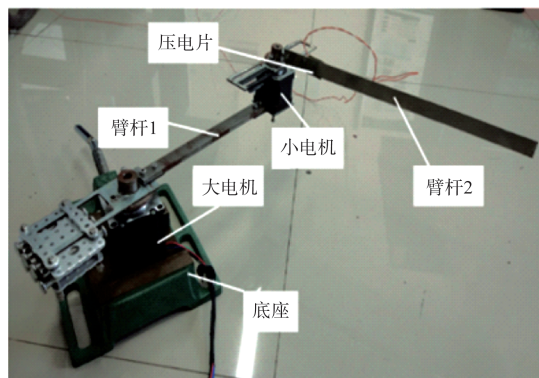
刚柔耦合机械臂是由刚性、柔性材料组合而成,刚性机械臂刚度大、精度高且承载能力强,柔性机械臂质量轻、能

耗低、韧性好,刚柔耦合机器人将两种材料的优点集于一身,具有广阔的发展空间^[40]。

高铁红^[41]提出了一种面向于水面工作环境且具有一定负载能力的新型防水电机器人,并进行了仿真分析与物理样机研制。结果表明,本文所提出的机器人具有结构轻巧、响应速度较快、划水效率高等特点,未来有望应用于水体检测、环境检测及军事侦察等任务。姚国林等^[42]针对电子装配精度与速度双重需求,提出了一种通过柔性铰链的变形补偿轴承摩擦死区的刚柔耦合关节机器人概念设计;并在关节处引入弹簧模拟机械臂与柔性铰链之间的弹性变形,建立动力学模型,如图11所示。通过相关数值仿真试验,验证了该理论模型的有效性。尹秋明等^[43]为了抑制由柔性关节引起的振动,提高刚柔耦合机械臂的运动轨迹精度,推导出机械臂柔性关节和杆件的力学模型,寻找刚柔耦合机械臂关节阻尼参数与末端振动位移的关系。结果表明,无论在高速还是低速下,柔性关节均对机械臂末端运动精度有不容忽视的影响。



(a) 柔性关节模型示意图



(b) 机械臂实物图

图11 刚柔耦合两节机械臂设计

Fig.11 Design of rigid-flexible coupling two-section manipulator

Li Zheng等^[44-45]提出了一种通过软索驱动的刚柔耦合机械臂,如图12所示。该机械臂由球面关节和柔性骨架连接,以刚性节点作为脊柱、电线作为肌肉。该机械臂可看作

蛇形机器人与连续体机器人的结合。其结构呈蛇形,驱动方式与连续体机器人相似。该机器人比传统的蛇形机器人结构更简单,比典型的连续体机器人定位精度更高。

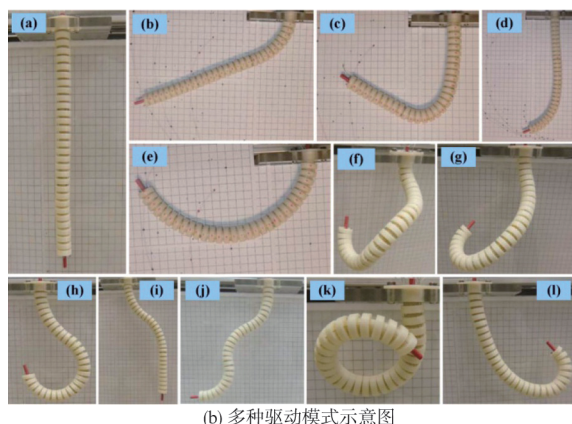
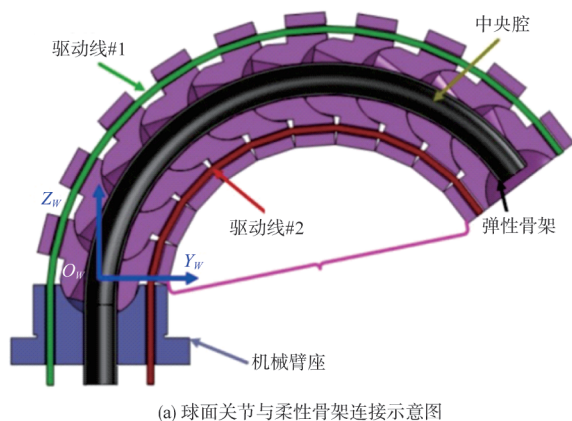
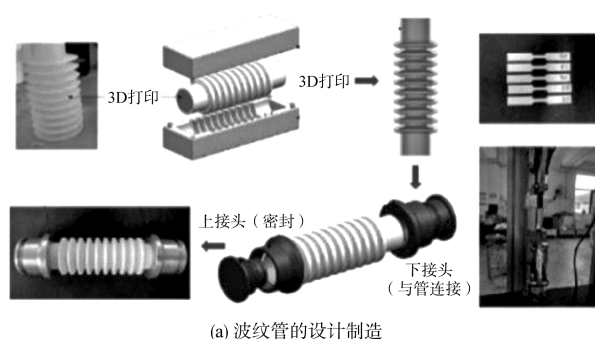


图12 软索驱动刚柔耦合机械臂

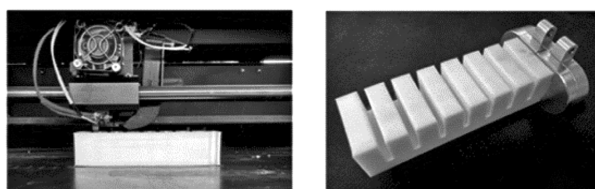
Fig.12 Flexible cable-driven rigid-flexible coupling manipulator

随着水下作业的随机性和多样化程度的增加,传统的刚性机械臂无法完成柔软样品或脆弱的水生标本采样工作。Ji Hui等^[46]以手腕为灵感,提出了一种基于水液压驱动的水下作业与探测拟人化柔性机械臂(ASM),如图13所示。该机械臂由三个波纹管和一个主轴组成刚柔耦合结构,该结构可完成连续的机械臂俯仰动作。试验证明,所研制的刚柔耦合机械臂可适应和抓取不同形状与尺寸的物体。与传统的刚性机械臂相比,ASM具有高度进化的抓取能力及更好的灵活性和适应性;与气动机械臂相比,ASM具有更好的负载能力。

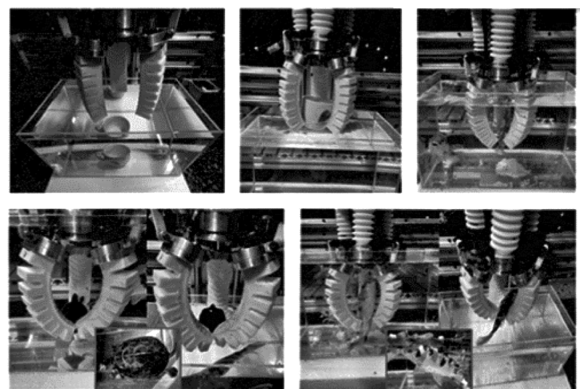
Hu Yingbai等^[47]开发了一种新型刚柔耦合口咽拭子机械臂,并集成了力传感器,提供了安全、稳定、可靠的采样体验。未来可以提高系统的稳健性为重点研究方向,向临床试验迈进。Yang Yang等^[48]以手指为灵感,研制了可变刚度的刚柔耦合机械臂。如图14所示,该机械臂由柔性



(a) 波纹管的设计制造



(b) 夹持器的设计制造



(c) 水下夹持演示

图13 水液压驱动的水下作业与探测拟人化柔性机械臂

Fig.13 Anthropomorphic flexible manipulator for underwater operation and exploration driven by water hydraulics

驱动器和刚性骨架构成,包含三个自由度。柔性驱动器由硅橡胶制成,骨架结构由用于骨段的丙烯腈丁二烯苯乙烯(ABS)和用于手指关节的形状记忆聚合物(SMP)两种材料构成。试验结果表明,当SMP关节的加热温度高于临界温度时,手指关节表现出非常小的刚度,可通过外力驱动轻松弯曲。在没有弯曲力的情况下,可在形状记忆合金作用下恢复到原来的形状。

针对柔性机械臂在操纵过程中产生的振动问题,Jing Xishuang等^[49]提出了一种新型的具有冗余自由度的刚柔耦合连续机械臂结构,如图15所示,并通过计算机仿真和物理试验对该机械臂的设计有效性进行了分析。结果表明,所提出的刚柔耦合结构,可有效提高机械臂的结构刚度和承载能力。旋转和弯曲关节组合的模块化设计解耦了关节处的自由度,使控制逻辑更清晰。但这种机械臂

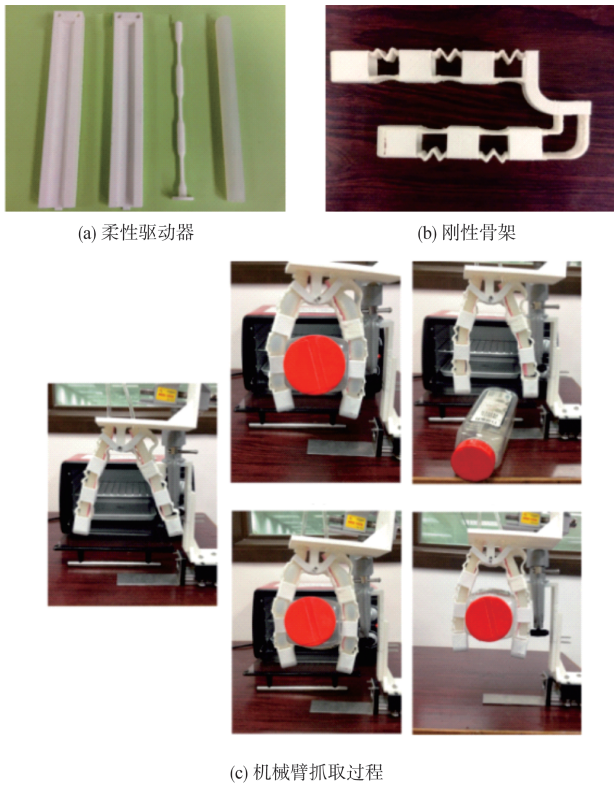


图14 手指型刚耦合机械臂

Fig.14 Finger-type rigid-coupled manipulator

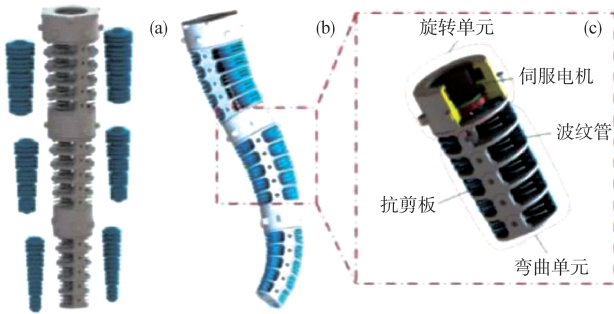


图15 具有冗余自由度的刚柔耦合机械臂

Fig.15 A rigid-flexible coupled manipulator with redundant degrees of freedom

的控制系统高度依赖预先确定的气体压力与弯曲角度之间的关系,需通过反馈控制和引入驱动补偿来提高控制精度。

目前,针对刚柔耦合机械臂的研究,主要集中在刚柔耦合机器人的动力学建模与结构设计方面,取得了一系列研究成果,但对其变形机理和控制的研究则不足。总体来说,刚柔耦合型结构可通过内部刚性机构与柔性结构相配合产生变形;该结构虽然能较好地解决结构的重量与变形问题,但其变形精度仍有待提高。

2 机械臂设计的关键技术

机械臂主要由机械臂本体、控制系统和驱动系统三部分组成^[50]。其中,机械臂本体的结构设计是机械臂设计的关键,直接决定了该结构的运动维度、运动方式、动态精度及效率等。驱动系统是决定机械臂性能的主要指标,直接影响机械臂的动力特性、运行效率及其经济性。控制系统相当于机械臂的大脑,是整个机械臂设计的核心。早期,对机械臂控制的设计大多以点到点为主,主要应用于对精度要求不高的场合。随着应用场景的复杂化及工艺水平需求的提高,现在的机械臂更追求高精度的跟踪控制。

2.1 机械臂运动原理及结构设计方法

国内外针对机械臂开展了大量研究,并取得了一些积极的进展。从刚性角度分析,其可分为刚性机械臂、刚柔耦合机械臂和柔性机械臂三类。刚性机械臂由各个关节组合而成,各个关节之间可通过相对滑动或相对转动实现轨迹运动,其特点是变形精度高、承载能力强,但结构复杂,重量问题无法避免。刚柔耦合机械臂通过刚性结构与柔性结构相配合产生变形,可较好地协调高负重与变形之间的矛盾,但其变形精度仍有待提高。近年来,柔性机械臂研究更为广泛,主要分为两种:一种是基于传统软体材料(橡胶、硅胶)的柔性机械臂,另一种是基于力学超材料结构(折纸)的机械臂,其本质均是一种具有弹性变形的机械臂,均具有良好的灵活性和安全性等特点。但柔性机械臂的刚度较低,容易导致结构疲劳,且精度受到弹性变形的影响,容易引起振动问题,导致系统的稳定性变差。研究表明,基于复合材料的点阵胞元结构具有高比强度、高比刚度、可编程设计等优势,通过主动智能变形及变胞元融合等设计概念有望实现多模态自适应变形的柔性机械臂,以满足不同的空间运动需求。

2.2 机械臂驱动方案的设计方法

驱动方法决定了机械臂完成预设动作的方式。传统机械臂的驱动方式有电机传动^[51]、液压传动^[52]和气压传动^[53]等。伺服电机驱动是将电能转化为机械能,原理是当电流通过电机时产生电磁力,电磁力驱动转子旋转产生机械能,带动机械臂工作。其优势在于运动速度相对较快、行程长、维护和使用比较方便。但部件笨重,限制了整个系统的灵活性和柔软性。液压驱动系统通过油液压力完成机械臂的驱动。它结构紧凑,传动过程较为平稳,抓重可达几百千克;缺点是对设备的密封性及精度要求高,且不适于在高温或低温环境下工作。气压驱动系统通过气体压缩产生压力来驱动机构运动。其优点是易于获取动力源、成本低;缺点是工作稳定性差、抓取力不大,适于在高速、轻载的环境

下工作。

对于柔性机械臂,为了使其具备更灵活的变形能力,满足人机交互的安全准则,上述的驱动方式不再适用。针对这一问题,国内外学者开展了许多创新型研究,如绳索驱动^[54]、形状记忆合金驱动^[55]和磁驱动等^[56]。绳索驱动是通过改变绳索长度驱动机械臂运动的,该驱动方法的特点是:(1)结构简单、易于制造维护;(2)传动效率高,适用于低速、高扭矩传动;(3)可以根据不同的功能及不同的场合设计不同的排列方式,满足不同传动功率的需求。但精度较低,且绳索易磨损、断裂,需经常检修。形状记忆合金(SMA)驱动通过加热或通电使材料内部产生应力或应变,促使柔性机械臂产生变形。它的优点是记忆合金可完全与材料融合,无须额外的电机等传动设备,是未来最有望实现的一种一体化设计,应用前景十分广阔。但由于受SMA本身变形机理的限制,其难以实现高精度,且容易受到温度影响。磁驱动柔性机械臂是利用磁场的作用力来驱动柔性机械臂运动的。磁驱动可以实现高速和高精度的运动控制,响应速度快,并且能够在液体中操作。但磁性部件的制造较为麻烦,需要磁化处理,薄膜涂覆或组装步骤。磁性部件通常不具备生物相容性,无法在人体中长期使用。

2.3 机械臂控制策略的设计方法

机械臂的控制系统是典型的非线性控制系统,为了实现机械臂跟踪控制系统的快速跟踪性、稳定性和定位准确性,国内外学者开展了大量研究。常见的机械臂控制方法有比例积分微分控制(PID)^[57]、滑模控制(SMC)^[58]、自适应控制(ACS)^[59]、反演控制(BC)^[60]、模糊控制(FC)^[61]及神经网络控制(NPC)^[62]。PID是按给定值与实际输出值偏差的比例、积分、微分控制。这一控制方法的优势在于结构简单、适应性较强、不依赖于系统的具体模型;但依据于经验调整参数,只能对系统当前状态进行控制,无法实现预测功能等。滑模控制又被称作变结构控制,是一类特殊的非线性控制,可依据系统状态自动变化控制系统结构。该控制法能够克服系统的不确定性,且算法简单,响应速度快;缺点是由于该方法本身不具备连续性,所以在运行过程中会产生抖振。因此,滑模控制常常与自适应控制等方法结合起来使用。自适应控制系统可依据受控对象自身参数或周围环境变化自动调整系统控制参数,改善控制效果。其优点是不需要精确的数学模型,有较强的容错能力,鲁棒性强;缺点是这种自适应系统无法保证整个控制系统的指数稳定性,也难以分析系统的动态品质及收敛性。

反演控制是一种层叠设计的方法,将复杂的非线性系

统分解成多个更简单和低阶的系统,然后选择适当的Lyapunov函数来保证系统的稳定性,实现对系统的全局调节和有效控制。其优点是具有系统化、结构化的特点,且响应速度较快;但对模型的精度要求较高,难以克服外加的扰动,且计算量呈爆炸式增长,限制了其在实际中的广泛应用。在传统控制领域,控制系统动态模式的精确性直接决定了控制系统性能,动态信息越详细,控制越精确;然而当变量数过多时,往往难以准确描述系统的动态,研究发现,通过模糊控制可较好地解决该问题。其优点是工作范围宽、适用范围广,设计和实现过程较为简单,适合非线性系统的控制,不依赖于数学模型,通过经验或数据收集也可解决控制任务。但是,该方法也存在一些缺点,如需要设定模糊规则,对于复杂的系统,模糊规则的设计和优化同样困难;同时,控制精度不如预测控制方法准确。神经网络控制模仿人脑建立起来的控制系统具备较强的非线性输入输出映射能力。它的优点是具有较强的抗干扰性,自我学习能力强,能够控制各种复杂的非线性系统;但是也存在收敛速度慢,甚至发散或是局部最优的情况。

综上所述,随着科技的不断发展,机械臂作为空间操纵的重要装备,具有广阔的应用前景,极大地推动了国家经济与科研水平的发展。随着人工智能、大数据等前沿技术的兴起,许多新型设计方法、控制策略和驱动方法被引入仿生机械臂中,为其发展带来了新的机遇与可能。

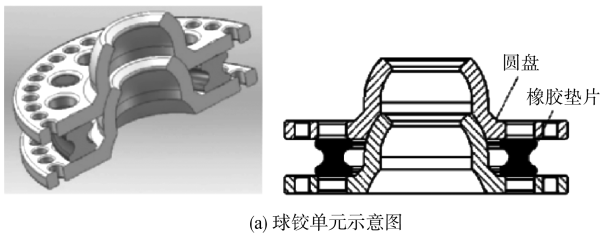
3 机械臂在航空航天领域的应用

随着航空航天领域的快速发展,机械臂应用前景越来越广阔。在航空领域,机械臂不仅可以完成点胶、喷涂、热处理、搬运等作业,还可进行钻孔、检测、在线监测、无损探伤等特种作业。在航天领域,空间机械臂已然成为各国重点发展的方向。作为各类航天器在轨支持、服务的一项关键技术,空间机械臂可协助人类或代替人类完成危险、复杂的太空任务,如空间站的建造、维修、燃料补给,太空垃圾的抓取、捕获及星球探测试验等。

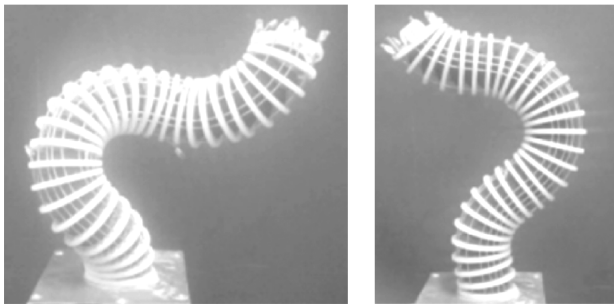
3.1 机械臂在航空领域的应用

在航空领域亟须一种结构灵巧且多自由度的机械臂去完成复杂的修理和检查工作的迫切需求下,翟士民等^[63]提出了一种基于电机与绳索驱动连续型仿生柔性机械臂方案,该方案主要由布置驱动装置的橡胶垫片和多组具有旋转功能的球铰单元组成,如图16所示。该结构整体的特点是结构简单、轻质、灵活可靠性高等,具有较高的自由度。

针对民航飞机油箱内部结构复杂、空间狭小及作业环



(a) 球铰单元示意图



(b) 多自由度串联球铰机械臂

图 16 绳驱型连续型机械臂

Fig.16 Rope-driven continuous manipulator

境危险恶劣但需及时进行人工安全检查等问题,高庆吉等^[64]提出了一种基于线缆驱动连续型仿生柔性机械臂方案,如图 17 所示,并通过相关仿真与试验验证了该连续型机械臂的空间运动能力。贾玻^[65]针对航空发动机、飞机油箱、核电站管道等复杂狭小的空间环境,提出了一种基于绳驱的超冗余蛇形机械臂方案,并制作了原理样机对蛇形机械臂的运动轨迹进行相关试验验证。试验结果表明,该蛇形臂可实现复杂且灵活的空间运动。

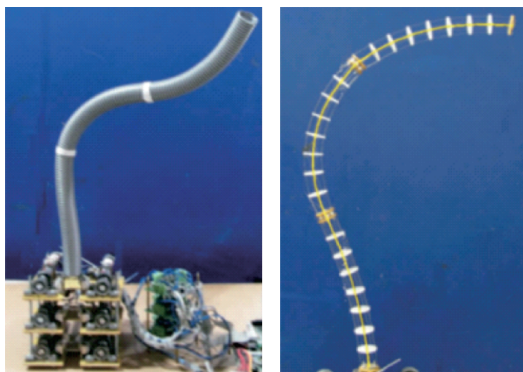


图 17 面向油箱检测的连续型机械臂

Fig.17 Continuous manipulator for fuel tank inspection

为了满足不断增长的空中作业需求,无人飞行器研究领域得到快速发展。传统的飞行器需搭载刚性机械臂来完成抓取、操纵等工作,但其质量大,所需的驱动耗能过高。因此,需提出一种新型面向无人机的轻质仿生柔性机械臂。Zhao Jinbo 等^[66]针对这种无人机平台,提出了一种新型的绳

驱机械臂,在降能和延时方面有一定的效果,但其控制系统较为复杂。王尧尧等^[67]针对复杂的空中作业需求,提出了一种面向旋翼的仿生柔性机械臂方案,如图 18 所示,其通过绳索的伸长与缩短模拟章鱼的收缩与舒张,控制臂身的转动与抓取。通过试验平台对该机械臂的性能进行验证,结果表明,面向旋翼飞行器的仿生机械臂具有较低的能耗及较高的交互安全性。

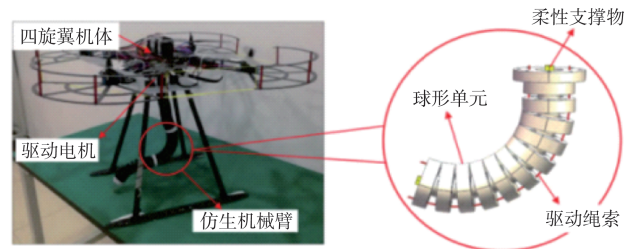


图 18 面向旋翼的仿生飞行机械臂结构图

Fig.18 Structure of bionic flight manipulator for rotorcraft

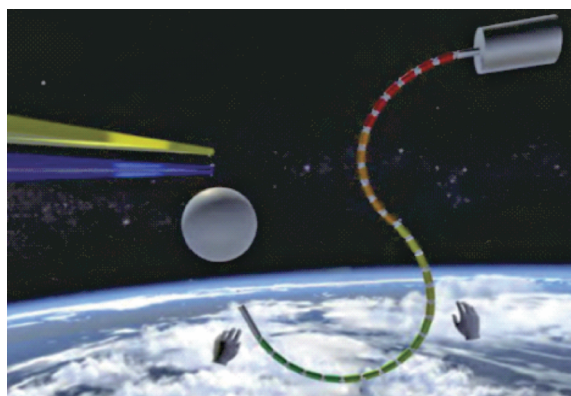
综上所述,面向航空飞行器的仿生机械臂必须朝着轻质、低能耗、多自由度、小体积的方向发展。因此,必须从结构、驱动控制上加强优化,轻量模块化的设计方法、智能避撞控制技术、高精度的定位功能成为新一代航空机械臂应具备的三大关键技术。

3.2 机械臂在航天领域的应用

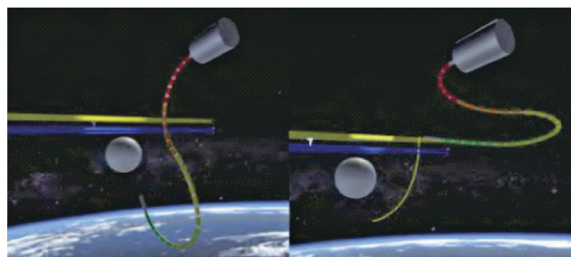
空间机械臂已然成了各国重点发展的方向。作为各类航天器在轨支持、服务的一项关键技术,空间机械臂可协助人类或代替人类完成危险、复杂的太空任务,如空间站的建造、维修、燃料补给,太空垃圾的抓取、捕获及星球探测试验等。为了保证空间机械臂能安全、可靠、有效地完成太空任务,机械臂除了具备必要的安全性、稳定性和灵活性之外,还需具备足够高的运动精度、鲁棒性及顺应性。考虑到空间环境下燃料较为宝贵,目前,空间机械臂的主要运行动力来源于太阳能电池板和携带的储备电源。因此,新一代的空间机械臂需要朝着轻量化、柔性化方向发展。

空间机械臂通常为细长杆件,在空间作业时,其振动特性与变形显得十分明显,对于其精确操作会产生不容忽视的影响。毛志刚^[68]以挠性空间机械臂为对象,对其刚柔耦合动力学与振动抑制控制策略进行研究。结果表明,基于动力补偿的控制方法能有效地跟踪期望轨迹,同时能起到抑制振动的效果。耿仕能等^[69]针对空间机械臂在碰撞过程中产生的破坏与冲击问题,提出一种可变刚度丝驱动连续型机械臂方案,并通过相关试验验证了该机械臂的运动精度及刚度调节能力。

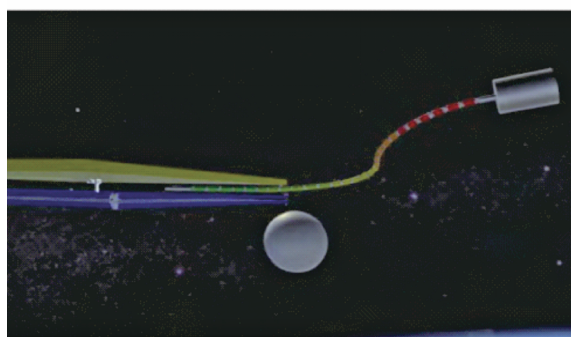
朱晓俊等^[70]针对绳驱超冗余空间柔性机械臂的运动特点,设计并研制了适应多种工况的遥操作人机交互系统。该系统不仅可以实现柔性机械臂在大范围空间的快速运动,还可在有障碍的狭小空间内完成精细的操作任务,并通过图19所示的卫星壁板展开试验验证了该系统的工程实用性。



(a) 穿越帆板的准备臂形



(b) 通过末端一臂形同步控制运动至帆板边缘



(c) 保持平面运动进入狭缝

图19 柔性空间机械臂穿越壁板示意图

Fig.19 Schematic diagram of flexible space manipulator passing through the wall panel

赵智远等^[71]提出了一种新型的具有两个被动式伸缩臂杆的空间站遥控机械臂系统(SSRMS)。相比于传统关节型机械臂,该机械臂具有更为简单的结构组成及更可靠的重构方式,可有效满足复杂多样化的在轨需求。

综上所述,现有的在役空间机械臂通常具有大结构尺寸、多自由度、模块化关节、多臂协同操作等特点。这种机

械臂正向关节轻量化、一体化的方向发展。目前,空间机械臂的在轨服役操控技术还存在较多挑战,如提高末端执行器的稳定性、可靠性,使整个机械臂朝着轻量化发展;将人工智能技术引入空间机械臂设计,实现自主可控操作。

4 结论

仿生机械臂的设计与应用是未来智能制造最重要的发展方向之一。通过研究,本文得出以下结论:

(1) 基于刚性结构的机械臂发展成熟,稳定性好、精度高。但其缺点也较为突出,如难以满足障碍物躲避及灵巧作业的需求。

(2) 柔性机械臂具有良好的环境适应性、灵活性和安全性,可在狭窄空间进行搜救、搬运等操作。但柔性机械臂的刚度较低,在运动过程中容易引起振动问题,降低系统的稳定性。

(3) 基于力学超材料的柔性机械臂方案,可通过构建变几何的点阵结构,并嵌入智能作动系统,在不同空间位置布置力学性能不同的胞元结构,理论上可实现任意一种变形需求。刚柔耦合机械臂虽然能较好地解决结构的重量与变形问题,但其变形精度仍有待提高。

本文从机械臂运动原理及结构设计方法、机械臂仿生设计的驱动方法及控制策略角度阐述了机械臂设计制造中的关键技术,并着重阐述了仿生柔性机械臂在航空航天领域的应用。当前,机械臂的设计正朝着结构轻量化、一体化的方向发展。未来将人工智能技术引入仿生机械臂设计,实现自主可控操作。

AST

参考文献

- [1] 王剑,李成刚,岳云双,等.面向航天器零部件装配的机械臂混合控制策略[J].航空科学技术,2022,33(2):90-96.
Wang Jian, Li Chenggang, Yue Yunshuang, et al. Hybrid control strategy of robot arm for spacecraft component assembly [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022,33(2):90-96. (in Chinese)
- [2] Ray Y, Xun Xu, Klotz E, et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A review[J]. Engineering, 2017, 3(5): 616-630.
- [3] Jamshidi M B, Lalbakhsh A, Alibeigi N, et al. Socialization of industrial robots: An innovative solution to improve productivity [C].2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON). IEEE,

- 2018: 832-837.
- [4] Zemmar A, Lozano A M, Nelson B J. The rise of robots in surgical environments during COVID-19[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2020, 2(10): 566-572.
 - [5] Almurib H A F, Al-Qrimli H F, Kumar N. A review of application industrial robotic design[C]. 2011 Ninth International Conference on ICT and Knowledge Engineering. IEEE, 2012: 105-112.
 - [6] Ginoya T, Maddahi Y, Zareinia K. A historical review of medical robotic platforms[J]. *Journal of Robotics*, 2021, 2021: 1-13.
 - [7] Phillips B T, Becker K P, Kurumaya S, et al. A dexterous, glove-based teleoperable low-power soft robotic arm for delicate deep-sea biological exploration[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 14779.
 - [8] Gao Y, Chien S. Review on space robotics: Toward top-level science through space exploration[J]. *Science Robotics*, 2017, 2(7): 5074.
 - [9] Hancher M D, Hornby G S. A modular robotic system with applications to space exploration[C]. 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT'06). IEEE, 2006: 124-132.
 - [10] Ellery A, Kreisel J, Sommer B. The case for robotic on-orbit servicing of spacecraft: Spacecraft reliability is a myth[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 63(5-6): 632-648.
 - [11] Henshaw C G. The DARPA phoenix spacecraft servicing program: Overview and plans for risk reduction[C]. International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 2014.
 - [12] 孙悦. 柔性关节机械臂轨迹跟踪与振动抑制方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
Sun Yue. Research on trajectory tracking and vibration suppression of flexible joint manipulator [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019. (in Chinese)
 - [13] Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 467-475.
 - [14] Merlet J P. A historical perspective of robotics[C]. International Symposium on History of Machines and Mechanisms Proceedings HMM 2000, 2000: 379-386.
 - [15] Gruver W A, Soroka B I, Craig J J, et al. Industrial robot programming languages: A comparative evaluation[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1984 (4): 565-570.
 - [16] 赵惠. 基于改进RRT的机械臂路径规划算法研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
Zhao Hui. Research on path planning algorithm of robot arm based on improved RRT [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
 - [17] Makino H. Development of the SCARA[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2014, 26(1): 5-8.
 - [18] Asada H, Kanade T. Design of direct-drive mechanical arms[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1983, 105: 312-320.
 - [19] Jun O, Ryuji T, Tsuyoshi H, et al. Control of a direct-drive arm using novel repetitive control[J]. *IEEE Transactions on Sensors & Micromachines*, 1993, 113(8): 961-969.
 - [20] 马慧超. 刚性机械臂位置与力混合自适应控制研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.
Ma Huichao. Research on hybrid adaptive control of rigid manipulator's position and force [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013. (in Chinese)
 - [21] Pernette E, Henein S, Magnani I, et al. Design of parallel robots in microrobotics[J]. *Robotica*, 1997, 15(4): 417-420.
 - [22] Hägele M, Nilsson K, Pires J N, et al. Industrial robotics[J]. *Springer Handbook of Robotics*, 2016: 1385-1422.
 - [23] Dwivedy S K, Eberhard P. Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2006, 41(7): 749-777.
 - [24] Lochan K, Roy B K, Subudhi B. A review on two-link flexible manipulators[J]. *Annual Reviews in Control*, 2016, 42: 346-367.
 - [25] Wei Dunwen, Gao Tao, Mo Xiaoquan, et al. Flexible bio-tensegrity manipulator with multi-degree of freedom and variable structure[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 33(1): 1-11.
 - [26] Cianchetti M, Ranzani T, Gerboni G, et al. STIFF-FLOP surgical manipulator: Mechanical design and experimental characterization of the single module[C]. 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013: 3576-3581.
 - [27] Wang Peiyi, Tang Zhiqiang, Xin Wenci, et al. Design and experimental characterization of a push-pull flexible rod-driven

- soft-bodied robot[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(4): 8933-8940.
- [28] Jiang Hao, Liu Xinghua, Chen Xiaotong, et al. Design and simulation analysis of a soft manipulator based on honeycomb pneumatic networks[C]. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2016: 350-356.
- [29] De Falco I, Cianchetti M, Menciassi A. A soft multi-module manipulator with variable stiffness for minimally invasive surgery[J]. *Bioinspiration & biomimetics*, 2017, 12(5): 056008.
- [30] Liu Shuai, Yang Qingsheng, Tao Ran, et al. A highly-compressible, torsion-contraction coupling and self-transforming cylindrical bi-material metastructure[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(2): 025016.
- [31] Schenk M, Allwood J M, Guest S D. Cold gas-pressure folding of miura-ori sheets[C]. *Steel Research International, Special Issue Proceedings of the International Conference on Technology of Plasticity (ICTP)*, 2011.
- [32] Zhang Qiwei, Fang Hongbin, Xu Jian. Yoshimura-origami based earthworm-like robot with 3-dimensional locomotion capability[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2021, 8: 738214.
- [33] Wu Shuai, Ze Qiji, Dai Jize, et al. Stretchable origami robotic arm with omnidirectional bending and twisting[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(36): e2110023118.
- [34] Li Shuguang, Vogt D M, Rus D, et al. Fluid-driven origami-inspired artificial muscles[J]. *Proceedings of the National academy of Sciences*, 2017, 114(50): 13132-13137.
- [35] Zhang Chao, Zhang Zhuang, Peng Yun, et al. Plug & play origami modules with all-purpose deformation modes[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 4329.
- [36] Zheng Xiaoyu, Lee H, Weisgraber T H, et al. Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials[J]. *Science*, 2014, 344(6190): 1373-1377.
- [37] Cheung K C, Gershenfeld N. Reversibly assembled cellular composite materials[J]. *science*, 2013, 341(6151): 1219-1221.
- [38] Jenett B, Cameron C, Tourlomousis F, et al. Discretely assembled mechanical metamaterials[J]. *Science Advances*, 2020, 6(47): 9943.
- [39] 程基彬,戴宁,郭培,等. 基于力学超材料的柔性机械臂设计技术[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(16):1900-1906.
- Cheng Jibin, Dai Ning, Guo Pei, et al. Design technology of flexible manipulator based on mechanical metamaterials [J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(16):1900-1906. (in Chinese)
- [40] 林冲,王刚,徐丽莎,等. 刚柔耦合机械臂的滑模预测振动控制研究[J]. *噪声与振动控制*, 2022, 42(4):58-63.
- Lin Chong, Wang Gang, Xu Lisha, et al. Research on sliding mode predictive vibration control of rigid-flexible coupling manipulator [J]. *Noise and Vibration Control*, 2022, 42(4):58-63. (in Chinese)
- [41] 高铁红. 仿水龟机器人机构及性能分析研究[D]. 天津:河北工业大学, 2008.
- Gao Tiehong. Research on mechanism and performance analysis of water strider robot [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [42] 姚国林,王合闯,张文,等. 刚柔耦合关节 SCARA 机器人的双柔性动力学模型[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2023(5):58-63.
- Yao Guolin, Wang Hechuang, Zhang Wen, et al. Dual flexibility dynamic model of rigid-flexible joint SCARA robot [J]. *Combined Machine Tool and Automatic Processing Technology*, 2023(5):58-63. (in Chinese)
- [43] 尹秋明,范纪华,谌宏,等. 考虑柔性关节的刚柔耦合机械臂的优化设计[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(2):17-20.
- Yin Qiuming, Fan Jihua, Chen Hong, et al. Considering the flexible joint of the coupled optimization design of mechanical arm [J]. *Combination Machine Tool and Automatic Processing Technology*, 2018 (2) : 17-20. (in Chinese)
- [44] Li Zheng, Du Ruxu. Design and analysis of a bio-inspired wire-driven multi-section flexible robot[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 10(4): 209.
- [45] Li Zheng, Du Ruxu. Design and analysis of a biomimetic wire-driven robot arm[C]. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2011:191-198.
- [46] Ji Hui, Lan Yu, Nie Songlin, et al. Development of an anthropomorphic soft manipulator with rigid-flexible coupling for underwater adaptive grasping[J]. *Soft Robotics*, 2023, 10(6): 1070-1082.
- [47] Hu Yingbai, Li Jian, Chen Yongquan, et al. Design and control of a highly redundant rigid-flexible coupling robot to assist the COVID-19 oropharyngeal-swab sampling[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 7(2): 1856-1863.

- [48] Yang Yang, Chen Yonghua, Wei Ying, et al. Novel design and three-dimensional printing of variable stiffness robotic grippers [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2016, 8(6): 061010.
- [49] Jing Xishuang, Jiang Jiayu, Xie Fubao, et al. Continuum manipulator with rigid-flexible coupling structure[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(4): 11386-11393.
- [50] 邹永涛. 面向具有状态约束的刚性机械臂自适应神经网络控制[D]. 广州:华南理工大学, 2019.
Zou Yongtao. Adaptive neural network control for rigid manipulator with state constraints [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [51] Mariappan M, Ganesan T, Iftikhar M, et al. A design methodology of a flexible robotic arm vision system for OTOROB[C]. 2010 International Conference on Mechanical and Electrical Technology. IEEE, 2010: 161-164.
- [52] Li Guang, Khajepour A. Robust control of a hydraulically driven flexible arm using backstepping technique[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 280(3-5): 759-775.
- [53] Mosadegh B, Polygerinos P, Keplinger C, et al. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(15): 2163-2170.
- [54] Do T N, Tjahjowidodo T, Lau M W S, et al. Real-time enhancement of tracking performances for cable-conduit mechanisms-driven flexible robots[J]. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 2016, 37: 197-207.
- [55] Takashima K, Rossiter J, Mukai T. McKibben artificial muscle using shape-memory polymer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 164(1-2): 116-124.
- [56] Li Xuerong, Bai Shaoping, Chen Weihai, et al. Integrated design and modelling of an electro-magnets driven spherical parallel manipulator[C]. 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2017: 1209-1214.
- [57] Jain S, Chhabra A, Student M T. Control for robotic manipulators with proportional integral derivative & computed torque control[J]. *International Journal of Advances in Engineering Sciences*, 2014, 4(2): 8-11.
- [58] Man Zhihong, Paplinski A P. A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(12): 2464-2469.
- [59] Wang Hanlei. Adaptive control of robot manipulators with uncertain kinematics and dynamics[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 62(2): 948-954.
- [60] Guo Qing, Zhang Yi, Celler B G, et al. Neural adaptive backstepping control of a robotic manipulator with prescribed performance constraint[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2018, 30(12): 3572-3583.
- [61] Tian Lianfang, Collins C. Adaptive neuro-fuzzy control of a flexible manipulator[J]. *Mechatronics*, 2005, 15(10): 1305-1320.
- [62] He Wei, Huang Haifeng, Ge S S. Adaptive neural network control of a robotic manipulator with time-varying output constraints[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(10): 3136-3147.
- [63] 翟士民, 刘荣, 薛彤. 绳驱动连续型机械臂设计[J]. *机械工程与自动化*, 2015(2): 119-121.
Zhai Shimin, Liu Rong, Xue Tong. Design of continuous rope-driven manipulator[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2015(2): 119-121. (in Chinese)
- [64] 高庆吉, 王维娟, 牛国臣, 等. 飞机油箱检查机器人的仿生结构及运动学研究[J]. *航空学报*, 2013, 34(7): 1748-1756.
Gao Qingji, Wang Weijuan, Niu Guochen, et al. Research on bionic structure and kinematics of aircraft fuel tank inspection robot[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(7): 1748-1756. (in Chinese)
- [65] 贾玻. 基于绳驱的超冗余蛇形臂机器人设计及控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Jia Bo. Design and control research of super-redundant snake arm robot based on rope drive [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [66] Zhao Jinbo, Wang Yaoyao, Wang Dan, et al. Practical continuous nonsingular terminal sliding mode control of a cable-driven manipulator developed for aerial robots[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2020, 234(9): 1011-1023.
- [67] 王尧尧, 刘卢芳, 鞠锋, 等. 面向旋翼飞行器的仿生机械臂终端滑模控制[J]. *中南大学学报*, 2022, 53(2): 471-481.
Wang Yaoyao, Liu Lufang, Ju Feng, et al. Biomimetic manipulator terminal sliding mode control for rotorcraft [J]. *Journal of Central South University*, 2022, 53(2): 471-481. (in Chinese)

- [68] 毛志刚. 挠性空间机械臂刚柔耦合动力学与控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Mao Zhigang. Research on rigid-flexible coupling dynamics and control of flexible space manipulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [69] 耿仕能, 王友渔, 陈丽莎, 等. 变刚度连续型机械臂设计与控制[J]. 宇航学报, 2018, 39(12): 1391-1400.
Geng Shineng, Wang Youyu, Chen Lisha, et al. Design and control of continuous manipulator with variable stiffness [J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(12): 1391-1400. (in Chinese)
- [70] 朱晓俊, 王学谦, 马云萱, 等. 绳驱超冗余空间柔性机械臂遥操作系统设计与实验研究[J]. 机器人, 2022, 44(1): 9-18.
Zhu Xiaojun, Wang Xueqian, Ma Yunxuan, et al. Design and experimental study of teleoperation system for rope driven super-redundant space flexible manipulator[J]. Robot, 2022, 44(1): 9-18. (in Chinese)
- [71] 赵智远, 杨晓航, 徐梓淳, 等. 新型 SSRMS 构型可重构空间机械臂的运动学奇异性分析[J]. 机械工程学报, 2023, 28(8): 1-17.
Zhao Zhiyuan, Yang Xiaohang, Xu Zichun, et al. Kinematic singularity analysis of a novel reconfigurable space manipulator with SSRMS configuration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 28(8): 1-17. (in Chinese)

Review on Development and Application of Structure of Manipulator

Wu Qi¹, Wang Zhigang^{1,2}, Yang Yu¹, Lu Yifei¹, Liu Gang¹, Shi Xintong¹, Bao Panpan¹

1. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China

2. Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: With its unique flexibility, powerful perception ability and outstanding adaptability, manipulators are widely used in national defense and military fields, such as space exploration, industrial assembly, battlefield explosion prevention and other dangerous scenarios. The bionic structure design mimics the arrangement of biological microstructures and the emergency regulation mechanism, which can greatly improve the multi-functional adaptability of the manipulator structure in the complex service environment, improve the production efficiency, expand the application field, and promote scientific and technological progress. In this paper, according to the stiffness characteristics, the manipulator can be divided into three categories: rigid manipulator, rigid-flexible coupling manipulator and flexible manipulator. The advantages, disadvantages, research status and applications of the three types of manipulators are described, and the key technologies in the design and manufacture of the manipulators are described from the perspectives of the motion principle and structure design method, the driving method and control strategy of the bionic design of the manipulators. Finally, the research status and development trend of lightweight aerospace manipulator are introduced.

Key Words: manipulator; development status; key technology; bionic structure