DOI: 10.3901/JME.2020.19.028

无系留大负载软体抓持机器人研究发展综述*

李海利¹ 姚建涛^{1,2} 周盼¹ 赵无眠¹ 许允斗¹ 赵永生^{1,2}

(1. 燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室 秦皇岛 066004;

2. 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室(燕山大学) 秦皇岛 066004)

摘要: 受软体材料、制造工艺、核心部件的限制,大多数的软体机器人负载能力较低,不能随机携带控制和能量硬件系统,不得不通过管路和线路系留在外部硬件上,这严重限制了软体机器人的作业范围和应用领域。在众多的软体机器人中,软体抓持机器人发展较快,主要包括两类:一类是软体末端,主要配合机械臂、水下机器人、无人机、人体等完成抓取任务;另一类是以抓持功能为主兼具位姿变换功能的运动软体夹持器,实现了自身抓持结构特性与运动功能的巧妙融合。针对软体机器人技术领域无系留与大负载的共性话题,聚焦应用前景广阔的软体抓持机器人,从无系留驱动与系统集成、负载力提升等方面分析了软体抓持机器人发展过程中所取得的显著成果和存在的不足之处,系统总结了无系留大负载软体抓持机器人研发技术和面临的主要挑战,为软体抓持机器人发展方向与性能提升提供参考,推动软体机器人进入实际应用领域。

关键词: 软体机器人; 软体抓持机器人; 无系留; 大负载;

中图分类号: TP242

Untethered, High-load Soft Gripping Robots: A Review

LI Haili¹ YAO Jiantao^{1,2} ZHOU Pan¹ ZHAO Wumian¹ XU Yundou¹ ZHAO Yongsheng^{1,2}

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Parallel Robot and Mechatronic System, Yanshan University,

Qinhuangdao 066004;

2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science (Yanshan University), Ministry of Education of China, Qinhuangdao 066004)

Abstract: Due to the limitation of soft materials, fabrication, and key components, most soft robots have low load capacity and can not carry the hardware system for control and power. Therefore, they have to be tied to the external hardware through hoses and wires, which severely limits the operation scope and application fields of soft robots. Among many soft robots, the soft gripping robots have developed rapidly, mainly including two categories: One is the soft end effector, which mainly cooperate with manipulators, underwater robots, UAVs, and humans to complete the gripping operation; the other is movable soft grippers that have both a gripping function and a movement function, which realize the ingenious fusion of their own gripping structure and movement function. Aiming at the common topic of untethered optimization and high-load in the field of soft robotics, this paper focuses on the soft gripping robots with broad application prospects. The remarkable achievements and shortcomings in the development of soft gripping robots are analyzed from the aspects of untethered actuators, system integration, and load improvement. This paper also systematically summarizes the development technology and main challenges of untethered high-load soft gripping robots, providing a reference for the development direction and performance improvement of soft gripping robots, and promoting soft robots into the field of practical applications.

Key words: soft robots; soft gripping robots; untethered; high-load

0 前言

软体机器人是区别于传统刚性机器人的新兴自

动化系统,是未来机器人的重要技术储备,以其突出的柔顺性、自适应性、安全性和类生物特性,已经渗透到了国防军事、航空航天、消防救援、人机交互、医疗外科、康复助力器等多个关键应用领域^[1-5]。受软体材料、制造工艺、核心部件的限制,大多数的软体机器人不能随机携带控制和能量硬件系统,不得不通过管路和线路系留在外部硬件上,这严重限制了软体机器人的作业范围和应用领域^[6-9]。软体

* 国家自然科学基金(51975505, 51675459)和河北省自然科学基金京津冀合作专项(E2017203387)资助项目。20200221 收到初稿,20200624 收到修改稿

机器的无系留化旨在通过新型驱动传感与集成技术甩掉软体机器人最后一根“尾巴”,使软体机器人能够在实际应用领域发挥更大优势。无系留化问题伴随软体机器人发展始终,一直以来都是研究的重点与难点,而目前的无系留技术只适用于部分软体机器人,并未达到工程应用水平^[10]。理想的无系留软体机器人应具有类生物特性,集软材料、软驱动、软传感等一系列软功能单元于一身,能够实现软运动和软交互^[2, 11],这一技术特征的实现有待于材料、电子、机械、制造、生物等多个领域协同攻关,而这一发展历程可以同第一台电子计算机到现在的智能计算机相媲美。

负载力普遍不足也是软体机器人面临的主要技术挑战。软体运动机器人在低负载配置下难以携带必备的硬件系统,使得这类机器人长期处于系留时代,软体操作机器人在低负载配置下更是难以胜任繁重作业任务。然而高负载势必会导致软体机器人携带的能量和动力硬件更加笨重,这使得“大负载”与“无系留”之间既相辅相成又彼此约束,存在复杂的技术矛盾。现阶段开发无系留大负载软体机器人的关键在于求解软体结构能量输入与动力输出的高效响应模型,从结构优化的角度满足迫切的行业需求,但更需要从技术根源上全面发展软体机器人关键零部件。

在众多软体机器人中软体抓持机器人率先得到工业化应用,如德国 Festo 公司推出的 FlexShapeGripper 与 TentacleGripper 系列软夹持器,北京软体机器人科技有限公司开发的 SFG 系列柔性夹爪。软体抓持机器人主要包含两类,一类是软体末端,主要配合机械臂、水下机器人、无人机、人体等完成抓取任务^[12-14],为了满足多元化作业需求这类软体抓持机器人还集成了传感^[15-16]、自愈^[17]、变刚度^[18-20]等功能;另一类是以抓持功能为主兼具位姿变换功能的运动软体夹持器,如可在磁场内自由运动抓取的微型软夹持器^[21-22],德国 Festo 公司推出的 Free-MotionHandling,这类软体抓持机器人利用自身抓持结构特点与运动功能巧妙融合,区别于软体末端与运动机器人的简单机械联接。

“无系留”与“大负载”是软体机器人技术领域的共性话题,而不同类型软体机器人又具有不同的个体含义。软体末端类抓持机器人常配合运动机器人使用,其无系留化所需的能源控制系统可作为运动机器人的负载,这便允许软体末端加装一定质量的动力与控制硬件,所以小负载无系留软体末端容易研发,而具有大负重比(负载与自身重量比值)的大负载无系留软体末端对软体机器人技术提出了新的

挑战。新型制造技术^[23]和仿生技术^[24-26]的应用推动了大负载软体抓持机器人发展,负载水平已经达到了 300 N 以上,不足的是这些抓持机器人需要的工作气压或驱动力较大,并且不同姿态负载力相差较大。所以,无系留大负载软体抓持机器人的发展需从高效驱动、抓持原理、系统集成、刚度控制等多技术层面进行突破。

本文针对软体抓持机器人“无系留”与“大负载”两大挑战,系统总结了无系留软体驱动与系统集成技术、软体抓持结构负载力提升技术,展望了无系留大负载软体抓持机器人的发展,分析了可能存在的技术难题,为软体抓持机器人的应用化发展提供参考。

1 无系留软体驱动技术

软体驱动技术是无系留软体机器人研发的关键突破口,研究内容融合了物理、材料、化学、生物等多学科技术,逐步形成了磁场、智能材料、流体、化学、生物混合五类无系留驱动技术。

1.1 磁场驱动

磁场驱动利用变换的磁场对磁性结构进行无接触驱动,是研究较多、效果较好的一类无系留驱动技术,主要应用于微型机器人^[27-30],使这类机器人能够在非结构环境中进行滚动^[31]、游动^[32]、螺旋^[33]、微操作^[34-35]以及群体性运动^[36](图 1a~1e)。无系留微型机器人是未来 20 年最具发展前景的先进机器人之一,在靶向药物^[21, 37]、细胞^[38]和微操作器传递,微小零件装配^[39],复杂复合材料编码^[40]等方面具有潜在的应用价值。除此之外,磁场驱动还被应用在小型连续型机械臂(图 1f、1g)^[41-42]和腿型机器人(图 1h)^[43]上,无约束快速变形软材料更是为磁控无系留机器人灵巧性提供技术支撑(图 1i)^[44]。受磁场有效作用空间限制,磁场驱动机器人的运动范围较小,尽管可以通过外部运动类机器人搭载磁源以扩大磁场跟踪范围^[45-47],但势必会造成作业系统过于庞大。所以,现阶段磁场驱动并不适合驱动体积较大、负载较高的无系留软体机器人。

1.2 智能材料驱动

智能材料驱动主要利用智能材料在场效应作用下(电场、热场、光场等)能够产生变形的物理属性来实现驱动功能。介电弹性体机器人以其良好的电响应特性得到了广泛关注,其驱动电压高达几千伏,大多需要连接外部供电系统^[48-50]。这类机器人的无系留化驱动可以通过结构优化与系统集成方法实现,如无系留软体仿生鱼(图 2a)^[51]、仿生蠕虫

图1 磁场驱动技术在无系留软体机器人领域的应用

(图 2b)^[52-53], 然而通过板载方式进行电源集成, 其携带的能量有限, 续航能力较差。要想从技术根源上解决这一问题必须降低驱动电压, 开发低电压介电弹性体机器人(图 2c)^[54]。近年来, 压电材料^[55]、电流体驱动^[56]、电驱动液态金属^[57]也被应用到小型无系留运动机器人研发, 电响应智能材料呈现多元化发展趋势。热响应材料也是应用较广的一类智能材料, 因驱动热能常通过电能转化而来, 所以这类材料构成的驱动器也被称为电热驱动^[10], 但也有少部分研究通过聚焦太阳光获取驱动热量^[58]。热响

应材料主要包括形状记忆合金^[59-60]、形状记忆薄膜^[61-62]和形状记忆纤维^[63], 因其良好的非接触驱动特性被广泛应用于无系留软体机器人(图 2d~2f), 但由于热量散失过程较慢, 这类机器人迟滞问题严重, 所以高效的热量交换机制成为提升热驱动响应速度的关键突破口。此外, 基于 3D 打印技术的热响应变形结构(图 2g、2h)在可展开结构、仿生机构、柔性电子等方面具有广泛应用前景, 有望催生出无系留软体机器人新型设计方法和快捷制造工艺^[64-65]。

图2 智能材料驱动在无系留软体机器人领域的应用

由于光容易获取且易于实现精确控制, 所以光响应智能材料在无系留运动软结构中具有潜在应

用。应用较多的光智能材料是液晶弹性体, 这种材料可以随着光照条件的变化而变化, 允许一整个结构执行不同的动作, 而传统机器人需要许多离散的执行器, 且每个执行器都需要单独控制。随着激光光刻、3D 打印技术发展, 这些材料被制造成各种结构形状, 已被应用在软体仿生蠕虫(图 2i~2k)^[66-68]、仿生器官(图 2l)^[69]、微型机器人^[70]等方面。此外, 高分子水凝胶也被应用于软行走机器(图 2m)^[71], 拓展了光驱动软体机器人运行形式。

近年来, 不断产生能够对其他外界刺激产生响应的智能结构, 如可对环境湿度响应的无系留软运动机器人(图 2n)^[72], 这将有望实现软体机器人变革发展, 助力新型无系留软体机器人研发。

1.3 流体驱动

流体驱动是软体机器人领域影响最广、使用最早的驱动, 根据选用的介质可以分为液动和气动, 气动因其重量轻、来源广、无污染等优点被广泛应用于软体机器^[73]。流体驱动软体机器人的无系留化常通过控制器、电源、泵、电磁阀、传感器等零部件的集成化和小型化来实现, 仿生鱼是其中较成功的无系留软体机器人(图 3a~3c), 在水下侦查、监测等领域应用前景广阔^[74-75], 尤其是能量储存系统的发展更是增加了这类机器人的能量密度, 大幅度提升其续航能力(图 3c)^[76]。流体驱动在大尺寸无系留软体机器人(图 3d)中具有较大的优势, 可满足多自由运动需求, 能适应多种恶劣环境^[77]。另外, 流体与电驱动结合的新型液压放大静电驱动(图 3e)可产生多种驱动模式, 有效地促进了无系留软体机器人的多元化发展^[78]。

图 3 流体驱动在无系留软体机器人领域的应用

1.4 化学反应驱动

化学反应驱动主要利用燃烧膨胀或反应产气的方式驱动软体结构产生变形, 并通过变形约束原理实现预定义驱动模式^[79]。燃烧驱动方式产生的瞬时动力较大, 可实现软体驱动器快速响应, 但过程可

控性较差, 所以多用于无系留弹跳机器人(图 4a~4c)^[80-82]。通过化学反应产生的气体直接驱动软体结构, 实现了化学能与机械能的巧妙转化, 使软体机器人生物特性更进一层(图 4d、4e)^[83-84]。这种驱动方式和气动驱动有类似之处, 只是在气体介质的来源上有所不同, 但受化学反应产气效率影响, 这种驱动方式多用于小型无系留软体机器人, 并且化学反应方式的重复性使用问题依然是软体机器人所面临的技术难题, 但随着相关技术日益成熟, 化学反应驱动必将推动无系留软体机器人变革性发展。

图 4 化学反应驱动在无系留软体机器人领域的应用

1.5 生物混合驱动

生物混合驱动是由生物组织和人造物质共同组成的混合驱动方式。软体机器人在医疗领域具有重要的应用价值, 出于生物相容性和驱动激励方式考虑, 基于生物材料的驱动器引起了广泛关注^[85-86]。

通过生物 3D 打印^[87]等技术可以直接将生物肌肉组织整合到软体材料中, 获取生物混合软结构(图 5a、5b)^[88-89], 并且可以通过电脉冲和光脉冲诱导方式实现驱动。生物混合驱动系统在无系留仿生软体机器人领域已取得丰富应用成果, 如由心肌细胞提供动力的无系留运动软体机器人(图 5c、5d)^[90-91], 但与其他驱动方式相比生物混合驱动在可控性和性能提升方面依然存在大量难题有待解决。

图 5 生物混合驱动在无系留软体机器人领域的应用

2 软体抓持机器人负载力提升技术

受软体材料固有性质和制造工艺限制,软体抓持机器人负载力提升一直以来都是一个挑战,为了应对这一挑战各个研究团队从强化工艺、附加功能、结构设计、致动方式等方面不断刷新负载记录,研发出了可适用于多个应用领域的大负载软体抓持机器人。

2.1 大输出力软体驱动器

软体驱动器是软体抓持机器人的核心硬件,因此创造出大输出力软体驱动器是提升抓持机器人负载能力的最直接方法。大输出力软体驱动器多为流体驱动,常通过高强度材料强化密封弹性结构的方法提升输出力。纤维加强型软体驱动器(图 6a、6b)因其耐压值高、柔顺性好、运行稳定的优点得到了广泛应用^[92-94],可通过纤维丝之间的不同几何关系组合实现弯扭、伸缩、螺旋等多种运动模式^[95-96],并且可实现路径吻合设计^[97]。针对复杂软体结构强化工艺难度大的基本现状,多个研究小组尝试用高强度的薄膜管和气囊来构建大输出力软体驱动器,为软体驱动器强化提供了新思路(图 6c)^[98-100]。另外,

局部刚性约束(图 6d、6e)^[101-102]、折纸(图 6f)^[103]、并联轴合(图 6g)^[104]等技术也被应用于软体驱动器强化,折纸与纤维约束相结合(图 6h)更是提高了软体驱动器的收缩率和输出力,减小了驱动气压,为无系留大负载软体抓持机器人的研发提供了核心硬件^[105]。

增材制造技术广泛应用于软体驱动器制造(图 6i)^[106-108],可打印出高输出力气动软体驱动器,所构成的软体手负载力可达到 5kg(图 6j)^[23]。近几年,真空驱动器(图 6k)以质量轻、收缩比高、输出力大、刚度稳定的优点引起了广泛关注^[109-111],主要实现弯曲和收缩运动,而这类驱动器也可以通过 3D 打印技术制造^[112]。随着软体材料技术发展,增材制造技术有望突破软体机器人制造瓶颈,推动软体机器人进入实际应用领域。

智能材料驱动在无系留软体机器人中应用广泛,但有限的输出力使其多用于微型或小型软体机器人开发。目前智能材料驱动的研究焦点在新型响应材料与新型软体结构上,少有智能材料驱动输出力提升方法的报道,其输出力提升的关键在于材料和结构,研发出高效响应的智能材料与配套的成形技术将是应对其负载力挑战的根本方法。

图 6 大输出力软体驱动器

2.2 变刚度功能集成

刚度不足是制约软体抓持机器人负载力提升的

关键因素,考虑柔顺性和负载力双重因素,变刚度成为解决这一性能矛盾的关键技术。软体变刚度方

法主要包括颗粒阻塞(图 7a)^[113-114]、片层阻塞(图 7b)^[115-117]、驱动耦合(图 7c)^[118-119]、固液转换(图 7d)^[120]以及刚度可控材料(图 7e)^[121], 可为多种软体机器人集成变刚度功能, 如软体抓持机器人^[122-124]、连续型机器人^[125], 还可以用于控制软体抓持机器人实现不同部段逻辑运动(图 7f), 增强抓取的适应性和灵活性^[120, 126]。变刚度功能明显提高了软体抓持机器人的负载能力, 但也增加了额外的结构和硬件, 增加了无系留难度。

图 7 软体抓持机器人变刚度功能集成

2.3 大负载软体抓持结构

强化工艺和变刚度功能明显提高了驱动器输出力, 可用于搭建多指型软体抓持机器人, 负载力水平达到 50 N 左右, 然而这种类型的软体抓持机器人负载力提升空间较小, 难以满足日益多元化的行业需求。近年来, 具有封闭结构的软体抓持机器人不断刷新负载记录, 基于变刚度原理的通用型软体夹爪(图 8a)负载力可达到 80 N 以上^[127-129], 仿生缠绕软夹爪(图 8b)已突破了 350 N^[24-25]。这类软体抓持机器人往往具有像人体食道、膀胱等器官的环形封闭结构, 通过径向收缩变形实现抓取^[130]。仿生学是创造封闭型软体抓持结构的有效方法, 德国 Festo 公司开发的 FlexShapeGripper(图 8c)仿生于变色龙舌头, 具有广泛的工业应用前景, 受此启发也创造出了多种类似的软体抓持机器人^[131-132]。基于吞食原理的仿生吞食软体机器人(图 8d)表现出了较强的柔尖细物体抓取能力、极端环境作业能力和主动防护功能, 拓宽了软体抓持机器适用对象和作业环境^[26]。此外, 受人体食道等环形器官启发的封闭型软体驱动器(图 8e)可直接用于抓持物体, 丰富了软体驱动器的作动模式^[130]。软体抓持结构或驱动器的封闭化明显提高了负载能力, 但在灵活性方面不如开式抓持结构, 开式与闭式之间的巧妙转换将是

负载软体抓持机器人重要研究内容。

图 8 具有封闭结构的软体抓持机器人

2.4 刚柔混合驱动

传统驱动与软体结构相结合也是解决软体抓持机器人负载力不足的有效方法。受动物肌腱牵引作用启发, 基于绳索驱动软体抓持机器人表现出了运动稳定、可控性好的优点, 并且绳索驱动在软体抓持机器人(图 9a)^[133]、软体机械臂^[134]、软调姿平台^[135]等方面也具有广泛的应用。这类软体机器人动力常来源于传统刚性致动器, 如电动机、气缸等, 但可以通过绳索路径优化来减少驱动数量, 实现硬件系统的小型化(图 9b)^[136-137]。基于柔性机构变形机理也可以将刚性致动器的线性运动转化为柔性夹持运动(图 9c、9d), 负载力提升的关键在于柔性机构的稳定性设计和柔性材料选取^[138-139]。刚柔混合软体抓持机器人是软体机器人技术发展不成熟的中间产物, 随着软体驱动技术与制造技术的发展, 必将剔除软体机器人最后的“硬骨头”。

图 9 刚柔混合驱动软体抓持机器人

3 无系留软体抓持机器人系统集成

目前, 软体抓持机器人的无系留化主要利用无接触驱动技术和机电集成技术。非接触无系留系统侧重于微型抓持机器人, 可在人体等非结构环境中灵活运动实现靶向目标传递。机电集成无系留系统更适合应用在尺寸和负载较大的软体抓持机器人, 主要面向水下操作、工业生产、人机交互等领域。

3.1 非接触无系留系统

非接触无系留系统主要利用磁场驱动和智能材料驱动的非接触致动特性,实现软体抓持机器人的局部空间无系留作业。磁控无系留系统主要由磁场发生装置和磁响应夹爪两部分组成,通过控制磁场方向和强度,能够在作业环境外部引导环境内部夹爪的运动和夹持(图 10a)^[140],并且可通过磁共振成像^[141-142]和超声成像^[143]等技术进行状态反馈。热响应材料制成的软夹爪可通过工作空间温度变化实现开合^[144-146],但其在工作空间内的无系留位姿变换常通过磁场控制^[147-150],如图 10b 所示。热磁响应特性使这类软体抓持机器人的运动和夹持功能独立控制,降低了控制难度和复杂度,但热响应材料易受环境温度影响且迟滞性较强,一定程度上限制了其在变温环境或高速响应工况下作业。与热响应软体抓持机器人相似,光响应无系留系统拓展了致动形式和应用环境^[151-153],也需要通过磁控的方式实现运动并携带目标转移^[154-155],如图 10c 所示。

图 10 非接触无系留软体抓持机器人

非接触无系留软体抓持机器人系统巧妙利用磁、光、热等无接触驱动技术,实现了执行系统和控制系统分离,然而受磁、光、热等作用范围的限制,这类抓持机器人始终受到无形的约束作用,难以实现大范围作业。所以非接触无系留系统是应对局部非结构环境无系留作业的有效技术途径,具有巨大的医学应用价值^[21]。

3.2 机电集成无系留系统

机电集成无系留系统主要通过零部件的集成化和小型化,实现软体抓持机器人大范围无系留作业,可以满足多个领域的应用需求。报道较为频繁的流体驱动软体抓持机器人在工作压力较低、流量较小的情况下,可通过集成迷你泵、电磁阀、电池、控制器等零部件实现无系留化,可配合操作类机器人进入更深、更高、更远的环境内完成操作任务(图 11a、11b)^[156-157]。这类抓持机器人的无系留难度与搭配对象的承载能力有关,当承载能力远高于作业需求时,便允许搭载大量的额外硬件,这使得无系留硬件集成难度大大降低(图 11c、11d)^[158-159]。现阶段全面无系留难度大的技术根源在于流体增压与控制装置体积相对较大,通过固体颗粒替代流体(图 11e)也只能解决部分软体抓持机器人的无系留问题^[123],根本技术途径依然在于高性能软体关键零部件研发。

软体抓持结构与传统刚性传动装置的巧妙结合也是软体抓持机器人无系留化的重要手段,发挥了软体结构适应性好、刚性传动成熟度高的优势。通用型软体抓持机器人(图 11f)^[130-131]是“刚”与“软”融合的典型代表,德国 Festo 公司研发的相似产品 FreeMotionHandling(图 11g)更是兼具了位姿协调能力,此外柔性机构与刚性机构的组合也拓展了这类抓持机器人的构造形式(图 11h)^[138]。

机电集成无系留软抓持机器人并不是仅仅关注无系留实现与否,更注重无系留性能的优劣,目前负重比(负载与自身重量比值)是关键的性能参数。

尽管靠剪力驱动(图 11i)^[160]或欠驱动(图 11j)^[161]的抓持机器人大大简化了抓持系统,但机动性和灵巧性受限,难以形成共性解决方案,所以具有大负重比的软体抓持机器人依然面临较多的技术挑战。

图 11 机电集成无系留软体抓持机器人

4 无系留大负载软体抓持机器人挑战

软体抓持机器人在无系留与大负载方面均得到了长足发展,然而二者的高性能融合面临着较多的技术难题,现存的无系留软体抓持机器人负载力水平大多低于 50 N,并且负重比较低。无系留大负载软体抓持机器人在基础零部件、结构设计、材料与制造等方面依然面临着诸多挑战。

4.1 软体关键零部件研发与集成

软体机器人技术发展主要集中在驱动和传感方面,软体机器人系统集成所需的零部件大多还依赖于传统刚性机器人技术积累,使得高性能软体机器人研发难度大,应用技术周期长。无系留大负载软体抓持机器人发展离不开软体专用关键零部件的研发,更需要先进的软体集成技术。软体关键零部件已取得一些创新成果,如软体泵^[162]、软体控制阀^[163-164]、柔性电子^[165]、仿生能量系统^[76],随着多个技术领域的协同攻关必将研制出理想的软体抓持机器人硬件系统。

4.2 新型软体抓持结构与高效响应机理

软体抓持机器人的“无系留”与“大负载”不能仅仅依赖于高性能的动力供给与控制系统,更需要从高效响应软抓持结构的角度进行全方位突破。现存的软抓持机器人的抓取方式主要包括控制驱动器抓取、控制刚度抓取和控制吸附抓取^[12],然而对如何提高软抓持结构的响应效率研究较少。软体高效响应结构能大幅度提高能源利用率,降低软体结构对驱动介质的响应阈值,有利于实现硬件系统的小型化和集成化,为大负载软体抓持机器人的无系留化提供先决条件。仿生技术已助力创造了多种高

性能软体抓持机器人,然而并未形成系统的软体抓持结构创成方法和高效响应优化理论技术体系,这一问题的解决将全面揭示软体结构的耦合作用机理,推动高性能无系留大负载软体抓持机器人研发,同时可推广到整个软体机器人技术领域。

4.3 高性能软体材料合成与可靠制造技术

材料与制造是软体机器人永恒的话题,一直以来都是研究的重点和难点^[1-3]。铸造、3D 打印、热封等制造技术实现了多种软体材料的结构化成形,但依然难以满足高负载、高速、极端环境作业的结构性能需求,在批量化生产方面也面临效率低、成本高的问题。近年来软体材料研究的焦点在智能材料和 3D 打印上,如何提高基础材料的性能并创造高性能的新型软体材料也是亟需解决的问题。多种软体材料复合成形能明显提高软体结构的综合性能,而复合软体材料制造工艺,尤其是高强度与高弹性材料复合,依然面临许多技术挑战。高性能大负载软体抓持机器人研发更是依赖于柔性好、强度高的软体材料和高效可靠的制造装备,解决材料与制造问题才能从技术根源上扫清软体机器人发展障碍。

5 结论

软体机器人无系留驱动技术研究的热点和难点是高性能新型软体材料的研发,能够对非接触激励条件响应的软体变形材料依然是未来研究的主要对象。在激励形式和响应结构方面已取得了丰富的成果,但运动响应的性能和实验效果距应用水平相差较多,尤其是负载力方面明显不足,所以这类材料更侧重于构建微型无系留软体抓持机器人。化学反应与流体驱动将成为现阶段构建无系留大负载软体

抓持机器人的主要技术。

软体抓持机器人负载力提升不能仅仅依靠大输出力软体驱动器,更需要聚焦到高效响应软体抓持结构上,不断创造新型抓持原理和抓持技术。负载力提升不能以高动力消耗为代价,更不能以庞大的硬件系统为依托,需要从强力驱动和高效结构综合层面全方位提升软体抓持机器人负载能力。

软体抓持机器人高性能无系留化是面临的主要难点,而大负载软体抓持机器人的高负重比无系留化更是充满挑战。构造高效响应的软体抓持结构是现阶段应对这一挑战的有效方法,要想从技术根源上攻克这一难题必须发展软体关键零部件及其材料与制造技术,这也是整个软体机器人领域的所面临的共性技术难题。

参 考 文 献

- [1] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 467-475.
- [2] LEE C, KIM M, KIM Y J, et al. Soft robot review[J]. *International Journal of Control Automation & Systems*, 2017, 15(1): 3-15.
- [3] LASCHI C, MAZZOLAI B, CIANCHETTI M. Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities[J]. *Science Robotics*, 2016, 1(1): UNSP eaah3690.
- [4] 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.
- [5] 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): 1-14.
- [6] ZOU J, LIN Y Q, JI C, et al. A reconfigurable omnidirectional soft robot based on caterpillar locomotion[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(2): 164-174.
- [7] PANG W, WANG J B, FEI Y Q. The structure, design, and closed-loop motion control of a differential drive soft robot[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(1): 71-80.
- [8] MARTINEZ R V, GLAVAN A C, KEPLINGER C, et al. Soft actuators and robots that are resistant to mechanical damage[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(20): 3003-3010.
- [9] 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.
- [10] RICH S I, WOOD R J, MAJIDI C. Untethered soft robotics[J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(2): 102-112.
- [11] PFEIFER R, LUNGARELLA M, IIDA F. The challenges ahead for bio-inspired soft robotics[J]. *Communications of the ACM*, 2012, 55(11): 76-87.
- [12] JUN S, VITO C, DARIO F, et al. Soft robotic grippers[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(29): 1707035.
- [13] 张进华, 王韬, 洪军, 等. 软体机械手研究综述[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(13): 19-28.
ZHANG Jinhua, WANG Tao, HONG Jun, et al. Review of soft-bodied manipulator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(13): 19-28.
- [14] HUGHES J, CULHA U, GIARDINA F, et al. Soft manipulators and grippers: A review[J]. *Front Robot AI*, 2016, 3: 69.
- [15] ZHAO H, O'BRIEN K, LI S, et al. Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides[J]. *Science Robotics*, 2016, 1(1): eaai7529.
- [16] SHE Y, LI C, CLEARY J, et al. Design and fabrication of a soft robotic hand with embedded actuators and sensors[J]. *Journal of Mechanisms & Robotics*, 2015, 7(2): 021007.
- [17] TERRY S, BRANCART J, LEFEBER D, et al. Self-healing soft pneumatic robots[J]. *Science Robotics*, 2017, 2(9): eaan4268.
- [18] LI Y, CHEN Y, YANG Y, et al. Passive particle jamming and its stiffening of soft robotic grippers[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(2): 446-455.
- [19] AL ABEACH L, NEFTIMEZIANI S, DAVIS S. Design of a variable stiffness soft dexterous gripper[J]. *Soft Robotics*, 2017, 4(3): 274-284.
- [20] NAGASE J, WAKIMOTO S, SATOH T, et al. Design of a variable stiffness robotic hand using pneumatic soft rubber actuators[J]. *Smart Materials and Structure*, 2011, 20(10): 105015-105023.
- [21] JANG D, JEONG J, SONG H, et al. Targeted drug delivery technology using untethered microrobots: A review[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2019, 29(5): 053002.

- [22] YIN C, WEI F, ZHAN Z, et al. Untethered micro-gripper-the dexterous hand at microscale[J]. *Biomedical Microdevices*, 2019, 21(4): 82.
- [23] YAP H K, NG H Y, YEOW CH. High-force soft printable pneumatics for soft robotic applications[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(3): 144-158.
- [24] LI H L, YAO J T, ZHOU P, et al. High-load soft grippers based on bionic winding effect[J]. *Soft Robotics*, 2019, 6(2): 276-288.
- [25] LI H L, YAO J T, ZHOU P, et al. Design and modeling of a high-load soft robotic gripper inspired by biological winding[J]. *Bioinspiration&Biomimetics*, 2020, 15(2): 026006.
- [26] LI H L, YAO J T, LIU C Y, et al. A bioinspired soft swallowing robot based on complaint guiding structure[J]. *Soft Robotics*, 2020, DOI: 10.1089/soro.2018.0154.
- [27] LI J X, DE ÁVILA B E F, GAO W, et al. Micro/nanorobots for biomedicine: Delivery, surgery, sensing, and detoxification[J]. *Science Robotics*, 2017, 2(4): eaam6431.
- [28] HU W, LUM G Z, MASTRANGELI M, et al. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion[J]. *Nature*, 2018, 554(7690): 81-85.
- [29] MIYASHITA S, GUITRON S P, LUDERSDORFER M, et al. An untethered miniature origami robot that self-folds, walks, swims, and degrades[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2015: 15278285.
- [30] ZHANG J C, DILLER E. Untethered miniature soft robots: Modeling and design of a millimeter-scale swimming magnetic sheet[J]. *Soft robotics*, 2018, 5(6): 761-776.
- [31] HOU M T, SHEN H M, JIANG G L, et al. A rolling locomotion method for untethered magnetic microrobots[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(2): 024102-024102-3.
- [32] TEMEL F Z, ERMAN A G, YESILYURT S. Characterization and modeling of biomimetic untethered robots swimming in viscous fluids inside circular channels[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(5): 1562-1573.
- [33] PARK J E, JEON J, CHO J H, et al. Magnetomotility of untethered helical soft robots[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(20): 11272-11280.
- [34] FLOYD S, PAWASHE C, SITTI M. Two-dimensional contact and noncontact micromanipulation in liquid using an untethered mobile magnetic microrobot[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(6): 1332-1342.
- [35] ICHIKAWA A, SAKUMA S, SUGITA M, et al. On-chip enucleation of an oocyte by untethered microrobots[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24(9): 095004.
- [36] FLOYD S, DILLER E, PAWASHE C, et al. Control methodologies for a heterogeneous group of untethered magnetic micro-robots[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2011, 30(13): 1553-1565.
- [37] IACOVACCI V, LUCARINI G, RICOTTI L, et al. Untethered magnetic millirobot for targeted drug delivery[J]. *Biomedical Microdevices*, 2015, 17(3): 9962.
- [38] LI J Y, LI X J, LUO T, et al. Development of a magnetic microrobot for carrying and delivering targeted cells[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(19): eaat8829.
- [39] GILTINAN J, DILLER E, SITTI M. Programmable assembly of heterogeneous microparts by an untethered mobile capillary microgripper[J]. *Lab on a Chip*, 2016, 16(22): 4445.
- [40] TASOGLU S, DILLER E, GUVEN S, et al. Untethered micro-robotic coding of three-dimensional material composition[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3124.
- [41] BOYVAT M, KOH J S, WOOD R J, et al. Addressable wireless actuation for multijoint folding robots and devices[J]. *Science Robotics*, 2017, 2(8): eaan1544.
- [42] KIM Y, PARADA G A, LIU S D, et al. Ferromagnetic soft continuum robots[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(33): eaax7329.
- [43] LEE W, NAM J, KIM J, et al. Effective locomotion and precise unclogging motion of an untethered flexible-legged magnetic robot for vascular diseases[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(2): 1388-1397.
- [44] YOONHO K, HYUNWOO Y, RUIKE Z, et al. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials[J]. *Nature*, 2018, 558(7709): 274-279.
- [45] ALASLI A, CETIN L, AKCURA N, et al. Electromagnet design for untethered actuation system mounted on robotic manipulator[J]. *Sensors and Actuators A*, 2019, 28: 550-565.
- [46] MAHONEY A W, ABBOTT J J. Five-degree-of-freedom manipulation of an untethered magnetic device in fluid using a single permanent magnet with application in

- stomach capsule endoscopy[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2016, 35(1-3): 129-147.
- [47] MAHONEY A W, ABBOTT J J. Generating rotating magnetic fields with a single permanent magnet for propulsion of untethered magnetic devices in a lumen[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(2): 411-420.
- [48] GUPTA U, QIN L, WANG Y Z, et al. Soft robots based on dielectric elastomer actuators: A review[J]. *Bioinspiration&Biomimetics*, 2019, 28: 103002.
- [49] LI J, LIU L, LIU Y, et al. Dielectric elastomer spring-roll bending actuators: Applications in soft Robotics and design[J]. *Soft Robotics*, 2019, 6(1): 69-81.
- [50] SHOLL N, MOSS W M K, MOHSENI K. A soft end effector inspired by cephalopod suckers and augmented by a dielectric elastomer actuator[J]. *Soft Robotics*, 2019, 6(3): 356-367.
- [51] CHENG T Y, LI G, LIANG Y M, et al. Untethered soft robotic jellyfish[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(1): 015019.
- [52] CAO J, QIN L, LEE H P, et al. Development of a soft untethered robot using artificial muscle actuators[C]// *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. 2017, 10163: UNSP 101631X.
- [53] 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.
- [54] JI X B, LIU X C, CACUCCIOLO V, et al. An autonomous untethered fast soft robotic insect driven by low-voltage dielectric elastomer actuators[J]. *Science Robotics*, 2019, 4: eaaz6451.
- [55] JAFFERIS N T, HELBLING E F, KARPELSON M, et al. Untethered flight of an insect-sized flapping-wing microscale aerial vehicle[J]. *Nature*, 2019, 570(7762): 491-+.
- [56] CACUCCIOLO V, SHIGEMUNE H, CIANCHETTI M, et al. Conduction electrohydrodynamics with mobile electrodes: A novel actuation system for untethered robots[J]. *Advanced Science*, 2017, 4(9): 1600495.
- [57] LI X, XIE J, TANG S Y, et al. A controllable untethered vehicle driven by electrically actuated liquid metal droplets[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 15(5): 2535-2543.
- [58] BAYTEKIN B, CEZAN S D, BAYTEKIN H T, et al. Artificial heliotropism and nyctinasty based on optomechanical feedback and no electronics[J]. *Soft Robot*, 2017, 5(1): 93-98.
- [59] COARAL W, ROSSI C, CURET O M, et al. Design and assessment of a flexible fish robot actuated by shape memory alloys[J]. *Bioinspiration&Biomimetics*, 2018, 13: 056009.
- [60] HUANG X N, KUMAR K, JAWED M K, et al. Chasing biomimetic locomotion speeds: Creating untethered soft robots with shape memory alloy actuators[J]. *Science Robotics*, 2018, 3: eaau7557.
- [61] ONGARO F, JIN Q R, DE CUMIS U S, et al. Force characterization and analysis of thin film actuators for untethered microdevices[J]. *API Advances*, 2019, 9(5): 055011.
- [62] CHEN T, BILAL O R, SHEA K, et al. Harnessing bistability for directional propulsion of soft, untethered robots[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(22): 5698-5702.
- [63] YUAN J K, NERI W, ZAKRI C, et al. Shape memory nanocomposite fibers for untethered high-energy micro-engines[J]. *Science*, 2019, 365: 155-158.
- [64] WANG W. Mechanical assembly of thermo-responsive polymer-based untethered shape-morphing structures[J]. *Macromol. Mater. Eng.* 2019, 305(1): 201900568.
- [65] KOTIKIAN A, MCMAHAN C, DAVIDSON E C, et al. Untethered soft robotic matter with passive control of shape morphing and propulsion[J]. *Science Robotics*, 2019, 4: eaax7044.
- [66] AHN C Y, LIANG X D, CAI H Q. Bioinspired design of light-powered crawling, squeezing, and jumping untethered soft robot[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(7): 1900185.
- [67] 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.
- [68] ROGOZ M, ZENG H, XUAN C, et al. Light-driven soft robot mimics caterpillar locomotion in natural scale[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(11): 1689-1694.
- [69] ZENG H, WANI O M, WASYL CZY P, et al. Self-regulating iris based on light-actuated liquid crystal elastomer[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(30): 1701814.
- [70] PALAGI S, MARK A G, REIGH S Y, et al. Structured light enables biomimetic swimming and versatile locomotion of photoresponsive soft microrobots[J].

- Nature Materials, 2016, 15: 647-653.
- [71] FRANCIS W, DUNNE A, DELANEY C, et al. Spiropyran based hydrogels actuators-walking in the light[J]. Sensors and Actuators B Chemical, 2017, 250: 608-616.
- [72] SHIN B J, HA J H, LEE M, et al. Hygrobot: A self-locomotive ratcheted actuator powered by environmental humidity[J]. Science Robotics, 2018, 3: eaar2629.
- [73] MARCHESE A D, KATZSCHMANN R K, RUS D. A recipe for soft fluidic elastomer robots[J]. Soft Robotics, 2015, 2(1): 7-25.
- [74] MARCHESE A D, ONAL C D, RUS D. Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators[J]. Soft Robotics, 2014, 1(1): 75-87.
- [75] WEN L, REN Z, SANTO V D, et al. Understanding fish linear acceleration using an undulatory biorobotic model with soft fluidic elastomer actuated morphing median fins[J]. Soft Robotics, 2018, 5(4): 375-388.
- [76] AUBIN C A, CHOUDHURY S, JEERCH R, et al. Electrolytic vascular systems for energy-dense robots[J]. Nature, 2019, 571: 51-57.
- [77] TOLLEY M T, SHEPHERD R F, MOSADEGH B, et al. A resilient, untethered soft robot[J]. Soft Robotics, 2014, 1(3): 213-223.
- [78] MITCHELL S K, WANG X G, ACOME E, et al. An easy-to-implement toolkit to create versatile and high-performance HASEL actuators for untethered soft robots[J]. Advanced Science, 2019, 6(14): 1900178.
- [79] WEHNER M, TOLLEY M T, et al. Pneumatic energy sources for autonomous and wearable soft robotics[J]. Soft Robotics, 2014, 1(4): 263-274.
- [80] TOLLEY M T, SHEPHERD R F, KARPELSON M, et al. An untethered jumping soft robot[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. IEEE, 2014, DOI: 10.1109/IROS.2014.6942615
- [81] LOEPFE M, SCHUMACHER C M, LUSTENBERGER U B, et al. An untethered, jumping roly-poly soft robot driven by combustion[J]. Soft Robotics, 2015, 2(1): 33-41.
- [82] 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.
- [83] 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: 451-455.
- [84] CHEN L Y, CHEN W J, XUE Y T, et al. An untethered soft chemo-mechanical robot with composite structure and optimized control[J]. Extreme Mechanics Letters, 2019, 27: 27-33.
- [85] FEINBERG A W, FEIGEL A, SEVKOPLYAS S S, et al. Muscular thin films for building actuators and powering devices[J]. Science, 2007, 317: 1366-1370.
- [86] PATINO T, MESTRE R, SANCHEZ S. Miniaturized soft bio-hybrid robotics: A step forward into healthcare applications[J]. Lab on a Chip, 2016, 16(19): 3626-3630.
- [87] KANG H W, LEE S J, KO I K, et al. A 3D bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity[J]. Nature Biotechnology, 2016, 34: 312-319.
- [88] CVETKOVIC C, RAMAN R, CHAN V, et al. Three-dimensionally printed biological machines powered by skeletal muscle[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(28): 10125-10130.
- [89] RAMAN R, CVETKOVIC C, UZEL S G M, et al. Optogenetic skeletal muscle-powered adaptive biological machines[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(13): 3497-3502.
- [90] NAWROTH J C, LEE H, FEINBERG A W, et al. A tissue-engineered jellyfish with biomimetic propulsion[J]. Nature Biotechnology, 2012, 30(8): 792-797.
- [91] PARK S J, GAZZOLA M, PARK K S, et al. Phototactic guidance of a tissue-engineered soft-robotic ray[J]. Science, 2016, 353(6295): 158-162.
- [92] LEONARDO C, GALLOWAY K C, SIDDHARTH S, et al. Exploiting textile mechanical anisotropy for fabric-based pneumatic actuators[J]. Soft Robotics, 2018, 5(5): 662-674.
- [93] 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.
- [94] WANG Z, POLYGERINOS P, OVERVELDE J T B, et al. Interaction forces of soft fiber reinforced bending actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(2): 717-727.
- [95] BISHOP-MOSER J, KRISHNAN G, KIM C, et al. Design of soft robotic actuators using fluid-filled fiber-reinforced elastomeric enclosures in parallel combinations[C]// 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent

- Robots and Systems. IEEE, 2012, DOI: 10.1109/IROS.2012.6385966.
- [96] SEDAL A, BRUDER D, BISHOP-MOSER J, et al. A continuum model for fiber-reinforced soft robot actuators[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2018, 10(2): 024501.
- [97] CONNOLLY F, WALSH C J, BERTOLDI K. Automatic design of fiber-reinforced soft actuators for trajectory matching[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(1): 51-56.
- [98] RAINIER N, MANUEL D R, CHEN P C Y, et al. A reconfigurable pneumatic bending actuator with replaceable inflation modules[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(3): 304-317.
- [99] FANG J, YUAN J P, WANG M M, et al. Novel accordion-inspired foldable pneumatic actuators for knee assistive devices[J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(1): 95-108.
- [100] FELT W. Folded-tube soft pneumatic actuators for bending[J]. *Soft Robotics*, 2019, 6(2): 174-183.
- [101] SUN Z S, GUO Z H, TANG W. Design of wearable hand rehabilitation glove with soft hoop-reinforced pneumatic actuator[J]. *J. Cent. South Univ.*, 2019, 26: 106-119.
- [102] FU H, HO J, LEE K, et al. Interfacing soft and hard: A spring reinforced actuator[J]. 2020, 7(1): 44-58.
- [103] PAEZ L, AGRWAL G, PAIK J. Design and analysis of a soft pneumatic actuator with origami shell reinforcement[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(3): 109-119.
- [104] ROBERTSON M A, SADEGHI H, FLOREZ J M, et al. Soft pneumatic actuator fascicles for high force and reliability[J]. *Soft Robotics*, 2017, 4(1): 23-32.
- [105] YI J, CHEN X, SONG C, et al. Fiber-reinforced origamic robotic actuator[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(1): 81-92.
- [106] ZOLFAGHARIAN A, KOUZANI A Z, KHOO S Y, et al. Evolution of 3D printed soft actuators[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 250: 258-272.
- [107] BYRNE O, COULTER F, GLYNN M, et al. Additive manufacture of composite soft pneumatic actuators[J]. *Soft robotics*, 2018, 5(6): 726-736.
- [108] DU P C, CHEN T, TIBBITS S, et al. Design and computational modeling of a 3D printed pneumatic toolkit for soft robotics[J]. *Soft Robotics*, 2019, 6(5): 657-663.
- [109] ROBERTSON M A, PAIK J. New soft robots really suck: Vacuum-powered systems empower diverse capabilities[J]. *Science Robotics*, 2017, 2: eaan6357.
- [110] LI S, 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.
- [111] LEE J G, RODRIGUE H. Origami-based vacuum pneumatic artificial muscles with large contraction ratios[J]. *Soft Robotics*, 2018, 6(1): 109-117.
- [112] TAWK C, IN HET PANHUIS M, SPINKS G M, et al. Bioinspired 3D printable soft vacuum actuators for locomotion robots, grippers and artificial muscles[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(6): 685-694.
- [113] JIANG P, YANG Y D, CHEN M Z Q, et al. A variable stiffness gripper based on differential drive particle jamming[J]. *Bioinspiration & biomimetics*, 2019, 14: 036009.
- [114] JIANG A, RANZANI T, GERBONI G, et al. Robotic granular jamming: Does the membrane matter[J]. *Soft Robotics*, 2014, 1(3): 192-201.
- [115] BAMOTRA A, WALIA P, PRITUJA A V, et al. Layer-jamming suction grippers with variable stiffness[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2019, 11: 035003.
- [116] 刘晨, 李卓远, 陈花玲. 一种新型柔性静电吸附变刚度结构[J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(12): 23-29.
- LIU Chen, LI Zhuoyuan, CHEN Hualing. A novel flexible electrostatic adsorption variable stiffness structure[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(12): 23-29.
- [117] WANG T, ZHANG J, LI Y, et al. Electrostatic layer jamming variable stiffness for soft robotics[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(2): 424-433.
- [118] ABEACH L A T A, NEFTI-MEZIANI S, DAVIS S. Design of a variable stiffness soft dexterous gripper[J]. *Soft Robotics*, 2017, 4(3): 274-284.
- [119] HASSANIN A F, SAMIA N M, THEO T, et al. The design and mathematical model of a novel variable stiffness extensor-contractor pneumatic artificial muscle[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(5): 576-591.
- [120] YOSHIDA S, MORIMOTO Y, ZHENG LY, et al. Multipoint bending and shape retention of a pneumatic bending actuator by a variable stiffness endoskeleton[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(6): 718-725.
- [121] ZHANG Y F, ZHANG N B, HINGORANI H, et al. Fast-response, stiffness-tunable soft actuator by hybrid multimaterial 3D printing[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29(15): 1806698.

- [122] LI Y T, CHEN Y H, YANG Y, et al. Passive particle jamming and its stiffening of soft robotic grippers[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(2): 446-455.
- [123] LI Y, CHEN Y, YANG Y, et al. Soft robotic grippers based on particle transmission[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 24(3): 969-978.
- [124] WEI Y, CHEN Y H, REN T, et al. A novel, variable stiffness robotic gripper based on integrated soft actuating and particle jamming[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(3): 134-143.
- [125] ZHAO Y Z, SHAN Y, GUO K D, et al. A soft continuum robot, with a large variable stiffness range, based on jamming[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2019, 14(6): 066007.
- [126] WANG W, YU C Y, SERRANO P A A, et al. Shape memory alloy-based soft finger with changeable bending length using targeted variable stiffness[J]. *Soft Robotics*, 2019, DOI: 10.1089/soro.2018.0166.
- [127] BROWN E, RODENBERG N, AMEND J, et al. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(44): 18809-18814.
- [128] AMEND J R, BROWN E M, RODENBERG N, et al. A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(2): 341-350.
- [129] AMEND J, CHENG N, FAKHOURI S, et al. Soft robotics commercialization: Jamming grippers from research to product[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(4): 213-222.
- [130] DANG Y, STOMMEL M, CHENG L K, et al. A soft ring-shaped actuator for radial contracting deformation: Design and modeling[J]. *Soft Robotics*, 2019, 6(4): 444-454.
- [131] ZHU T, YANG H, ZHANG W. A spherical self-adaptive gripper with shrinking of an elastic membrane[C]// *International Conference on Advanced Robotics & Mechatronics*. IEEE, 2016: 512-517.
- [132] KRAHN J, FABBRO F, MENON C. A soft-touch gripper for grasping delicate objects[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(3): 1276-1286.
- [133] QIAO S L, LIU R Q, GUO H W, et al. Configuration design of an under-actuated robotic hand based on maximum grasping space[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 31(2): 45-53.
- [134] MISHRA A K, DOTTORE E D, SADEGHI A, et al. SIMBA: Tendon-driven modular continuum arm with soft reconfigurable gripper[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2017, 4: doi: 10.3389/frobt.2017.00004.
- [135] WHITE E L, CASE J C, KRAMER-BOTTIGLIO R. A soft parallel kinematic mechanism[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(1): 36-53.
- [136] MANTI M, HASSAN T, PASSETTI G, et al. A bioinspired soft robotic gripper for adaptable and effective grasping[J]. *Soft Robotics*, 2015, 2(3): 107-116.
- [137] CASE J C, WHITE E L, SUNSPIRAL V, et al. Reducing actuator requirements in continuum robots through optimized cable routing[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(1): 109-118.
- [138] LIU C H, CHEN T L, CHIU C H, et al. Optimal design of a soft robotic gripper for grasping unknown objects[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(4): 452-465.
- [139] LIU C H, HUANG G F, CHIU C H, et al. Topology synthesis and optimal design of an adaptive compliant gripper to maximize output displacement[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2017, 90(5): 1-18.
- [140] DILLER E, SITTI M. Three-dimensional programmable assembly by untethered magnetic robotic micro-grippers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(28): 4397-4404.
- [141] MATHIEU J B, MATEL S. Steering of aggregating magnetic microparticles using propulsion gradients coils in an MRI scanner[J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2010, 63(5): 1336-1345.
- [142] MARTEL S, FELFOUL O, MATHIEU J B, et al. MRI-based medical nanorobotic platform for the control of magnetic nanoparticles and flagellated bacteria for target interventions in human capillaries[J]. *Int. J. of Robotic Research*, 2009, 28(9): 1169-1182.
- [143] SCHEGGI S, CHANDRASEKAR K K T, YOON C K, et al. Magnetic motion control and planning of untethered soft grippers using ultrasound image feedback[C]// *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2017: 6156-6161.
- [144] ONGARO F, YOON C K, VAN DEN BRINK F, et al. Control of untethered soft grippers for pick-and-place tasks[C]// *6th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, IEEE, 2016: 299-304.

- [145] GULTEPE E, RANDHAWA J S, KADAM S, et al. Biopsy with thermally-responsive untethered microtools[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(4): 514-519.
- [146] ONGARO F, SCHEGGI S, YOON C K, et al. Autonomous planning and control of soft untethered grippers in unstructured environments[J]. *Journal of Micro-Bio Robotics*, 2017, 12(1-4): 45-52.
- [147] PACCHIEROTTI C, ONGARO F, VAN DEN BRINK F, et al. Steering and control of miniaturized untethered soft magnetic grippers with haptic assistance[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(1): 290-306.
- [148] KOBAYASHI K, YOON C K, OH S H, et al. Biodegradable thermomagnetically responsive soft untethered grippers[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(1): 151-159.
- [149] SCHEGGI S, YOON C K, GHOSH A, et al. A GPU-accelerated model-based tracker for untethered submillimeter grippers[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 103: 111-121.
- [150] YIM S, GULTEPE E, GRACIAS D H, et al. Biopsy using a magnetic capsule endoscope carrying, releasing, and retrieving untethered microgrippers[J]. *IEEE Transactions on Bio-medical Engineering*, 2014, 61(2): 513-521.
- [151] QIAN X J, CHEN Q M, YANG Y, et al. Untethered recyclable tubular actuators with versatile locomotion for soft continuum robots[J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(29): 1801103.
- [152] AMJADI M, SITTI M. High-performance multiresponsive paper actuators[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(11): 10202-10210.
- [153] WANI O M, ZENG H, PRIIMAGI A. A light-driven artificial flytrap[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15546.
- [154] DA C M P, FOELEN Y, VAN RAAK R J H, et al. An untethered magnetic- and light-responsive rotary gripper: Shedding light on photoresponsive liquid crystal actuators[J]. *Adv. Optical Mater.*, 2019, 7(7): 1801643.
- [155] DA CUNHA M P, FOELEN Y, ENGELS T A P, et al. On untethered, dual magneto-and photoresponsive liquid crystal bilayer actuators showing bending and rotating motion[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(7): 1801604.
- [156] LI Y Q, CHEN Y H, REN T, et al. Precharged pneumatic soft actuators and their applications to untethered soft robots[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(5): 567-575.
- [157] SINATRA N R, TEEPLE C B, VOGT D M, et al. Ultragentle manipulation of delicate structures using a soft robotic gripper[J]. *Science Robotics*, 2019, 4: eaax5425.
- [158] CHENG N, AMEND J, FARRELL T, et al. Prosthetic jamming terminal device: A case study of untethered soft robotics[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(4): 205-212.
- [159] GALLOWAY K C, BECHER K P, PHILLIPS B, et al. Soft robotic grippers for biological sampling on deep reefs[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(1): 23-33.
- [160] HAWKES E W, JIANG H, CHISTENSEN D L, et al. Grasping without squeezing: Design and modeling of shear-activated grippers[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 34(2): 303-316.
- [161] JUNG G P, KOH J S, CHO K J. Underactuated adaptive gripper using flexural buckling[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, 29(6): 1396-1407.
- [162] CACUCCIOLO V, SHINTAKE J, KUWAJIMA Y, et al. Stretchable pumps for soft machines[J]. *Nature*, 2019, 572: 516-519.
- [163] ROTHEMUND P, AINLA A, BELDING L, et al. A soft, bistable valve for autonomous control of soft actuators[J]. *Science Robotics*, 2018, 3: eaar7986.
- [164] TONAZZINI A, SADEGHI A, MAZZOLAI B. Electrorheological valves for flexible fluidic actuators[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(1): 34-41.
- [165] PARK S, VOSGUERICHIAN M, BAO Z. A review of fabrication and applications of carbon nanotube film-based flexible electronics[J]. *Nanoscale*, 2013, 5(5): 1727.

作者简介: 李海利, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为仿生与软体机器人技术。

E-mail: 1050985578@qq.com

姚建涛(通信作者), 男, 1980 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为特种机器人、仿生与软体机器人技术。

E-mail: jtyao@ysu.edu.cn