DOI: 10.3901/JME.2021.19.001

软体足式机器人驱动、建模与仿真研究综述^{*}

牛丽周 丁亮 高海波 杨怀广 苏杨 李楠
(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150080)

摘要: 软体足式机器人因其优越的移动性能及面对复杂地形的通过能力受到越来越多研究者的关注。由于受到材料性质、驱动方法及制造工艺等多方面的限制,如何实现软体足式机器人的创新结构设计,提升软体机器人的运动速度和负载能力是目前亟待解决的问题之一。综述从仿生结构与驱动方法的角度对目前软体足式机器人的研究发展进行了系统阐述。由于软体机器人多为连续变形结构,加之软材料的物理非线性和软结构变形的几何非线性,力学建模与仿真一直是软体机器人研究领域的瓶颈。梳理了目前软体机器人的主要建模理论,总结了软体机械臂的建模与控制方法,进一步将其拓展到软体足式机器人的系统建模中。介绍了传统商业软件的应用与物理仿真引擎开发的进展,分析了软体机器人虚拟仿真的主要方法,展望了软体足式机器人的应用场景与未来研究方向。

关键词: 软体足式机器人; 驱动; 力学建模; 仿真

中图分类号: TP24

Review of Actuation, Modeling and Simulation in Soft-legged Robot

NIU Lizhou DING Liang GAO Haibo YANG Huaiguang SU Yang LI Nan
(State Key Laboratory of Robotics and Systems, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

Abstract: Soft-legged robots have attracted more and more attention from researchers due to their superior mobility and trafficability through the complex terrain. Because of the limitations of material, actuation and manufacturing technique, how to realize the innovative structural design of the soft-legged robot, to improve the speed and capacity of the soft-legged robot is one of the urgent problems to be solved. Firstly, the review systematically expounds the state of art of soft-legged robots from the perspectives of bionic structure and actuation methods. Since most of the soft robots have continuous deformable structures, coupled with the physical nonlinearity of soft materials and the geometric nonlinearity of soft structure deformation, mechanical modeling and simulation have always been the bottleneck in the field of soft robot research. Combing the main modeling theories of soft robots, summarizing the modeling and control methods of soft manipulators, these theories and methods are further extended to the system modeling of soft-legged robots. The application of conventional commercial software and the development of physical simulation engines are introduced, and the main approaches of virtual simulation of soft robots are analyzed. The application and future research directions of soft-legged robots are prospected.

Key words: soft-legged robot; actuation; mechanical modeling; simulation

0 前言

腿足式机器人由于其在野外环境下具有强大的通过和探索能力,在过去的几十年中受到了大量的

关注和研究,与轮式、履带式等其他移动方式相比,足式步行为非连续支撑,受路况限制小,具有更强的地形适应性、灵活机动性以及越障性能。受动物或昆虫跑、跳等运动的启发,研究者开发出了多种可实现地面机动的仿生足式机器人,如 BigDog(图 1a)^[1], ATHLETE(图 1b)^[2], Atlas^[3]等。BigDog 由液压驱动,能够在雪地、斜坡等复杂地形负重行走并具有侧向抗扰动能力。ATHLETE 专为月球探

^{*} 国家自然科学基金优秀青年科学基金(51822502)、国家自然科学基金重大研究计划(91948202)、国家重点研发计划(2019YFB1309500)和“111”创新引智计划(B07018)资助项目。20201007 收到初稿,20210325 收到修改稿

测运送物资和人员而设计,可以通过抬腿越障。Atlas 可以像人一样跑,跳,甚至可以完成后空翻等高难度动作。

对于月球、火星及其他遥远星球的科学探索,我们不仅需要适应恶劣的空间环境,还要面临更加复杂苛刻的未知地形环境。在地球环境中,如果遇到山洪、地震等自然地质灾害,或者是面临悬崖峭壁、沟谷洞穴、深海暗礁等未知环境时,出于安全因素,用机器人代替人类工作就显得非常必要^[4]。但是随着现代社会对机器人柔顺性和安全性要求的提高,以往普通的刚性机器人的不足日渐凸显,比如结构笨重,安全性低,对复杂环境的适应能力差等^[5-6],并且传统的刚性机器人与自然环境或人类的交互能力有限,已经无法完全满足现代社会的更高需求^[7-8]。而软体机器人能够利用自身柔软易变形,多自由度的优势很好地适应不同的未知复杂环境,承担勘测、侦察、抢险救援等任务^[9-10]。

受海星^[11](图 1c),章鱼^[12](图 1d),尺蠖^[13](图 1e)等软体足式动物的启发,越来越多的学者开始研究以柔软材料为主要结构或驱动的软体足式机器人。软体机器人具有连续变形结构,容易产生柔顺变形并能够从碰撞中得到能量,非常适合应用到与人类交互的康复领域以及复杂环境的探测任务中^[14-15]。例如在海洋能源工业,如果工作在海床上的潮汐涡轮机发生故障,通过人工进行修理和维护将十分困难并且成本高昂^[16]。未来可以利用拥有敏捷触手的仿章鱼软体机器人来使用工具去修复故障,以降低人工成本并保障人类的安全。

方面展开论述,并对未来软体足式机器人的应用与发展趋势进行展望。

1 软体足式机器人驱动研究

材料与驱动是软体机器人研究的基础与核心,目前软体足式机器人采用的驱动方式主要有:流体驱动、化学反应驱动、智能材料驱动、物理场驱动以及机电式驱动或者多种驱动方式的组合应用。

1.1 流体驱动

流体驱动主要包括了气压驱动和液压驱动,其中气压驱动由于其清洁环保、易获得的优势受到广大研究者的青睐^[20]。日本横滨国立大学在 1991 年就研发了一种由纤维增强气压驱动器构成的软体四足机器人,既可用于抓持,也可进行步态行走^[21]。近十年,哈佛大学在流体驱动的软体足式机器人研究方面取得了多项显著成果,2011 年, SHEPHERD 博士等受海星和蠕虫等软体动物的启发研制出一款气压驱动的多步态软体四足机器人^[22],通过爬行和波动步态就可以探测复杂的地形,体现出软体机器人通过简单的驱动即可产生复杂运动的优势。2012 年, MORIN 等通过模仿鱿鱼、乌贼、变色龙等生物的变色保护机制,通过微流体网络使该软体四足机器人(图 2a)具有了变色、变温、发光等多种伪装功能^[23]。2014 年, TOLLEY 博士等通过将电动空气压缩机及控制系统集成在本体上继而研发了一款无线束缚的软体四足机器人(图 2b)^[24],机器人由高弹性硅胶材料构成,可以实现基本的爬行运动,不仅能够承受很大的压力,还可以在极热极寒的恶劣环境中工作,未来非常适合应用于灾难、事故现场的救援工作。同年, KWOK 等研究了由软,硬部件构成,通过内置磁性模块连接的可重构气动软体足式机器人(图 2c)^[25],通过模块化连接,机器人可以根据运动需求改变腿足的数量、材料以及结构尺寸,还可以装配上传感器、相机、软体操作臂等部件,极大的拓展了足式机器人的功能与应用空间。在另一项研究中, STOKES 等将气动软体四足机器人组合到轮式机器人平台上(图 2d)^[26],利用轮式机器人能够在平坦地形上快速移动,扩展了软体足式机器人的工作空间。2017 年, NEMIROSKI 等受蜘蛛等节肢动物肌肉骨骼系统的启发,开发了多种构型的气动软体仿生足式机器人“ArthroBots”(图 2e)^[27]。2018 年, 波士顿大学的 RANZANI 与哈佛大学的 WOOD 博士等合作开发了一种微流体驱动方法,采用多层光刻、精密激光微加工和材料层叠技术相结合的工艺制作了一款仿孔雀蜘蛛

图 1 传统足式机器人与软体足式生物^[17-18]

为进一步扩展机器人的实用功能和应用领域,软体机器人的发展日趋迅速,软体足式机器人也在不断的扩展机器人研究领域的边界^[19]。针对目前软体机器人研究的热点与难点,文章将从软体足式机器人的驱动方式、力学建模与控制、系统仿真三个

的软体机器人(图 2f)验证了该方法的可行性^[28]。2020 年, 哈佛大学的 VASIOS 等为了克服气压驱动需要多条管路分别驱动控制的限制, 通过利用

流体粘性、管路连接及结构优化设计实现了机器人能够在单一压力输入的情况下实现各种复杂的目标响应^[29]。

图 2 国外采用流体驱动软体足式机器人

国外其他高校在流体驱动的软体足式机器人研究方面同样成果丰富, 2017 年, 加州大学圣迭戈分校 TOLLEY 团队通过 3D 打印技术开发了一款具有通过各种不平整非结构化地形功能的气动软体四足机器人^[30], 其移动速度可达 20 mm/s。2019 年, 该团队进一步制作出本体没有电子元件的水下四足步行机器人(图 2g)^[31], 该机器人由软腿和可变形的机体组成, 它携带流速传感器, 可以根据水动力改变可充气机体的突起位置以影响其水动力特性, 实现在水中保持静止或逆水快速前进。2018 年, 伦敦大学的 ALTHOEFE 等研制出由“新型软流体驱动器”驱动的仿章鱼机器人(图 2h)^[32], 机器人本体完全由软材料加工而成, 整体质量大约仅 120 g, 通过气压驱动可以实现在水中游动, 并且能够完成前进、转弯和扭转等动作。同年, 俄勒冈州立大学的 MENGUC 团队以章鱼为仿生对象研制出一种以电流变流体为工作介质, 由软质液压阀控制的全软体六足机器人(图 2i)^[33], 机器人本体由 3D 打印加工而成, 可以实现弯曲、扭转和伸长等运动。2019 年该

团队还通过 3D 打印 PDMS 材料的方法研制出一款如图 2j 所示可以防辐射的气动水下软体六足机器人^[34]。同年, 康奈尔大学的 DUGGAN 制作出无约束的仿尺蠖移动机器人(图 2k), 其本体由三段气动执行器构成, 能实现直行和转弯, 其最大的局限在于运动速度和电池损耗^[35]。2020 年, 北卡州立大学的尹杰等利用弹簧储能以及气压驱动原理, 通过巧妙利用双稳态间的快速跳转研制出了可以像猎豹一样奔腾的快速奔跑软体机器人(图 2l)^[36], 其身长约 7 cm, 质量约 50 g, 速度可达每秒 2.68 倍身长。

国内近些年在流体驱动的软体足式机器人研究方面也有一些突出的研究成果, 2017 年, 西安交通大学的张进华等研制了气动仿尺蠖双足机器人(图 3a)^[37], 上海交通大学的费燕琼等设计了一种可以进行差动运动的仿尺蠖气动机器人(图 3b)^[38]。2018 年, 哈尔滨工业大学(HIT)的郭祥研制了仿昆虫软体六足爬行动物机器人(图 3c)^[39]。2019 年, 燕山大学的姚建涛等基于蠕虫的弯曲运动原理设计一种如图 3d 所示的双腔结构的轮足式仿生蠕动软体

机器人^[40], 通过引入轮足式设计将基体的蠕动运动转变为车轮的旋转运动, 加快了机器人的运动速度, 通过向软体基体双腔充入不同气压能够实现大角度转弯。2020 年, 河南科技大学的陈阳等设计一种基于 Arduino 平台控制的气动四足机器人(图 3e)^[41], 机器人本体采用 16 根气动人工肌肉进行驱动, 单腿采用菱形布局的 4 根气动人工肌肉耦合钢丝支撑模拟生物肌肉驱动。HIT 的樊继壮等提出了一种新型的关节式气动软体致动器并研制出一款软体仿青蛙机器人^[42], 能够有效模拟青蛙的游动姿态。

图 3 国内采用流体驱动软体足式机器人

目前流体驱动技术尤其是气压驱动在软体机器人中的应用相对比较成熟。气动软体机器人具有环保、轻质、结构简单、防辐射、防电磁干扰等多种优势^[43]。如何摆脱气源管路及刚性控制单元的限制并提升足式机器人续航能力是目前的主要挑战。

1.2 化学反应驱动

化学反应驱动指通过燃烧、催化分解等化学反应产生能量驱动机器人运动。最具代表性的科研成果为 2015 年哈佛大学的 NICHOLAS 等研制出的由丁烷和氧气燃烧产生能量驱动的软体跳跃机器人(图 4a)^[44], 以及 2016 年 WEHNER 等研发的世界上首款 3D 打印的全软体机器人“Octobot”(图 4b)^[45]。Octobot 内部通过金属箔催化 H_2O_2 分解产生气体提供动力, 能够实现自主爬行和游动。此前, 电路板、电源等刚性器件一直限制着机器人朝着全软体、无限多自由度的方向发展, 而 Octobot 所需的燃料贮存及驱动等结构均由软材料打印完成, 实现了结构性的突破。早在 2014 年, 哈佛大学的 TOLLEY 博士就研制了一款依靠燃烧产生的爆炸力进行弹跳的三足机器人(图 4c)^[46], 该机器人最高可跳 0.6 m, 是

其自身高度的 7.5 倍。通过燃烧反应驱动软体机器人的概念在 2013 年由 SHEPHERD 博士提出, 并通过三足机器人样机进行了实验验证^[47]。

图 4 化学反应驱动的软体足式机器人

此外, 2007 年, 日本早稻田大学, 山梨大学以及东京大学曾联合研制了一款利用自身化学能, 通过 Belousov-Zhabotinsky 化学振荡反应, 可以自行走的软体双足凝胶机器人^[48], 该驱动方式为仿生机器人的设计提供了一种新框架。化学反应尤其是燃烧可以产生较大的瞬时能量, 并且利用化学反应驱动易于实现机器人的无约束移动, 但是机器人的运动可控性以及动作可重复性仍存在一定局限。

1.3 电致变形的智能材料驱动

电致变形既指材料在电场力的作用下直接产生变形, 也包括通过电流的热效应产生热量使材料发生形变。目前应用于软体机器人领域的智能材料主要包括: 介电弹性体(Dielectric elastomer, DE)^[10]、离子交换聚合物金属复合材料(Ion-exchange polymer metal composites, IPMC)^[49]、形状记忆合金(Shaped memorial alloy, SMA)^[50]、液晶弹性体(Liquid crystal elastomer, LCE)^[51]以及聚合物捻卷型人工肌肉, 压电聚合物, 响应水凝胶^[52]等。

(1) 介电弹性体。

介电弹性体(DE)在电场力的作用下会产生形变, 导致厚度缩小, 面积扩大, 具有能量密度高、机电耦合效率高等特点。2004 年, 加州大学洛杉矶分校的研究人员利用 DE 驱动材料研制了六足软体机器人“MERbot”(图 5a)^[53], 机器人高 10 cm, 重 292 g, 单足具有两个方向的自由度, 其速度最高能够达到 13.6 mm/s。但是该机器人只能进行简单的行走, 缺乏转向能力。2017 年, 韩国成均馆大学的 NGUYEN 等人采用 5 自由度的介电弹性体执行器(DEAs)作为驱动研发了一款图 5b 所示的仿昆虫六足机器人“S-Hex II”^[54], 该机器人在 7 Hz 的驱动频率下可以实现大约每分钟 21 倍体长的行走速度。此外, 该机器人还可以实现侧向行走和旋转身体, 增强了该机器人在实际应用中的潜力。在此之前,

该团队在 2015 年还曾设计出 3 自由度 DEAs 驱动的六足机器人^[55-56], 在刚性平面运动速度可达 3 cm/s。

2018 年, 新加坡国立大学的朱建等制作了一款如图 5c 所示的 DEA 驱动双足仿生尺蠖^[13]。同年, 上海交通大学的谷国迎团队以 DE 为驱动研制了一款软体爬壁机器人(图 5d)^[57], 通过模拟尺蠖的运动, 能够以 0.75 倍身长每秒的速度实现多模态运动, 包括垂直攀爬, 爬行, 转弯以及多个单体组合并联运动等, 并且具有一定的负载和通过能力, 类似的, 浙江大学的李铁风在 2019 年研制出一款 DEA 驱动的仿尺蠖软体三足爬行机器人(图 5e)^[58]。

2019 年, 瑞士洛桑联邦理工学院的研究人员使用 DEAs 制作了一款图 5f 所示的仿生昆虫机器人^[59], 传统 DEAs 驱动通常需要几千伏特才能工作, 研究人员采用创新堆叠技术使机器人驱动电压降低到了 450 V, 该技术为开发无约束自主移动机器人奠定了基础, 有助于实现软体机器人硬件系统的高度集成。

图 5 介电弹性体驱动软体足式机器人

(2) 离子型电活性聚合物。

IPMC 是一种最为常见的离子型电活性聚合物(Ionic electroactive polymer, IEAP), IPMC 具有驱动电压低、响应速度快、低功耗、密度小、柔韧性好等优点^[6], 早在 2003 年韩国科学技术学院的 KIM 等就构造了一个由 IPMC 执行器驱动的纤毛运动型

八足微型机器人^[60], 机器人全长 6.5 cm, 运动速度可达 17 mm/min。美国德克萨斯 A&M 大学在 2013 年研发了一款 IPMC 驱动的六足行走机器人^[49], 如图 6a 所示, 这种驱动类型的机器人输出位移大、运动比较灵活, 水下步行速度可达 0.5 mm/s, 但是其主要缺点为出力较小, 响应频率较低等。传统 IPMC 多应用于水下驱动, 在空气中使用寿命有限, 2015 年, 塔尔图大学的研究人员以 IEAP 为驱动研制了世界上首款自带电池供能的仿尺蠖软体机器人, 其自重仅 830 mg, 能够在空气中的稳定运行^[61]。

(3) 液晶弹性体。

液晶弹性体(LCE)是通过对液晶高分子交联而形成的一种热驱动软质材料, 具有变形尺度大, 可恢复, 可加工及可编程性能好等优势^[62]。2019 年, 加州大学圣地亚哥分校(UCSD)蔡盛强团队用 LCE 驱动器制造了一款无系留约束的软体机器人(图 6b)^[51], 该机器人把锂电池和控制器都集成在了身体上, 使用 4 个 LCE 管状驱动器作为支撑腿, 让其完全摆脱了固定电源或者气泵的束缚。

(4) 聚合物捻卷型人工肌肉。

聚合物捻卷型人工肌肉(Twisted and coiled polymer fiber, TCPF)具有成本低, 负载大, 低迟滞, 寿命长等优点^[63]。TCPF 的制作过程一般是由尼龙、聚乙烯等高分子聚合物纤维进行扭转, 使其分子链的取向方向与纤维轴线方向产生一定的夹角, 再将高度扭转的纤维卷绕成螺旋形状并热处理使之定型, 经过这样的处理后聚合物便具有在温度场的作用下长度变化的驱动能力。2019 年, HIT 刘英想团队的左伟东以尼龙和电热丝制成的人工肌肉为驱动设计并制作出了一款的仿生软体六足机器人(图 6c)^[64], 机器人主要结构由 3D 打印和硅胶浇注而成, 可实现 360° 转向及水下运动, 负载能力约 200 g。同年, 该团队的唐心田等研制了一款利用单根聚合物螺旋卷绕型人工肌肉(Twisted and coiled actuator, TCA)驱动的软体爬行机器人^[65], 其结构简单, 质量仅 9 g, 爬行速度可达 1.2 mm/s。

(5) 聚偏氟乙烯压电聚合物。

PVDF 是一种广泛应用于微机电产品的压电材料, 具有柔软灵活、重量轻的优点。2018 年, 清华大学深圳研究院的 WU 等采用预弯曲的 PVDF/PI 的压电结构研制了一款仿生尺蠖的驱动器^[66], 2019 年, 该研究者继而开发了一款昆虫大小的快速移动机器人(图 6d)^[67], 其大小只有 3 cm×1.5 cm, 利用交流电压使 PVDF 薄膜产生伸展和收缩。机器人结构简单, 抗压能力强(可以承受自重 900 倍的负荷而不

受损), 移动速度可达每秒 20 倍体长。同年, 韩国科学技术研究院提出了一种具有双压电晶片(PVDF)主体和预弯曲压电腿的软腿移动机器人^[68]。机器人长 50 mm, 宽 10 mm, 腿长 20 mm, 移动速度可达每秒 0.7 倍体长。

图 6 智能材料驱动的软件足式机器人

(6) 形状记忆合金。

SMA 是一种在加热后能完全消除其在较低的温度下发生的变形, 恢复其变形前原始形状的合金材料, 易于实现驱动器微型化、自动化, 得到了广泛的应用^[50]。2011 年塔夫茨大学研制的 SMA 驱动的仿毛毛虫软体机器人“GoQBot”^[69], 可以实现仿生爬行和向前滚动。2013 年, 中国科技大学的 MAO 等人以 SMA 弹簧为驱动制作了一个软体仿海星机器人(图 7a)^[70], 2016 年该团队以 SMA 金属丝制成的智能模块结构为驱动研制的海星机器人(图 7b)^[71], 可模拟海星的运动并且速度可达 70 mm/s。2020 年, 卡耐基梅隆大学(CMU)的 HUANG 等以 SMA 为驱动制作了一款四足机器人“SEAQ”(图 7c)^[72], 该机器人集成了柔性线路板和弹性肢体, 实现了灵活机动, 重量 25 g, 爬行速度可达每秒 0.56 倍体长(3.2 cm/s)。同年, PATTERSON 等通过仿生海蛇尾(一种类似于海星的海洋无脊椎动物)的结构和行为, 开发了不受束缚的软体机器人“PATRICK”(图 7d)^[73], 它利用 20 根 SMA 金属线驱动的五条腿在水下爬行, 并且通过 ROS 通信与视觉反馈实现了机器人闭环运动控制。SMA 具有超弹性、耐腐蚀、驱动力大等优点, 目前其主要限制在于变形恢复缓慢, 需要开发更高效的散热与控温技术。

图 7 SMA 驱动的软件足式机器人

(7) 响应水凝胶。

水凝胶是由亲水性的功能高分子通过化学键或物理作用交联形成三维网络结构。响应水凝胶指能够对外部环境的变化产生响应性变化的水凝胶。一部分水凝胶能因外界 pH 值、温度、光电信号、特殊化学分子等的微小变化, 而产生相应的物理结构或化学结构的变化^[5]。早在 2002 年, 日本东京大学就研制出了可在电场作用下翻转运动的海星状凝胶机器人^[74]。2014 年, 北卡罗来纳州立大学的 MORALES 等研制了一款通过电场刺激和控制的双足水凝胶机器人^[52], 为软体机器人的传感与运输应用提供了一种设计策略和驱动机制。

1.4 非接触式物理场驱动

非接触物理场驱动指通过将外界磁场, 光, 或湿度变化等的能量变化转化为机器人机械能的一种驱动方式, 采用这种驱动的一般为没有线缆束缚的微型机器人。

(1) 磁驱动。

2016 年, 韩国全南国立大学的 LI 等采用磁驱动方法实现了水凝胶软体微型机器人靶向药物运输^[75]。2018 年, 德国马普智能系统研究所研制了一种由硅胶与钕铁硼颗粒制成的微型磁控软体机器人(图 8a)^[76], 其在磁场控制下可以实现空气环境中的滚动、步行、跳跃以及在水下环境中的仿生游动等 7 种运动姿态。同年香港城市大学的 LU 等研制了一款如图 8b 所示的磁驱动多足机器人^[77], 可以实现爬行, 运输以及越障等多种功能。

2018 年, 麻省理工学院(MIT)的赵选贺团队首次提出快速 3D 打印铁磁软材料和软体机器人技术^[78], 利用这种技术打印出的六足软体机器人(图 8c), 通过施加不同的磁场, 可以爬行、滚动、

输送药物, 甚至捕获并释放降落的物体。2019 年, 该团队又首创了磁控软体导丝机器人^[79], 未来有望帮助医生在远程控制下, 针对复杂血管网络进行快速导航和微创手术。同年, 瑞士联邦理工学院的 CUI 等通过对连接板上的单畴纳米磁体阵列的磁性配置进行编程, 制定了一种将多个变形指令编码到微型机器人中的策略, 对纳米磁体施加特殊的磁场序列后, 可以实现微型机器人的形状变化^[80], 这一技术为实现磁性软体机器人在各种长度尺度上的生物医学应用奠定了基础^[81]。

图 8 磁场驱动软体足式机器人

2020 年, 中国科学院深圳先进技术研究院徐天添团队的苏梦在视觉反馈磁控软体机器人研究基础上设计了一种仿生马步四足机器人^[82], 在磁场驱动下可实现沿着目标轨迹的运动。

(2) 湿度变化驱动。

2018 年韩国首尔大学的研究人员受植物种子萌发过程的启发, 制作了一种能在环境湿度变化时以极大的速度和幅度弯曲的双层执行机构, 并在此基础上研制出靠环境湿度变化驱动, 不需要人工能源输入的微型移动机器人“Hygrobots”^[83]。

(3) 光驱动。

光驱动作为一种特殊的驱动方式同时涉及了智能材料的研制与应用, 2018 年, 芬兰坦佩雷理工大学的 ZENG 等应用单层 LCE 薄膜制作了一款受毛毛虫启发的光驱动微型机器人(图 9a)^[84]。2019 年, UCSD 的蔡盛强团队应用液晶弹性体-碳纳米管复

合材料研制了光驱动的仿尺蠖机器人(图 9b)^[85], 可以爬, 跳及通过狭窄通道。

2020 年, 埃因霍芬理工大学的 PILZ 应用液晶弹性聚合物制作出了光驱动软体四足运输机器人(图 9c)^[86], 它具有控制多方向移动的能力, 能够拾取、运输和投递货物。同年, 武汉大学薛龙建课题组研制出一种可精准控制方向和速度的光控仿生软体足式机器人“Geca-Robot”^[87], 间隔排列的透明 PDMS 条带和石墨烯/PDMS 复合材料条带构成其驱动肌肉, 足部设计中融合了壁虎脚掌上独特的刚毛结构, 增强了机器人的表面适应性, 不管是在粗糙或是光滑平面上, 均能获得足够的抓地力而不会打滑。仿生足部设计和模仿尺蠖的运动步态, 可以使它在高达 30° 的光滑斜坡表面稳定停泊而不发生滑移。新加坡国立大学的研究人员通过仿生自然界生物对外界环境的感知能力研制出多种光驱动的薄膜机器人(Somatosensory light-driven robots, SLiRs)^[88], 基于智能感光材料能够实现综合感知和运动, 例如应用 SLiR 薄膜制作的蜈蚣机器人(图 9d), 能像蜈蚣一样蜷曲爬行。

图 9 光驱动的软体足式机器人

1.5 机电式与多种驱动方式组合

这里定义的机电式驱动本质上是通过电机及机械结构驱动软体机器人运动的一种驱动方式, 包括电机直接驱动, 或者通过电机卷绕绳索驱动以及电机驱动连杆机构进行驱动等。

在欧洲 ICT-FET OCTOPUS 项目支持下, 意大利圣安娜高等学校(SSSUP)等七所科研单位对章鱼仿生进行了系统性的研究, 并开发出了多款仿生章鱼软体足式机器人及软体机械臂样机^[89]。其中主要应用的驱动方式有电机驱动, 线驱动, SMA 驱动以

及这几种驱动方式的组合。2011 年, CALISTI 等首先采用线驱动与曲柄摆杆机构驱动组合的单足仿生章鱼平台进行了结构设计验证^[90]。次年, 该团队采用曲柄连杆驱动的原理研制出了六足仿章鱼机器人实验平台(图 10a)^[91-92], 进一步验证了这种驱动方式的仿生效果。2013 年, 希腊 FORTH 计算机科学研究所的 SFAKIOTAKIS 等根据章鱼游动的和划桨前行的原理研制出图 10b 所示由 PU 材料制成的仿生章鱼机器人, 每条章鱼臂均由电机直接驱动^[93-94]。同年, SSSUP 的 ARIENTI 等研制出一款既可以水下行走也可以喷水游动前行的软体仿章鱼四足机器人“PoseiDRONE”(图 10c)^[95], 其仿头足类动物的喷水装置可以利用涡流喷射前进^[96], 利用曲柄摇杆机构带动软体臂摆动可以做出爬行、游动等动作, 软体臂通过柔性线缆驱动还有抓持工具的功能。2015 年, CIANCHETTI 等采用 SMA 弹簧、线驱动和曲柄摆杆机构驱动相组合研发了一种带有操作臂的仿生章鱼机器人“OCTOPUS”(图 10d)^[97], 它能够像生物一样在水中行走, 还能抓取各种形状和大小的物体。但是其主要驱动部件如曲柄滑块等结构仍然是刚性的, 操作臂使用 SMA 驱动仍存在响应较快恢复较慢等问题。同年, CACUCCIOLO 等人采用舵机和软体弯曲流体制动器制作了可以适应非平整地形的四足机器人“FASTT”^[98]。此外, SSSUP 的 SADEGHI 等人在 2016 年 RobotSoft 挑战赛中设计了一种轮腿复合式的移动机器人^[99], 机器人拥有一个可重构的本体和两个通过线驱动的软腿增强的轮足以及一个多功能的尾巴, 可以爬楼梯, 通过沙地, 具有较强的通过性能。

图 10 欧盟仿章鱼软体足式机器人

近几年仍有许多学者采用机电驱动的方式研究制作软体足式机器人, 例如 2016 年, 加州大学伯克

利分校的 JAYARAM 等通过研究蟑螂的运动及伸缩抗压原理, 设计研制了一款可压缩连杆机构驱动的六足机器人“CRAM”(图 11a)^[100], 其可压缩比例能够达到 54%。2017 年, 哈佛大学的 MALLEY 等采用线驱动制作了一种可实现垂直翻转运动的双足机器人“Flippy”(图 11b)^[101]。2019 年, 塔夫茨大学的 TRIMMER 等研制了具有三对爪足的线驱动仿毛毛虫机器人, 可以在弯曲的树枝上爬行^[102]。2020 年, 土耳其比尔肯特大学的 KALIN 等研制了一款电机驱动的软体四足机器人“SQud”(图 11c)^[103], 除电控部分, 机器人的躯体和 C 形足均由软材料制成, 越障高度可达自身高度的 1.44 倍。

图 11 机电式或多种驱动方式组合的软体足式机器人

2018 年, 香港大学陈永华团队李云泉等提出了一种基于预先充气储能方法(PCP)的软弯曲执行器, 它由预先充能的空气压力驱动, 通过拉伸或释放线缆来调节软执行器中的气压, 进一步改变执行器的弯曲角度。由于该执行器不需要外部气体供应, 摆脱了复杂气动控制系统, 为无线缆束缚机器人的开发奠定了基础, 如图 11d 所示为该团队基于此驱动技术制作的软体四足机器人^[104]。2019 年, 该团队采用该技术制作了一款仿生机器狗并分析了其划动步态的运动学与水动力学问题^[105]。2020 年, 成都理工大学与香港大学合作进一步改进了预充气结构, 采用双腔室预充气方法(DCPCP)继而研制出带有仿生脊柱躯干的软体四足机器人(图 11e)^[106], 机

器人躯干模拟动物脊椎设计, 运动更加灵活, 整机具有不受线缆约束、能效高及稳定性好等特点, 未来更适用于探索救援, 陪伴老人和儿童等多种应用场合。

2 力学建模与控制

力学模型是机器人结构优化、轨迹控制、仿真的理论基础, 软体机器人的研究涉及机电、控制、材料、生物、化学等多学科的交叉融合, 软材料赋予软体机器人诸多优势的同时, 材料非线性和结构非线性也给软体机器人建模和控制带来了诸多困难与挑战。近些年对软体机器人的建模大多集中在软体机械臂或单一驱动模块方面, 对于系统性的软体足式机器人的建模还比较少, 下文将从软体臂的建模方法中扩展到足式机器人的建模研究中。

2.1 半经验建模方法

早期一些学者通过实验的方法建立了章鱼臂或软体生物的半经验模型, 例如圣安娜高等学校的 MAZALAI 等通过解剖分析章鱼臂的肌肉结构建立“应力-应变模型”^[107]。以色列希伯来大学的 MITELMAN 等采用三维视频重建的方法分析章鱼触手的运动, 绘制出了章鱼臂的运动轨迹^[108]。塔夫茨大学的 SAUNDERS 等通过实验与理论分析建立了毛毛虫的“二维可伸缩铰链模型”^[109], 类似的, 近期以色列理工学院的 GAMUS 等人为了理解仿尺蠖双足机器人的运动原理, 提出用一个具有弹性关节的铰接式机器人来模拟软体机器人的足部运动, 并建立了一种新的混合准静态运动分析方法, 该方法用于求解具有粘滑接触过渡的超静定系统^[110]。

2.2 分段建模方法

分段建模方法主要包括分段常曲率方法(Piecewise constant curvature, PCC)和分段多刚体法。PCC 法在连续型机械臂及软体弯曲模块建模中十分常用^[111], 2013 年, 上海交通大学王贺升团队的俞晓瑾基于 PCC 方法和拉格朗日力学建立了仿象鼻柔性机械臂的运动学和动力学模型, 并基于与深度无关的图像雅可比矩阵, 设计了基于运动学和动力学的视觉伺服控制器^[112]。2015 年该团队的王超应用 Cosserat 梁理论改进了 PCC 方法, 结合凯恩法重新建立了软体臂的动力学模型, 并提出了使用光纤布拉格光栅 FBG 传感器检测软体机械臂变形曲率的方法^[113]。近几年该课题组还进行了基于视觉伺服的水下软体臂在线校正控制方法的研究^[114]。尽

管 PCC 法在空间建模存在一些局限, 目前仍有许多学者在应用并改进这种建模方法^[115-116]。

将连续的柔性体简化假设为分段的刚体机构也是一种有效的软体臂建模方法, 2005 年, 希伯来大学的 YEKUTIELI 等就提出了“二维多段章鱼臂模型”^[117], 在该模型中章鱼臂被模拟成由一系列质点和理想弹簧构成的矩形阵列。2011 年, 意大利理工学院(IIT)的博士后研究员康荣杰根据章鱼臂的生物结构建立了一种三维多段动力学模型^[118], 该模型中将章鱼臂分段后的肌肉组织等效成活塞-缸体系统构成的并联机构, 每一段上下相互耦合, 这样多段连接在一起就构成单臂模型, 进一步就可采用 D-H 法和 Newton-Euler 法建立运动学和动力学模型。2012 年, 在单臂模型基础之上, 该学者通过模拟章鱼的控制策略, 提出了模拟章鱼中枢神经系统(Central nervous system, CNS)和周围神经系统(Peripheral nervous system, PNS)^[119]的分层开环控制方法, 并在 MATLAB / Simulink 中实现了八足仿章鱼连续体结构的运动可视化仿真^[120]。2013 年, IIT 的郑天江研制了一款气动肌肉驱动的四足仿章鱼步行机器人^[121], 基于其先前建立的 3 维分段软体臂力学模型^[122], 通过机体质点简化假设和牛顿平衡力学方法建立了整机的运动学和动力学模型。

2.3 基于 Cosserat 理论的建模方法

Cosserat 梁是一种用微小固体堆积表示连续型软体机器人无限自由度的理论模型。2008 年, 宾夕法尼亚州立大学的 TRIVEDI 首先将几何精确的 Cosserat 杆理论应用到了气动肌肉驱动的软体臂“OctArm V”建模中, 并获得了 10 倍于常曲率模型的精度^[123]。2010 年, 范德堡大学的 RUCKER 将 Cosserat 理论应用于线驱动管状连续型机器人的建模中^[124]。2012 年, 圣安娜高等学校的 RENDA 博士基于 Cosserat 梁理论建立了线驱动软体仿章鱼机械臂的运动学和稳态静力学模型^[125], 在此模型基础之上, 为了实现对非常曲率变形软体臂的逆运动学控制, GIORELLI 分别采用监督学习的前馈神经网络(FNN)和 Jacobian 方法获得了软体臂末端位置与输入力之间的关系, 结果对比表明 FNN 方法更快更准确^[126-127]。2014 年, RENDA 通过运用几何旋量表示方法结合 Kelvin-Voight 黏弹性模型, 进一步建立了线驱动软体臂的连续型动力学模型^[128]。2016 年, 该学者又提出一种基于离散化 Cosserat 理论的分段常应变方法(Piecewise constant strain, PCS)并编写了新的动力学算法, 在线驱动软体臂形变计算中获得了更高的计算精度和效率^[129], 同时该方法还应

用到了四足机器人 FASTT^[98] 软体腿足的动力学建模与仿真中^[130]。2018 年,以 Cosserat 理论为基础,RENDA 通过运用星形结构的几何动力学方法,建立了 PoseiDRONE^[95] 的多软体系统动力学模型,并将其扩展应用到了四足仿章鱼结构“Quadropus”和仿精子结构“Monopus”的动力学仿真中^[16]。此前 CALISTI 采用弹簧阻尼系统等效的办法将软体臂进行简化也曾建立了 PoseiDRONE 的动力学模型^[131],并重点研究了软体足的步行模式与划水模式对机体运动的影响。

2.4 有限元建模方法

应用解析力学方法研究软体机器人的变形规律仍存在诸多局限,有限元(Finite element, FE)模型可以容易地适应不同的几何形状,并且可以直观地得到组件的变形,因此有限元方法经常被应用于软体大变形结构的建模和仿真中。例如 2011 年, VAVOURAKIS 等在 OCTOPUS 项目中提出了一种模拟生物肌肉组织的隐式非线性有限元数值方法^[132-133],该方法已用于鱿鱼、章鱼手臂等肌肉组织的运动仿真及 SMA 驱动的仿章鱼机械臂样机开环控制中。IIT 的 GODAGE 基于形状函数法建立了气动肌肉型连续机械臂的力学模型^[134],进一步的将该柔性臂作为机器人的移动臂制作了一款四足移动机器人并通过拉格朗日法建立了机器人的动力学模型实现了运动学和动力学数值仿真^[135]。近几年,北京理工大学的胡海岩等^[136-137]在多体系统动力学框架下利用绝对节点坐标公式(ANCF)的有限元方法,针对几何非线性、大变形的软体结构或由超弹性材料或弹塑性材料制成的物理非线性软体结构的动力学模型和数值仿真做了大量的研究工作,并将其应用到了空间可展开天线,航天器太阳翼以及软体四足机器人^[22]的动态仿真中。上海交通大学的费燕琼^[138]和燕山大学的姚建涛等^[40]基于超弹性材料的 Yeoh 本构模型分析了气压与软体仿生足式机器人变形单元的力学关系。

法国国家信息与自动化研究所 DURIEZ 团队的 ZHANG 采用有限元方法对线驱动并联软体机器人的变形进行建模,利用视觉跟踪技术实现了软体机器人的反馈控制^[139]与外力作用感知^[140]。BIEZE 采用有限元与拉格朗日乘法建立了软体连续操作臂的正逆运动学模型^[141]。THIEFFRY^[142], GOURY^[143]等采用模型降阶(Model order reduction, MOR)方法实现了软体机器人的快速建模、控制与仿真,并通过线驱动软体臂和气动软体四足机器人进行了仿真验证。虽然有限元方法适用范围广泛,但是该方法

不可能提供一个完全精确的模型,有限元模型计算量较大并且基于有限元模型的控制难以适用于真实的机器人系统,针对该问题,ZHENG 基于牛顿第二定律,运用简化的具有不确定性的线性标称模型来描述三足型软体机器人的动力学,建立了简化模型与有限元模型的联系^[144]。此外,该学者将机器学习方法引入软体机器人的控制,通过人工神经网络学习软体机器人的输入输出模型,在近似模型基础上实现了软体并联机器人的闭环鲁棒控制^[145]。

3 软体足式机器人仿真方法研究

在传统刚性机器人技术领域,有多种有效的仿真软件可供使用,而可用于分析、开发、测试、优化软体机器人的通用虚拟环境尚待进一步开发^[146]。仿真可以为系统的非线性响应提供更真实的描述,其中有限元模型还可以将应力和应变可视化,从而更好地理解局部应变对系统性能的影响^[147]。为了试验而设计和制造软体机器人需要大量的耗费大量的时间和资源。为了解决这些问题,开发和应用高效、高保真的物理仿真工具非常有价值^[148]。

3.1 基于商业软件的软体机器人仿真

软体机器人的主要结构由软材料组成,不同于传统连杆铰接式的刚性结构,软体机器人的仿真研究充满了未知与挑战。目前软体机器人的仿真手段以有限元方法为主,主要采用 ANSYS^[30, 149-150]、ABAQUS^[13, 64, 151]等传统商业软件。ANSYS 是一款融和结构、流场、声场、磁场等多物理场分析于一体的通用型有限元软件,该软件在航空航天、机械电子、生物医学、能源化工等多领域有着极为广泛的应用,机器人领域研究者通常使用该软件对机器人进行结构分析和环境仿真。ABAQUS 是一套求解非线性问题能力非常强的工程有限元软件,既可以解决相对简单的线性问题,也可以处理诸多非线性问题。软件包括丰富的材料模型库,可以模拟多种工程材料的性能,其中就包括硅胶等软体超弹性材料。此外 COMSOL^[68, 152-153]和 RecurDyn^[113, 154]在软体机器人仿真方面也有应用,其中 COMSOL 是经典的多物理场仿真软件,RecurDyn 应用递归求解算法,非常适合求解规模较大的多体系统动力学问题。

3.2 基于可编程框架的软体机器人仿真

虽然传统有限元商业软件可以解决一些简单结构及模块的仿真,未来仍然需要专业的物理平台来实现复杂结构软体足式机器人的运动学及动力学仿

真,这也驱动着大量的学者不断进行研究和开发。康奈尔大学的 HILLER 与 LIPSON 等人开发了一款基于 C++ 的开源模拟引擎 VoxCAD,该软件以一种非常高效的力学计算方法对软体物质的变形进行建模^[148, 155],如图 12a 所示的模型仿真中,将体素按照仿真对象的形状以单元堆积的方式进行建模,每个体素单元与周围的单元模块都有确定的力学关系进而产生变形与驱动。其局限在于如果没有足够数量的体素单元就无法近似某些几何形状,体素过多也会导致计算时间的增加。类似于 VoxCAD 的单元堆积,瑞士洛桑联邦理工学院的 GERMANN 等人开发了一种基于 Box2D 物理引擎的多细胞机器人仿真工具“Soft Cell Simulator, SCS”^[156],该模拟器有助于设计出新颖的软体多细胞机器人。

早在 2000 年,波士顿 CIMIT 实验室就首次提出了创建基于物理的仿真开源平台的想法。2005 年,一款用于生物组织或软体机器人建模、仿真的结构框架(Simulation open framework architecture, SOFA)首次被提出^[157],经过十余年的发展,DURIEZ 团队专门为该其开发了“SOFT ROBOTS”实时仿真插件,不仅可以实现软体机器人的模型仿真,同时融合了机器人与环境的相互作用,如图 12b 所示为软体足式机器人在 SOFA 中仿真效果与实物的对比^[158]。该框架基于 C++ 编程实现,在医学和软体机器人仿真中应用广泛,其主要局限在于仍是准静态条件下的仿真并且安装调试过程复杂。2018 年,中科院深圳先进技术研究院的陈君提出了一种基于耦合模型的刚软混杂机器人仿真方法,并在机器人操作系统 ROS 中通过互相映射 GAZEBO 和 SOFA 两个仿真平台的底层物理模型,在保持原有结构力学仿真特性的基础上实现了两个仿真平台的耦合^[159]。

随着人工智能的迅速发展,计算机图形学在机器人开发中的作用越来越显著。基于力学模型与几何算法的物理动画对软体机器人的仿真或者研究软体动物的运动机理具有极高的参考价值。2017 年,CMU 的 BERN 等人提出了一种制作毛绒玩具动画的计算方法,如图 12c 所示,通过模拟生物的肌肉平衡结构设计了一种绞车-肌腱驱动机制,并通过有限元方法实现了物理虚拟仿真^[160]。2018 年,代尔夫特理工大学的 FANG 等基于几何学方法实现了多种材料构成的软体机器人直接仿真^[161],并将其应用到了软体臂及仿尺蠖机器人的运动学计算中^[162]。

2018 年,麻省理工学院的胡渊鸣基于移动最小二乘物质点法(Moving least squares material point method, MLS-MPM)^[163]和计算机图形库“Taichi”开

发了一款可应用于软体机器人的改进,控制与联合设计的实时可微物理仿真器“ChainQueen”^[164],图 12d 所示为该框架下四足模型的运动仿真。尽管软体机器人仿真仍然存在诸多困难,未来软体与刚体的耦合仿真也将会是一重要研究方向。

2019 年,韩国首尔国立大学的研究人员基于有限元方法和深度强化学习算法开发了一套用于水下软体动物设计和控制的仿真框架“SoftCon”,可以实现软体机器人的实时仿真与交互控制^[165]。如图 12e 所示为章鱼逃出瓶子的仿真效果。软体机器人多为仿生机器人,通过仿真实理解动物的运动有助于机器人结构驱动设计,反之,通过对机器人的运动仿真更有助于探索发现自然界中动物的运动规律。

2020 年,加州大学洛杉矶分校和 CMU 的研究人员首次采用基于离散微分几何(Discrete differential geometry, DDG)计算机图形技术开发了一种物理引擎来模拟软体机器人的运动^[166]。该引擎工具能够集成驱动,摩擦,接触以及弹性/非弹性物体碰撞,从而预测快速移动的高度变形软机器人的行为。如图 12f 所示为研究人员使用 SMA 构建的七角星滚动机器人的实验和仿真对比。应用仿真技术预测机器人在外星球表面或者水下复杂环境的运动,对于检测机器人的运动与控制性能,优化机器人的结构设计具有重要的工程应用价值。

图 12 不同仿真框架下的可视化仿真效果

4 软体足式机器人的应用

软体机器人在工业生产、环境勘测、医疗康复、外科诊断、军事侦察等领域有着广阔的应用前景。虽然目前软体足式机器人的研究大多处于材料、结构与驱动的突破创新阶段,将软体足式机器人真正应用到人类社会的生产及生活仍有较大差距,但是在可预见的未来,软体足式机器人在深空探测、抢险救援、人机交互与微观操作等领域具有广泛的应用价值。软体足式机器人的应用场景与相应的关键技术特点如表 1 所示。

表 1 软体足式机器人的应用范围与关键技术特点

应用范围	关键技术特点	参考文献
深空探测与在轨服务	抗极端环境,高可靠性,质量轻,耐疲劳	[22, 167-169]
环境勘测与抢险救援	灵活多自由度,柔顺易变形,适应性强,便于越障与伪装	[5, 23-24, 57, 95, 97]
医疗康复与人机交互	安全柔顺,生物相容,健康环保,可变刚度	[4, 14, 19, 104, 106]
微观操作与微创医疗	安全无毒,可降解,高度集成与精准控制	[15, 75-77, 86, 170]

4.1 深空探测与在轨服务

对于火星、月球以及更遥远行星的探测,机器人需要克服失重或微重力,太空辐照,极端温差等诸多恶劣因素,同时还要面对几乎完全未知的地形环境。传统的轮式或刚性足式机器人不能完全满足日趋复杂的探测任务,深空探测需要重量更轻,结构更灵活的软体足式机器人^[22]的参与。应用软体机器人替代工作还可以有效降低航天员出舱作业的风险,我国空间站已经入轨开展空间任务,未来软体足式机器人可以像传统机械臂一样参与到航天器在轨服务中,例如检测太阳翼,维护航天器天线等^[167-168]。航天器造价高昂且难以回收,软体足式机器人可以装配软体抓手^[25],或者将自身改造为软体抓捕机构^[26],执行航天器回收、空间碎片清理、或卫星抓取任务^[169]。

4.2 环境勘测与抢险救援

人工进行水下探险、海底作业或是核泄露事故场景下的抢险救援成本高昂并且危险度极高,采用机器人替代人类工作就显得十分必要。大多数软材料具有重量轻与防辐射的特点,软体足式机器人同时具有运动灵活,抗寒抗压能力强,可变形程度高等优势^[24],开发类似章鱼的软体足式机器人,既可以灵活移动,同时具备柔顺的操作臂可以应用工具执行水下探测、设备维修或救援任务^[97]。拥有变色伪装、变温功能的软体足式机器人^[23]在军事侦察中

具有独特的隐蔽优势,在事故环境中还可以携带相机和传感器进行狭窄空间下的环境与生命感知^[57]。

4.3 医疗康复与人机交互

目前已有商业化的软体抓手应用于工业生产,协助病人康复的软体穿戴设备以及用于外科手术或医疗诊断的软体机械臂也正在逐步走向实用化^[4, 10]。软体足式机器人具有天然独特的柔顺性与安全性优势,与传统医疗康复类机器人研发相结合,开发具有移动和交互操作能力的软体足式机器人可以实现照顾老人,辅助残障人员,陪伴儿童玩耍等功能^[104],还可以应用到餐饮、商场等服务行业中。未来人机智能融合离不开软体足式机器人的参与。

4.4 微观操作与微创医疗

无系留微型机器人是未来最具发展前景的先进机器人之一,这类机器人在靶向药物^[75]、细胞^[170]和微操作器的运输传递,微小零件装配等方面具有潜在的应用价值^[15],微小型软体足式机器人在体内移动和运输方面展现了巨大的潜力^[76-77],在小尺度世界里,微型机器人有潜力完成目前困难或不可能完成的任务,开展微型软体足式机器人研究,对促进多尺度生物医学,微创医疗和工业微操作的广泛应用具有实际意义。

5 总结与展望

软体足式机器人是机器人系统的重要组成部分。材料与驱动是软体机器人研究的基础与热点,建模与仿真是软体机器人研究的难点与制高点。

(1) 流体驱动在软体足式机器人中应用最为广泛,如何摆脱气源管路与复杂控制系统的限制是其结构创新的关键。化学反应驱动和非接触式物理场驱动易于实现机器人的无约束移动但需克服难以控制的问题。化学反应与化学材料在软体机器人研究中扮演者十分重要的角色,多种智能材料的开发与应用推动着软体足式机器人的进步。机电式驱动为软结构提供了充足的动力,但也限制了整机的柔韧度,多种驱动方式组合赋予了软体机器人更加丰富的功能。

(2) 软体足式机器人的力学建模与控制仍处于从刚性到软体的过渡阶段,分段法、连续介质梁理论以及有限元方法是当前的主流,控制方法则以开环控制和基于视觉伺服的反馈控制为主,融合机器学习的软体机器人智能控制也是当前潮流之一。

(3) 传统商业软件是目前软体模块及单一驱动型软体机器人仿真的首选,有限元技术与计算机图

形学在面向软体足式机器人系统仿真引擎开发中起到了中流砥柱的作用,但是面向软体足式机器人的专业仿真软件仍有待进一步开发。

软体足式机器人的发展离不开材料、驱动、传感与柔性电子等软体机器人技术的共同进步,软体足式机器人研究的本质是为人类的生产与生活服务,针对目前软体机器人研究领域仍然存在的共性问题,未来面向产品化应用的软体足式机器人研究可以考虑以下方向。

(1) 基于学科交叉的智能融合: 柔性驱动、柔性传感以及柔性电子等硬件模块仍制约着软体足式机器人向智能化与集成化方向发展,通过多技术学科的协同攻关可以实现驱动、传感、控制单元与机器人本体的融合,摆脱固定能源供给的限制,实现软体足式机器人智能感知与运动控制的系统集成。

(2) 基于仿生灵感的刚柔耦合: 善于奔跑的动物通常既有坚硬的骨骼也有柔韧的肌肉,完全柔软的章鱼也具有变刚度的功能,未来软体足式机器人需要具备根据任务需求主动改变刚度的本体感知能力,耦合多种驱动方式,充分开发结构仿生与功能仿生的潜力,提升不同尺度下软体足式机器人的负载与交互性能。

(3) 基于力学模型的精准控制: 软体足式机器人的优势在于复杂环境下的适应性与人机交互的安全性,针对软体机器人的力学体系尚未建立,结合多种材料特性与环境因素的力学建模与仿真对于实现软体足式机器人的精确控制具有重要工程意义。

参 考 文 献

- [1] RAIBERT M, BLANKESPOOR K, NELSON G, et al. BigDog, the rough-terrain quadruped robot[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 10822-10825.
- [2] WILCOX B H. ATHLETE: An option for mobile lunar landers[C]// Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [3] KUINDERSMA S, DEITS R, FALLON M, et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot[J]. Autonomous Robots, 2016, 40(3): 429-455.
- [4] 徐丰羽, 孟凡昌, 范保杰, 等. 软体机器人驱动、建模与应用研究综述[J]. 南京邮电大学学报, 2019, 39(3): 64-75.
XU Fengyu, MENG Fanchang, FAN Baojie, et al. Review of driving methods, modeling and application in soft robots[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019, 39(3): 64-75.
- [5] 傅珂杰, 曹许诺, 张桢, 等. 水下软体机器人柔性驱动方式及其仿生运动机理研究进展[J]. 科技导报, 2017, 35(18): 44-51.
FU Kejie, CAO Xunuo, ZHANG Zhen et al. A review of the flexible driving mode of underwater software robot and its mechanism of bionic movement[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(18): 44-51.
- [6] 李铁风, 李国瑞, 梁艺鸣, 等. 软体机器人结构机理与驱动材料研究综述[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 756-766.
LI Tiefeng, LI Guorui, LIANG Yiming, et al. Review of materials and structures in soft robotics[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 756-766.
- [7] 曹玉君, 尚建忠, 梁科山, 等. 软体机器人研究现状综述[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 25-33.
CAO Yujun, SHANG Jianzhong, LIANG Keshan, et al. Review of soft-bodied robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 25-33.
- [8] 蒋国平, 孟凡昌, 申景金, 等. 软体机器人运动学与动力学建模综述[J]. 南京邮电大学学报, 2018, 38(1): 20-26.
JIANG Guoping, MENG Fanchang, SHEN Jingjin, et al. Review on kinematics and dynamics modeling for soft robots[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018, 38(1): 20-26.
- [9] 牛丽周. 软体仿生机械臂力学建模与实验验证[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
NIU Lizhou. Mechanical modeling and experimental verification of soft biomimetic manipulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [10] 王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 1-13.
WANG Tianmiao, HAO Yufei, YANG Xingbang, et al. Soft robotics: Structure, actuation, sensing and control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 1-13.
- [11] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. Nature, 2015, 521(7553): 467-475.
- [12] RICH S I, WOOD R J, MAJIDI C. Untethered soft robotics[J]. Nature Electronics, 2018, 1(2): 102-112.
- [13] CAO J, QIN L, LIU J, et al. Untethered soft robot capable of stable locomotion using soft electrostatic actuators[J]. Extreme Mechanics Letters, 2018, 21: 9-16.
- [14] DAS A, NABI M. A review on soft robotics: Modeling, control and applications in human-robot interaction[C]// 2019 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS). Greater Noida, India: IEEE, 2019: 306-311.
- [15] 李海利, 姚建涛, 周盼, 等. 无系留大负载软体抓持机

- 器人研究发展综述[J]. 机械工程学报, 2020, 56(19): 28-42.
- LI Haili, YAO Jiantao, ZHOU Pan, et al. Untethered, high-load soft gripping robots: A review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(19): 28-42.
- [16] RENDA F, GIORGIO-SERCHI F, BOYER F, et al. A unified multi-soft-body dynamic model for underwater soft robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 2018, 37(6): 648-666.
- [17] TRIVEDI D, RAHN C D, KIER W M, et al. Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2008, 5(3): 99-117.
- [18] SHIH B, SHAH D, LI J, et al. Electronic skins and machine learning for intelligent soft robots[J]. Science Robotics, 2020, 5(41): eaz9239.
- [19] LASCHI C, MAZZOLAI B, CIANCHETTI M. Soft robotics : Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities[J]. Science Robotics, 2016, 1(1): eaah3690.
- [20] WHITESIDES G M. Soft-Robotik[J]. Angewandte Chemie, 2018, 130(16): 4336-4353.
- [21] SUZUMORI K, IIKURA S, TANAKA H. Development of flexible microactuator and its applications to robotic mechanisms[C]//1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Sacramento, California, April: IEEE Comput. Soc. Press, 1991: 1622-1627.
- [22] SHEPHERD R F, ILIEVSKI F, CHOI W, et al. Multigait soft robot[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(51): 20400-20403.
- [23] MORIN S A, SHEPHERD R F, KWOK S W, et al. Camouflage and display for soft machines[J]. Science, 2012, 337(6096): 828-832.
- [24] TOLLEY M T, SHEPHERD R F, MOSADEGH B, et al. A resilient, untethered soft robot[J]. Soft Robotics, 2014, 1(3): 213-223.
- [25] KWOK S W, MORIN S A, MOSADEGH B, et al. Magnetic assembly of soft robots with hard components[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(15): 2180-2187.
- [26] STOKES A A, SHEPHERD R F, MORIN S A, et al. A hybrid combining hard and soft robots[J]. Soft Robotics, 2014, 1(1): 70-74.
- [27] NEMIROSKIA, SHEVCHENKO Y Y, STOKES A A, et al. ArthroBots[J]. Soft Robotics, 2017, 4(3): 183-190.
- [28] RANZANI T, RUSSO S, BARTLETT N W, et al. Increasing the dimensionality of soft microstructures through injection-induced self-folding[J]. Advanced Materials, 2018, 30(38): 1802739.
- [29] VASIOS N, GROSS A J, SOIFER S, et al. Harnessing viscous flow to simplify the actuation of fluidic soft robots[J]. Soft Robotics, 2020, 7(1): 1-9.
- [30] DROTMAN D, JADHAV S, KARIMI M, et al. 3D printed soft actuators for a legged robot capable of navigating unstructured terrain[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore: IEEE, 2017: 5532-5538.
- [31] ISHIDA M, DROTMAN D, SHIH B, et al. Morphing structure for changing hydrodynamic characteristics of a soft underwater walking robot[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(4): 4163-4169.
- [32] FRAS J, NOH Y, MACIAS M, et al. Bio-inspired octopus robot based on novel soft fluidic actuator[C]// 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Brisbane, Australia: IEEE, 2018: 1583-1588.
- [33] ZATOPA A, WALKER S, MENGUC Y. Fully soft 3D-printed electroactive fluidic valve for soft hydraulic robots[J]. Soft Robotics, 2018, 5(3): 258-271.
- [34] YIRMIBEŞOĞLU O D, OSHIRO T, OLSON G, et al. Evaluation of 3D printed soft robots in radiation environments and comparison with molded counterparts[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2019, 6: 1-14.
- [35] DUGGAN T, HOROWITZ L, ULUG A, et al. Inchworm-inspired locomotion in untethered soft robots[C]// 2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics, Seoul, Korea: IEEE, 2019: 200-205.
- [36] TANG Y, CHI Y, SUN J, et al. Leveraging elastic instabilities for amplified performance: Spine-inspired high-speed and high-force soft robots[J]. Science Advances, 2020, 6(19): eaaz6912.
- [37] GUO H, ZHANG J, WANG T, et al. Design and control of an inchworm-inspired soft robot with omega-arching locomotion[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore, 2017: IEEE, 2017: 4154-4159.
- [38] WU P, JIANGBEI W, YANQIONG F. The structure, design, and closed-loop motion control of a differential drive soft robot[J]. Soft Robotics, 2018, 5(1): 71-80.
- [39] 郭祥. 软体爬行机器人状态识别及控制研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- GUO Xiang. Research on status recognition and control of soft reptile robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [40] 姚建涛, 陈新博, 陈俊涛, 等. 轮足式仿生软体机器人设计与运动分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 27-35.

- YAO Jiantao, CHEN Xinbo, CHEN Juntao, et al. Design and motion analysis of a wheel-walking bionic soft robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(5): 27-35.
- [41] 陈阳, 徐晓丹, 李向攀. 基于 Arduino 控制的气动软体仿生四足机器人结构设计及步态规划[J]. *液压与气动*, 2020(5): 86-90.
- CHEN Yang, XU Xiaodan, LI Xiangpan. Structural design and gait planning of pneumatic soft bionic quadruped robot based on arduino control[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2020(5): 86-90.
- [42] FAN J, WANG S, YU Q, et al. Swimming performance of the frog-inspired soft robot[J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(5): 615-626.
- [43] 管清华, 孙健, 刘彦菊, 等. 气动软体机器人发展现状与趋势[J]. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50(7): 897-934.
- GUAN Qinghua, SUN Jian, LIU Yanju, et al. Status of and trends in soft pneumatic robotics[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2020, 50(7): 897-934.
- [44] BARTLETT N W, TOLLEY M T, OVERVELDE J T B, et al. A 3D-printed, functionally graded soft robot powered by combustion[J]. *Science*, 2015, 349(6244): 161-165.
- [45] WEHNER M, TRUBY R L, FITZGERALD D J, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots[J]. *Nature*, 2016, 536(7617): 451-455.
- [46] TOLLEY M T, SHEPHERD R F, KARPELSON M, et al. An untethered jumping soft robot[C]// 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, IL, USA: IEEE, 2014: 561-566.
- [47] SHEPHERD R F, STOKES A A, FREAKE J, et al. Using explosions to power a soft robot[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2013, 52(10): 2892-2896.
- [48] MAEDA S, HARA Y, SAKAI T, et al. Self-walking gel[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(21): 3480-3484.
- [49] CHANG Y, KIM W. Aquatic ionic-polymer-metal-composite insectile robot with multi-DOF legs[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(2): 547-555.
- [50] 闫继宏, 石培沛, 张新彬, 等. 软体机械臂仿生机理、驱动及建模控制研究发展综述[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(15): 1-14.
- YAN Jihong, SHI Peipei, ZHANG Xinbin, et al. Review of biomimetic mechanism, actuation, modeling and control in soft manipulators[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(15): 1-13.
- [51] HE Q, WANG Z, WANG Y, et al. Electrically controlled liquid crystal elastomer-based soft tubular actuator with multimodal actuation[J]. *Science Advances*, 2019, 5(10): eaax5746.
- [52] MORALES D, PALLEAU E, DICKEY M D, et al. Electro-actuated hydrogel walkers with dual responsive legs[J]. *Soft Matter*, 2014, 10(9): 1337-1348.
- [53] PEI Q, ROSENTHAL M, STANFORD S, et al. Multiple-degrees-of-freedom electroelastomer roll actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(5): N86-N92.
- [54] CANH T N, HOA P, PHI T H, et al. Development of an insect-inspired hexapod robot actuated by soft actuators[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics- Transactions of the ASME*, 2018, 10(6): 061016.
- [55] NGUYEN C T, PHUNG H, NGUYEN T D, et al. Multiple-degrees-of-freedom dielectric elastomer actuators for soft printable hexapod robot[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 267: 505-516.
- [56] NGUYEN C T, PHUNG H, JUNG H, et al. Printable monolithic hexapod robot driven by soft actuator[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, WA, USA: IEEE, 2015: 4484-4489.
- [57] GU G, ZOU J, ZHAO R, et al. Soft wall-climbing robots[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(25): eaat2874.
- [58] LI T, ZOU Z, MAO G, et al. Agile and resilient insect-scale robot[J]. *Soft Robotics*, 2019, 6(1): 133-141.
- [59] JI X, LIU X, CACUCCILO V, et al. An autonomous untethered fast soft robotic insect driven by low-voltage dielectric elastomer actuators[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(37): eaaz6451.
- [60] KIM B, RYU J, JEONG Y, et al. A ciliary based 8-legged walking micro robot using cast IPMC actuators[C]// 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2003: 2940-2945.
- [61] MUST I, KAASIK F, PÖLDSALU I, et al. Ionic and capacitive artificial muscle for biomimetic soft robotics[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(1): 84-94.
- [62] OHM C, BREHMER M, ZENTEL R. Liquid crystalline elastomers as actuators and sensors[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(31): 3366-3387.
- [63] 张亚坤, 张宇, 李博, 等. 聚合物捻卷型人工肌肉及其在软体机器人领域应用的研究现状[J]. *中国科学: 技术科学*, 2020(1): 1-18.
- ZHANG Yakun, ZHANG Yu, LI Bo, et al. Progress of twisted and coiled polymer fiber artificial muscles and its application in soft robots[J]. *Scientia Sinica*

- Technologica, 2020(1): 1-18.
- [64] 左伟东. 人工肌肉驱动的仿生六足软体机器人设计与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- ZUO Weidong. Design and experimental research of bionic hexapod soft robot driven by artificial muscle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [65] TANG X, LI K, LIU Y, et al. A soft crawling robot driven by single twisted and coiled actuator[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 291: 80-86.
- [66] WU Y, HO K Y, KARIYA K, et al. PRE-curved PVDF/PI unimorph structures for biomimic soft crawling actuators[C]// 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Belfast, UK: IEEE, 2018: 581-584.
- [67] WU Y, YIM J K, LIANG J, et al. Insect-scale fast moving and ultrarobust soft robot[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(32): eex1594.
- [68] PARK T, CHA Y. Soft mobile robot inspired by animal-like running motion[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 14700.
- [69] LIN H T, LEISK G G, TRIMMER B. GoQBot: A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2011, 6(2): 26007.
- [70] MAO S, DONG E, ZHANG S, et al. A new soft bionic starfish robot with multi-gaits[C]// 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Wollongong, Australia: IEEE, 2013: 1312-1317.
- [71] JIN H, DONG E, ALICI G, et al. A starfish robot based on soft and smart modular structure (SMS) actuated by SMA wires[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2016, 11(5): 56012.
- [72] HUANG X, KUMAR K, KHALID JAWED M, et al. Soft electrically actuated quadruped (SEAQ)—Integrating a flex circuit board and elastomeric limbs for versatile mobility[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(3): 2415-2422.
- [73] PATTERSON Z J, SABELHAUS A P, CHIN K, et al. An untethered brittle star robot for closed-loop underwater locomotion[J]. *arXiv*, 2020. arXiv: 2003.13529v2.
- [74] OTAKE M, KAGAMI Y, INABA M, et al. Motion design of a starfish-shaped gel robot made of electro-active polymer gel[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, 40(2): 185-191.
- [75] LI H, GO G, KO S Y, et al. Magnetic actuated pH-responsive hydrogel-based soft micro-robot for targeted drug delivery[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(2): 27001.
- [76] HU W, LUM G Z, MASTRANGELI M, et al. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion[J]. *Nature*, 2018, 554(7690): 81-85.
- [77] LU H, ZHANG M, YANG Y, et al. A bioinspired multilegged soft millirobot that functions in both dry and wet conditions[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3944.
- [78] KIM Y, YUK H, ZHAO R, et al. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials[J]. *Nature*, 2018, 558(7709): 274-279.
- [79] KIM Y, PARADA G A, LIU S, et al. Ferromagnetic soft continuum robots[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(33): eex7329.
- [80] CUI J, HUANG T, LUO Z, et al. Nanomagnetic encoding of shape-morphing micromachines[J]. *Nature*, 2019, 575(7781): 164-168.
- [81] ZHAO X, KIM Y. Soft microbots controlled by nanomagnets[J]. *Nature*, 2019, 575(7781): 58-59.
- [82] 苏梦. 磁控软体微型机器人的优化设计与控制[D]. 深圳: 中国科学院大学(中科院深圳先进技术研究院), 2020.
- SU Meng. Optimization design and control of soft microrobot driven by magnetic field[D]. Shenzhen: University of Chinese Academy of Sciences (Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [83] SHIN B, HA J, LEE M, et al. Hygrobot: A self-locomotive ratcheted actuator powered by environmental humidity[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(14): eear2629.
- [84] ZENG H, WANI O M, WASYL CZYK P, et al. Light-driven, caterpillar-inspired miniature inching robot[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2018, 39(1): 1700224.
- [85] AHN C, LIANG X, CAI S. Bioinspired design of light-powered crawling, squeezing, and jumping untethered soft robot[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(7): 1900185.
- [86] PILZ DA CUNHA M, AMBERGEN S, DEBIJE M G, et al. A soft transporter robot fueled by light[J]. *Advanced Science*, 2020, 7(5): 1902842.
- [87] WANG X, YANG B, TAN D, et al. Bioinspired footed soft robot with unidirectional all-terrain mobility[J]. *Materials Today*, 2020, 35: 42-49.
- [88] WANG X Q, CHAN K H, CHENG Y, et al. Somatosensory, light - driven, thin - film robots capable of integrated perception and motility[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(21): 2000351.
- [89] LASCHI C, CIANCHETTI M, MAZZOLAI B, et al. Soft robot arm inspired by the octopus[J]. *Advanced Robotics*,

- 2012, 26(7): 709-727.
- [90] CALISTI M, GIORELLI M, LEVY G, et al. An octopus-bioinspired solution to movement and manipulation for soft robots[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2011, 6(3): 36002.
- [91] CALISTI M, GIORELLI M, LASCHI C. A locomotion strategy for an octopus-bioinspired robot[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [92] CALISTI M, ARIENTI A, RENDA F, et al. Design and development of a soft robot with crawling and grasping capabilities[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul, MN, USA: IEEE, 2012: 4950-4955.
- [93] SFAKIOTAKIS M, KAZAKIDI A, TSAKIRIS D P. Octopus-inspired multi-arm robotic swimming[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(3): 35005.
- [94] SFAKIOTAKIS M, KAZAKIDI A, PATEROMICHELAKIS N, et al. Octopus-inspired eight-arm robotic swimming by sculling movements[C]// 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, Germany: IEEE, 2013: 5155-5161.
- [95] ARIENTI A, CALISTI M, GIORGIO-SERCHI F, et al. PoseiDRONE: Design of a soft-bodied ROV with crawling, swimming and manipulation ability [C]// MTS/IEEE OCEANS. San Diego, USA: MTS, 2013: 1-7.
- [96] GIORGIO SERCHI F, ARIENTI A, LASCHI C. Biomimetic vortex propulsion: Toward the new paradigm of soft unmanned underwater vehicles[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(2): 484-493.
- [97] CIANCHETTI M, CALISTI M, MARGHERI L, et al. Bioinspired locomotion and grasping in water: The soft eight-arm OCTOPUS robot[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(3): 35003.
- [98] CACUCCIOLO V, YASMIN A, SHOUSHARI A L, et al. Adaptive locomotion on uneven terrains by means of a functional separation of time scales in the design and control of robots[C]//7th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, AMAM. 2015: 1-3.
- [99] SADEGHI A, MONDINI A, DEL DOTTORE E, et al. Soft-legged wheel-based robot with terrestrial locomotion abilities[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2016, 3: 1-10.
- [100] JAYARAM K, FULL R J. Cockroaches traverse crevices, crawl rapidly in confined spaces, and inspire a soft, legged robot[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(8): E950-E957.
- [101] MALLEY M, RUBENSTEIN M, NAGPAL R. Flippy: A soft, autonomous climber with simple sensing and control[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2017: 6533-6540.
- [102] ROZEN-LEVY S, MESSNER W, TRIMMER B A. The design and development of Branch Bot: A branch-crawling, caterpillar-inspired, soft robot[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2019: 1-13. DOI: 10.1177/0278364919846358
- [103] KALN M A I, AYGUL C, TURKMEN A, et al. Design, fabrication, and locomotion analysis of an untethered miniature soft quadruped, Squad[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(3): 3854-3860.
- [104] LI Y, CHEN Y, REN T, et al. Precharged pneumatic soft actuators and their applications to untethered soft robots[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(5): 567-575.
- [105] LI Y, FISH F, CHEN Y, et al. Bio-inspired robotic dog paddling: kinematic and hydro-dynamic analysis[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2019, 14(6): 66008.
- [106] LI Y, REN T, LI Y, et al. Untethered-bioinspired quadrupedal robot based on double-chamber pre-charged pneumatic soft actuators with highly flexible trunk[J]. *Soft Robotics*, 2020(1): 1-12.
- [107] MAZZOLAI B, LASCHI C, CIANCHETTI M, et al. Biorobotic investigation on the muscle structure of an octopus tentacle[C]//Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS. Lyon, France: IEEE, 2007: 1471-1474.
- [108] YEKUTIELI Y, MITELMAN R, HOCHNER B, et al. Analyzing octopus movements using three-dimensional reconstruction[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2007, 98(3): 1775-1790.
- [109] SAUNDERS F, TRIMMER B A, RIFE J. Modeling locomotion of a soft-bodied arthropod using inverse dynamics[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2011, 6(1): 16001.
- [110] GAMUS B, SALEM L, GAT A D, et al. Understanding inchworm crawling for soft-robotics[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 1397-1404.
- [111] WEBSTER R J, JONES B A. Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2010, 29(13): 1661-1683.
- [112] 俞晓瑾. 柔性机械臂的运动学和动力学建模及视觉伺服控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- YU Xiaojin, Kinematics and dynamics modeling and visual servo control for soft robotic manipulator[D].

- Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [113] 王超. 线驱动硅胶软体机械臂建模与控制[D]. 上海交通大学, 2015.
- WANG Chao, Dynamics and control of cable-driven silicone soft manipulator[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [114] XU F, WANG H, WANG J, et al. Underwater dynamic visual servoing for a soft robot arm with online distortion correction[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(3): 979-989.
- [115] DELLA SANTINA C, BICCHI A, RUS D. On an improved state parametrization for soft robots with piecewise constant curvature and its use in model based control[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 1001-1008.
- [116] GONG Z, FANG X, CHEN X, et al. A soft manipulator for efficient delicate grasping in shallow water: Modeling, control, and real-world experiments[J]. The International Journal of Robotics Research, 2020(1): 1-21.
- [117] YEKUTIELI Y, SAGIV-ZOHAR R, AHARONOV R, et al. Dynamic model of the octopus arm. I. Biomechanics of the octopus reaching movement[J]. Journal of Neurophysiology, 2005, 94(2): 1443-1458.
- [118] KANG R, KAZAKIDI A, GUGLIELMINO E, et al. Dynamic model of a hyper-redundant, octopus-like manipulator for underwater applications[C]// Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Francisco, CA: IEEE, 2011: 4054-4059.
- [119] LI T, NAKAJIMA K, KUBA M, et al. From the octopus to soft robots control: An octopus inspired behavior control architecture for soft robots[J]. VIE ET MILIEU-LIFE AND ENVIRONMENT, 2011, 61(4): 211-217.
- [120] KANG R, BRANSON D T, GUGLIELMINO E, et al. Dynamic modeling and control of an octopus inspired multiple continuum arm robot[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2012, 64(5): 1004-1016.
- [121] ZHENG T, GODAGE I S, BRANSON D T, et al. Octopus inspired walking robot: Design, control and experimental validation[C]// 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Karlsruhe, Germany: IEEE, 2013: 816-821.
- [122] ZHENG T, BRANSON D T, GUGLIELMINO E, et al. A 3D dynamic model for continuum robots inspired by an octopus arm[C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Shanghai, China: IEEE, 2011: 3652-3657.
- [123] TRIVEDI D, LOTFI A, RAHN C D. Geometrically exact models for soft robotic manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(4): 773-780.
- [124] RUCKER D C, JONES B A, WEBSTER III R J. A geometrically exact model for externally loaded concentric-tube continuum robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(5): 769-780.
- [125] RENDA F, CIANCHETTI M, GIORELLI M, et al. A 3D steady-state model of a tendon-driven continuum soft manipulator inspired by the octopus arm[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2012, 7(2): 25006.
- [126] GIORELLI M, RENDA F, CALISTI M, et al. Neural network and jacobian method for solving the inverse statics of a cable-driven soft arm with nonconstant curvature[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(4): 823-834.
- [127] GIORELLI M, RENDA F, CALISTI M, et al. Learning the inverse kinetics of an octopus-like manipulator in three-dimensional space[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(3): 35006.
- [128] RENDA F, GIORELLI M, CALISTI M, et al. Dynamic model of a multibending soft robot arm driven by cables[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(5): 1109-1122.
- [129] RENDA F, BOYER F, DIAS J, et al. Discrete cosserat approach for multisection soft manipulator dynamics[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(6): 1518-1533.
- [130] RENDA F, CACUCCILOLO V, DIAS J, et al. Discrete Cosserat approach for soft robot dynamics: A new piece-wise constant strain model with torsion and shears[C]// Proc. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Daejeon, South Korea: IEEE, 2016: 5495-5502.
- [131] CALISTI M, CORUCCI F, ARIENTI A, et al. Dynamics of underwater legged locomotion: Modeling and experiments on an octopus-inspired robot[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(4): 46012.
- [132] VAVOURAKIS V, BAMPASAKIS D, KAZAKIDI A, et al. Generation of primitive behaviors for non-linear hyperelastic octopus-inspired robotic arm[C]// The Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics. Roma, Italy: IEEE, 2012: 725-730.
- [133] VAVOURAKIS V, KAZAKIDI A, TSAKIRIS D P, et al. A finite element method for non-linear hyperelasticity applied for the simulation of octopus arm motions[C]// International Conference on Computational Methods for

- Coupled Problems in Science and Engineering. Kos, GREECE: Int Center Numerical Methods Engineering, 2011: 147-159.
- [134] GODAGE I S, BRANSON D T, GUGLIELMINO E, et al. Shape function-based kinematics and dynamics for variable length continuum robotic arms[C]// 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China: IEEE, 2011: 452-457.
- [135] GODAGE I S, NANAYAKKARA T, CALDWELL D G. Locomotion with continuum limbs[C]// 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura, Algarve, Portugal: IEEE, 2012: 293-298.
- [136] HU H, TIAN Q, LIU C. Computational dynamics of soft machines[J]. Acta Mechanica Sinica, 2017, 33(3): 516-528.
- [137] HU H, TIAN Q, LIU C. Soft machines: Challenges to computational dynamics[J]. Procedia IUTAM, 2017, 20: 10-17.
- [138] 费燕琼, 庞武, 于文博. 气压驱动软体机器人运动研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 14-18.
FEI Yanqiong, PANG Wu, YU Wenbo. Movement of air-driven soft robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 14-18.
- [139] ZHANG Z, BIEZE T M, DEQUIDT J, et al. Visual servoing control of soft robots based on finite element model[C]// 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2017: 2895-2901.
- [140] ZHANG Z, DEQUIDT J, DURIEZ C. Vision-based sensing of external forces acting on soft robots using finite element method[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 1529-1536.
- [141] BIEZE T M, LARGILLIERE F, KRUSZEWSKI A, et al. Finite element method-based kinematics and closed-loop control of soft, continuum manipulators[J]. Soft Robotics, 2018, 5(3): 348-364.
- [142] THIEFFRY M, KRUSZEWSKI A, DURIEZ C, et al. Control design for soft robots based on reduced-order model[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(1): 25-32.
- [143] GOURY O, DURIEZ C. Fast, generic, and reliable control and simulation of soft robots using model order reduction[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(6): 1565-1576.
- [144] ZHENG G. Control of a silicone soft tripod robot via uncertainty compensation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 2801-2807.
- [145] ZHENG G, ZHOU Y, JU M. Robust control of a silicone soft robot using neural networks[J]. ISA Transactions, 2020, 100: 38-45.
- [146] ROßMANN J, SCHLUSE M, RAST M, et al. Soft robotics: Transferring theory to application[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.
- [147] POLYGERINOS P, WANG Z, OVERVELDE J T B, et al. Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(3): 778-789.
- [148] LIPSON H. Challenges and opportunities for design, simulation, and fabrication of soft robots[J]. Soft Robotics, 2014, 1(1): 21-27.
- [149] LIANG Y, MCMEEKING R M, EVANS A G. A finite element simulation scheme for biological muscular hydrostats[J]. Journal of Theoretical Biology, 2006, 242(1): 142-150.
- [150] SUN H H, ZHAO A W, ZHANG M F, et al. The analysis model of torsion behavior for octopus-inspired robotic arm[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 461: 917-923.
- [151] RUNGE G, RAATZ A. A framework for the automated design and modelling of soft robotic systems[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 9-12.
- [152] WEI F, ZHENG J, YU C. A novel soft robot based on organic materials: Finite element simulation and precise control[C]// International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Wuhan, China: Springer, Verlag, 2017: 103-109.
- [153] JOYEE E B, PAN Y. A fully three-dimensional printed inchworm-inspired soft robot with magnetic actuation[J]. Soft Robotics, 2019, 6(3): 333-345.
- [154] NIU L, DING L, GAO H, et al. Closed-form equations and experimental verification for soft robot arm based on Cosserat theory[C]// 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Macau, China: IEEE, 2019: 6630-6635.
- [155] HILLER J, LIPSON H. Dynamic simulation of soft multimaterial 3D-printed objects[J]. Soft Robotics, 2014, 1(1): 88-101.
- [156] GERMANN J, MAESANI A, STOCKLI M, et al. Soft cell simulator: A tool to study soft multi-cellular robots[C]// 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Shenzhen, China: IEEE, 2013: 1300-1305.
- [157] COEVOET E, MORALES-BIEZE T, LARGILLIERE F, et al. Software toolkit for modeling, simulation, and control of soft robots[J]. Advanced Robotics, 2017,

- 31(22): 1208.
- [158] DURIEZ C, COEVOET E, LARGILLIERE F, et al. Framework for online simulation of soft robots with optimization-based inverse model[C]//IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots. San Francisco, USA, Dec. 13-16, 2016: IEEE, 2016: 111-118.
- [159] 陈君. 一种刚软混杂机器人系统的耦合仿真方法[D]. 深圳: 中国科学院大学(中科院深圳先进技术研究院), 2019.
- CHEN Jun. A coupled simulation approach for rigid-soft hybrid robotic systems[D]. Shenzhen: University of Chinese Academy of Sciences(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences). 2019.
- [160] BERN J M, CHANG K, COROS S. Interactive design of animated plushies[J]. ACM Transactions on Graphics, 2017, 36(4): 1-11.
- [161] FANG G, MATTE C, KWOK T, et al. Geometry-based direct simulation for multi-material soft robots[C]// 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Brisbane, QLD, Australia: IEEE, 2018: 4194-4199.
- [162] FANG G, MATTE C, SCHARFF R B N, et al. Kinematics of soft robots by geometric computing[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2020, 36(4): 1272-1286.
- [163] HU Y, FANG Y, GE Z, et al. A moving least squares material point method with displacement discontinuity and two-way rigid body coupling[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(4): 1-14.
- [164] HU Y, LIU J, SPIELBERG A, et al. ChainQueen: A real-time differentiable physical simulator for soft robotics[C]// 2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2019: 6265-6271.
- [165] MIN S, WON J, LEE S, et al. SoftCon: Simulation and control of soft-bodied animals with biomimetic actuators[J]. ACM Transactions on Graphics, 2019, 38(6): 1-12.
- [166] HUANG W, HUANG X, MAJIDI C, et al. Dynamic simulation of articulated soft robots[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-9.
- [167] LIN H, LEISK G G, TRIMMER B A. Soft robots in space: A perspective for soft robotics[J]. Acta Futura, 2013(6): 69-79.
- [168] JING Z, QIAO L, PAN H, et al. An overview of the configuration and manipulation of soft robotics for on-orbit servicing[J]. Science China Information Sciences, 2017, 60(5): 50201.
- [169] 韩亮亮, 杨健, 赵颖, 等. 基于仿章鱼软体机器人空间碎片柔性自适应捕获装置的设想[J]. 载人航天, 2017, 23(4): 469-472.
- HAN Liangliang, YANG Jian, ZHAO Ying, et al. Assumption on flexible adaptive orbital debris capture device based on octopus-inspired pneumatic soft robot[J]. Manned Spaceflight, 2017, 23(4): 469-472.
- [170] TANG J, YAO C, GU Z, et al. Super - soft and super-elastic DNA robot with magnetically driven navigational locomotion for cell delivery in confined space[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2020, 59(6): 2490-2495.
-
- 作者简介: 牛丽周, 男, 1995 年出生, 博士研究生。主要研究方向为软体机器人系统建模与仿真。
E-mail: colin_niu@126.com
- 丁亮(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为星球探测机器人、野外足式机器人与地面力学。
E-mail: liangding@hit.edu.cn