

DOI : 10.3901/JME.2017.13.001

软体机器人：结构、驱动、传感与控制*

王田苗¹ 郝雨飞¹ 杨兴帮^{1,2} 文 力¹

(1. 北京航空航天大学机械工程与自动化学院 北京 100191 ;

2. 北京航空航天大学生物与医学工程学院 北京 100191)

摘要：软体机器人由软材料加工而成，自身可连续变形，与刚性机器人相比具有更高的柔顺性、安全性和适应性，在人机交互、复杂易碎品抓持和狭小空间作业等方面具有不可比拟的优势。综述软体机器人的发展历程，将软体机器人归为传统绳索驱动/气动肌肉机器人、超弹性材料软体机器人和智能材料软体机器人三大类。从仿生结构和仿生运动、驱动与加工、传感与控制三个方面对软体机器人的相关科学问题以及存在的技术难点进行总结与分析。分析了软体机器人在仿生结构、抓持作业和医疗康复等领域潜在的应用价值。对软体机器人目前的发展现状和存在的关键科学难点进行了系统的总结，并得出刚柔耦合、可变刚度和驱动传感控制一体化等研究方向可能是未来软体机器人研究新的突破点。

关键词：软体仿生机器人；软体抓持器；可变刚度；驱动传感控制一体化

中图分类号：TP24

Soft Robotics : Structure, Actuation, Sensing and Control

WANG Tianmiao¹ HAO Yufei¹ YANG Xingbang^{1,2} WEN Li¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191;

2. School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract : Soft robots primarily consist of soft materials which can generate continuous deformation. Soft robots are considered to be safer, more adaptable and compliant than the rigid robots. These advantages lead them to have potential applications in the human-robot interaction, grasping complex and fragile objects, and navigate through narrow space for operation tasks. In the review paper, the soft robots have been divided into three categories: the cable-driven and traditional pneumatic soft robots, the hyperelastic material soft robots, and the smart material soft robots. While from the scientific perspective, the principal challenges of the soft robotics are summarized from the following three aspects: the structure and locomotion, the actuation and fabrication, as well as the sensing and control. The potential applications of the soft robots in areas including manipulation, medical and wearable devices were also reviewed. In the end, the variable stiffness, the integration of actuation sensing and control of soft robots are proposed as the promising potential research directions.

Key words : soft robotics ; gripper ; variable stiffness ; integration of actuation sensing and control

0 前言

传统机器人的研究以刚性结构为主，在工业、医疗和特种等诸多领域已经有了广泛的积累和应用。但其结构复杂、灵活度有限、安全性和适应性较差^[1]，在一些特殊的应用中，如复杂易碎物体抓持、人机交互和狭窄空间作业等具有极大的挑战。近期，随着 3D 打印技术和新型智能材料的发展，对机器人系统的研究有了突破性的进展并衍生出一门新的学科——软体机器人。软体机器人本体采用软材料或柔性材料加工而成，可连续变形，从原理

上具有无限自由度，自身良好的安全性和柔顺性弥补了刚性机器人的不足。如软体机器人可以大幅度弯曲、扭转和伸缩，可在有限空间下作业，如微创腹腔镜手术^[2]和灾难救援^[3]等；自身可以连续变形，在仿生结构^[4-5]和仿生运动^[6-7]方面可以更好地模仿生物原型；可以根据周围的环境改变自身的形状和颜色等，在复杂易碎物体抓持^[8-9]，野外极端环境下行走^[10]和伪装逃生^[11]等方面具有极大的应用前景。纵观软体机器人的发展历程，得出软体机器人的研究主要有三大分支：① 以传统气动/线缆驱动为主的研究，如德国 Festo 的象鼻机器人^[12]和气动肌肉^[4, 13]等，这方面的研究已有几十年的历史，趋于成熟；② 以美国哈佛大学为首，以超弹性硅胶材料作为本体材料，结合最新 3D 打印技术的研究^[14-15]，这类

* 国家自然科学基金重点(61633004)和国家自然科学基金青年基金(61403012)资助项目。20160908 收到初稿，20170207 收到修改稿

机器人多是气动驱动, 承压小, 变形大, 运动灵活, 是软体机器人最热门的一个研究分支; ③ 利用智能材料, 如介电弹性体(Dielectric elastomer, DE)^[16-17]、导电聚合物(Electro active polymer, EAP)^[18-19]、形状记忆合金(Shape memory alloy, SMA)^[20]、形状记忆聚合物(Shape memory polymer, SMP)^[21]等在外界物理场驱动下变形而产生运动的研究, 这是智能材料在软体机器人领域的一个新应用, 在微小型机器人领域具有很大的前景。

软体机器人的发展同时也面临着很多困难和挑战: 新的仿生结构和智能材料对加工工艺提出了更高的要求, 如何高效快速地加工出符合特定需求的本体结构是一个急需解决的难题; 可变形和高度的柔顺性使得传统的传感器如编码器、电位计和刚性力触觉传感器等很难集成到软体机器人上, 因此亟待研发新型的可相容、高精度并且不影响软体机器人机械特性的可变形传感器; 软体机器人自身几何结构复杂且材料具有大变形非线性特性, 这对软体机器人的运动学和动力学, 尤其是逆运动学的建模和控制带来了极大的困难, 急需建立新的理论和建模方法。本文将依据软体机器人的三大分支, 从仿生结构与运动、驱动与加工、传感与控制以及应用领域等方面对软体机器人近期的研究现状展开论述, 并对软体机器人未来的发展趋势和研究方向做出展望。

1 仿生结构与运动

1.1 仿生结构

生物软组织和结构一直是科学家们研究和学习的对象。生物肌肉通过肌纤维的收缩带动骨骼运动, 气动人工肌肉^[22-23]就是模仿生物肌肉而研发的。这种驱动器是一种外套编织网的弹性橡胶密封结构, 在高压下通过改变编织网的绕线方向可以实现伸长、收缩或者弯曲运动^[24-25], 将不同类型的人工肌肉并联组合, 可以产生更为复杂的三维弯曲和扭转运动^[26-29]。气动肌肉在机器人领域已有了广泛的应用^[4]。但受橡胶材料弹性模量的限制, 这种结构运动幅度较小。

利用超弹性硅胶材料的软体机器人因自身材料可以伸长数百倍, 从而可以产生极大的变形。目前这种结构主要有两大类: 流体弹性驱动器(FEA)和纤维增强驱动器。流体弹性驱动器因高延展性、高适应性和低能耗^[30]等优势受到广泛关注。这种驱动器一般由两部分组成: 内嵌气道网络的可延展部分和不可延展的限制层(图 1a)。在高压下, 通过限

制层限制驱动器在某个方向变形从而产生弯曲运动^[5]。改变驱动器内部气道的形状和排布方式或者采用智能材料作为限制层, 可以实现更为复杂的双向弯曲^[21, 31]、三维弯曲、伸长和扭转^[32]等运动。该驱动器在抓持^[8, 33]、仿生机器人^[6, 34-35]、医疗机器人^[2]等领域都得到了应用。纤维增强驱动器是一种类似静水骨骼的仿生结构。这种结构一般有弹性密封腔、纤维强化层和纤维限制层三部分组成^[36](图 1b), 通过改变纤维线的缠绕方式和数量或者将多种驱动器并联组合, 可以实现轴向伸长、径向膨胀、扭曲和弯曲等动作或多种动作的组合^[37-38]。目前这种驱动器在仿生机器人^[39]、康复机器人^[40]等领域得到了应用。在智能材料方面, 学者们通过将形状记忆合金(图 1c)、形状记忆聚合物、介电弹性体(图 1d)等材料加工成不同的结构, 在外界物理场的作用下也可以实现弯曲^[17]甚至复杂的三维运动^[18, 20]。

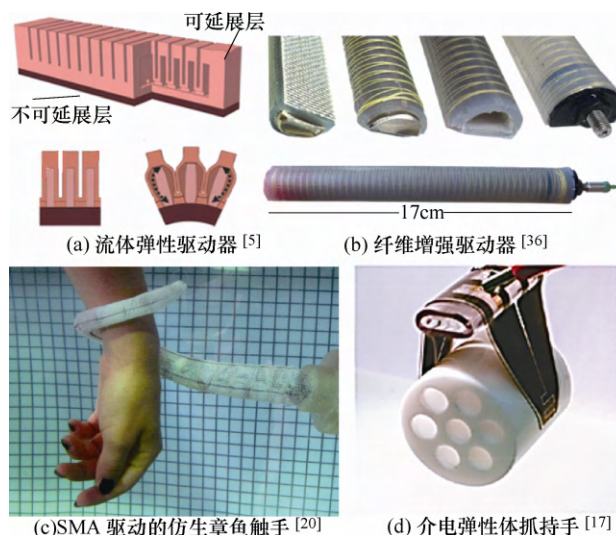


图 1 几种软体机器人仿生结构

相比刚性结构, 软体机器人结构主要是利用材料的变形特性, 将超弹性材料或智能材料通过结构设计, 改变材料的变形方向从而产生特定运动。刚性机器人自由度越多, 结构越复杂。而软体机器人只要改变材料和结构就可以产生复杂的运动, 设计简单且运动灵活。但是目前软体机器人的结构需要通过试验进行验证并优化, 周期长, 成本高。新的将材料的物理性质和本体结构相结合的仿真设计软件成为迫切的需求。

1.2 仿生运动

生物特别是软体动物为软体机器人的设计提供了灵感, 而软体机器人的研究也推进了仿生机器人的发展。软体机器人已实现了腿式爬行、快速跳跃、鱼形游动、蠕动和滚动等多种仿生运动, 进一步加强了人类对软体组织和软体结构等的生物运动

学与力能学的理解。软体机器人技术在仿生机器人领域较早地应用是利用气动肌肉来取代电机驱动,例如 Festo 公司设计的仿人类手臂 Airic's_arm,通过 30 个气动肌腱控制人工骨骼结构,实现了对人类手臂结构的高度仿真。但这类机器人只是采用软体驱动器,本体结构还多为刚性。相比之下该公司的象鼻机器人采用气动驱动的方式实现了机器人本体的连续变形,提高了整体的柔顺性和安全性,为软体机器人的发展提供了新的契机。

基于超弹性材料的仿生软体机器人可以向生物体一样改变自身的形状、刚度与运动模式,从而更加高效、安全地与自然界进行交互,为仿生机器人的发展提供了新的发展思路(图 2)。早在 1991 年,日本东芝公司和横滨国立大学合作研发了一种三通道的纤维驱动器,该驱动器实现了伸长、弯曲和扭曲等基本动作,在工业抓持和腿式移动机器人上得到了很好的验证^[41](图 2a)。2007 年日本冈山大学和大阪大学合作,利用纤维增强驱动器研发了一种蝠

鲐机器人,仅仅通过控制两个驱动器的弯曲就可以在水里游动^[42](图 2b)。2011 年美国哈佛大学 WHITESIDES 课题组研发了基于 FEA 的气动四足软体机器人,通过有序地驱动五个驱动器可以产生爬行和起伏两种运动模式^[35](图 2c)。该机器人可以在冰雪、炭火等极端环境下作业,并且可以承受汽车碾压等巨大压力^[10]。但为了搭载驱动控制单元,机器人本体较为庞大。2014 年美国 MIT 的 RUS 课题组用 FEA 作为鱼尾驱动研发了一种自主游动的软体机器人鱼,将能源、驱动和控制集成一体,实现了水下自由游动和快速逃逸^[6](图 2d)。2015 年哈佛大学的 WOOD 课题组利用多材料 3D 打印技术研制了一种弹跳机器人,通过将不同刚度梯度的材料组合到一起,该机器人既保证了与刚性驱动部件的可靠结合,又提高了自身的跳跃性能^[15](图 2e)。同时该机器人采用爆破能来驱动,虽然不可控,但是摆脱了传统气缸驱动的束缚,为机器人的小型化设计提供了新的方案。

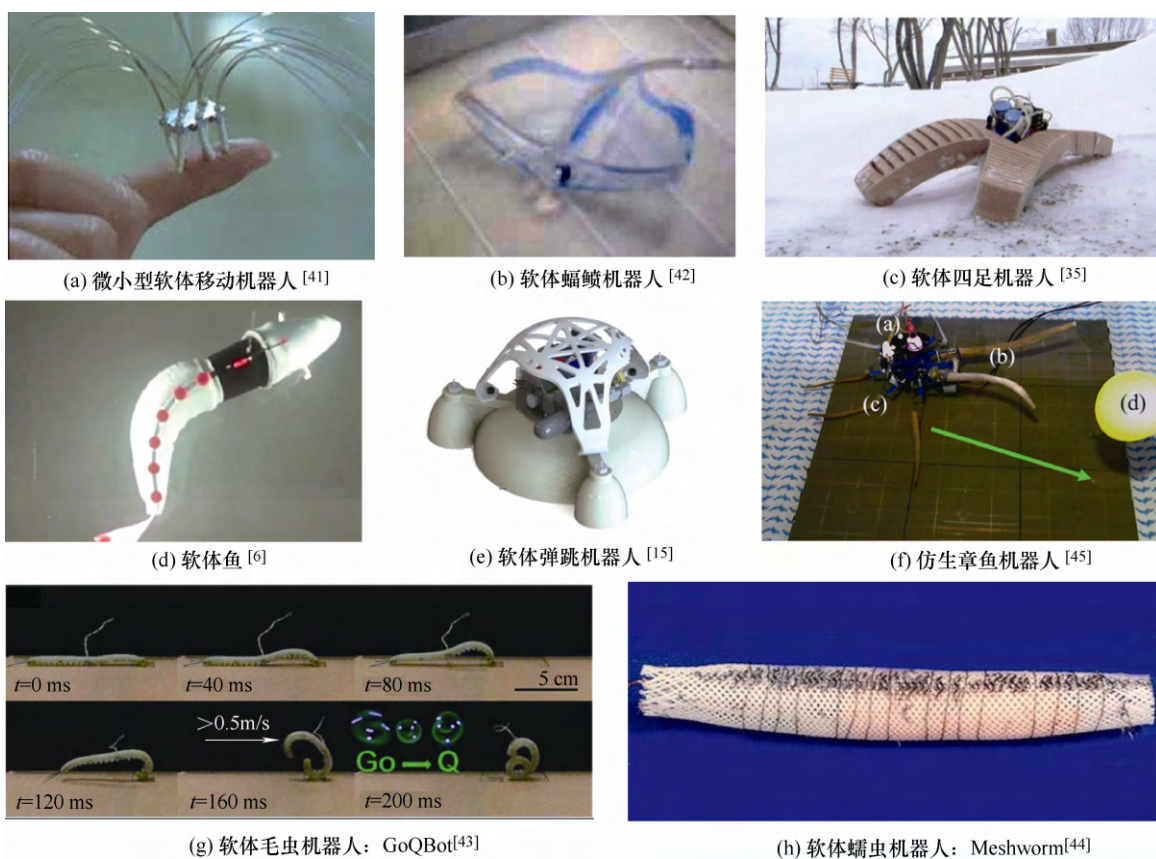


图 2 几种典型的仿生软体机器人

了毛虫快速滚动的运动机理(图 2g)。2013 年美国 MIT 的 RUS 课题组将 SMA 编织成网状结构研发了一种仿生蠕虫机器人 Meshworm,不但实现了蠕虫动作,还具有很强的抗冲击性能^[44](图 2h)。2015 年意大利仿生机器人实验室的 MAZZOLAI 课题组利

了毛虫快速滚动的运动机理(图 2g)。2013 年美国 MIT 的 RUS 课题组将 SMA 编织成网状结构研发了一种仿生蠕虫机器人 Meshworm,不但实现了蠕虫动作,还具有很强的抗冲击性能^[44](图 2h)。2015 年意大利仿生机器人实验室的 MAZZOLAI 课题组利

用 SMA 和软材料相结合研发了一种多臂章鱼机器人, 可以像生物一样在水中行走, 还能抓取各种形状和大小的物体^[45](图 2f)。

与刚性仿生机器人相比, 软体仿生机器人不但在功能上模仿生物体, 在材料和结构上也更贴近生物体。从类生物材料和结构上对仿生机器人进行研究是刚性机器人很难完成的, 这比功能上的仿生更能揭示生物体的运动学和力学特性。并且类生物材料和结构上的仿生可以使机器人像生物体一样思考和决策, 衍生新的仿生机器人算法, 使仿生机器人更加智能化。

2 驱动与加工

2.1 驱动方式

针对软体机器人的三大分支, 软体机器人的驱动大致也可以分为三种: 基于线缆变长度的驱动、基于流体的变压驱动和基于智能材料变形的驱动。基于线缆的驱动在传统柔性机器人和欠驱动机器人中被广泛应用^[46], 其基本原理是将线缆穿过机械本体上的固定点, 通过在根部拉动线缆, 在固定点产生一定的弯矩, 从而使本体运动。部分学者将这种驱动方式用于软体机器人, 在软体手^[47](图 3a)和连续体机器人^[48]等方向进行了很好的尝试。但是线缆是由电动机和传动机构来驱动的, 驱动系统复杂庞大, 很难小型化和集成化。

基于流体的变压驱动根据选用的介质可以分为液动和气动。液体具有很好的不可压缩性, 响应频率高, 在没有泄漏的情况下不会损耗, 因此在软体机器人驱动中有很好的应用前景^[40, 49]。但因其质量不可忽略, 其重力效应会影响软体机器人的建模和控制。气动因其介质重量轻、来源广、无污染等优点被广泛应用于软体机器人。传统的实现方式是利用压缩气泵来储气, 利用电磁阀来改变气流方向, 这种方式除了驱动气动肌肉和象鼻机器人外, 在超弹性硅胶材料机器人中也有应用。但其体积庞大, 耗气量大, 极大限制了软体机器人在非结构环境下的应用。为了提高软体机器人的应用范围, 学者们在气动系统上做了很多的改进。如利用电池给微型气泵供电的集成化驱动系统, 使仿生软体机器人摆脱了能源的束缚, 可以在野外自主移动^[10]。利用直线电动机或电动推杆直接驱动汽缸, 在提高了气体利用率的同时, 大大缩短软体机器人的响应时间^[50-51](图 3b)。部分学者甚至利用化学反应来驱动。如利用甲烷或者丁烷瞬间燃烧产生高压能量驱动机器人^[15], 利用过氧化氢分解原理研发可调节气压的

气动电池来驱动^[52-53](图 3c)。

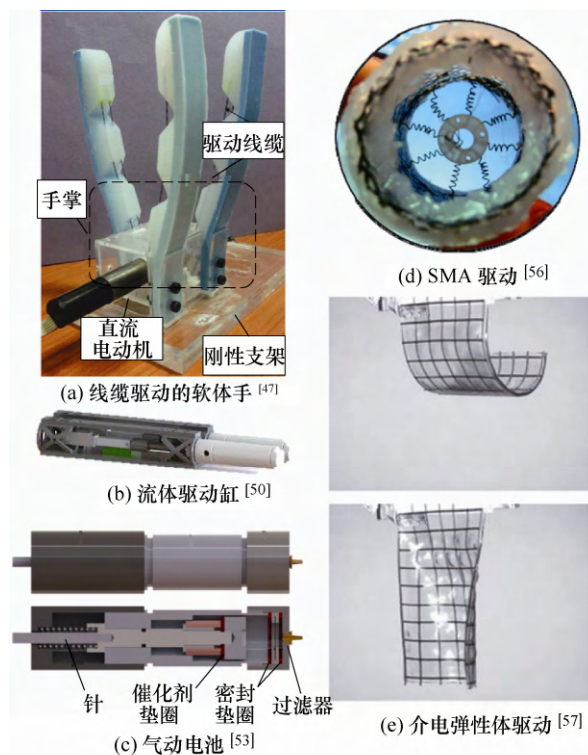


图 3 几种典型的驱动方式

将智能材料作为机器人本体一部分, 通过控制智能材料在场效应(如电场、热场或磁场)作用下的变形, 可以实现软体机器人的驱动本体一体化设计。如 SMA 在加热时自恢复, 将 SMA 嵌入到机器人本体中可以驱动机器人在某个方向的运动^[20, 54-56](图 3d)。将 DE 嵌入机器人本体, 通过控制其在电场作用下的变形驱动机器人完成复杂的动作^[57-58](图 3e)。将磁流变弹性体(MRE)作为机器人本体, 通过改变磁场的强度和方向驱动机器人运动^[59]。

因空气来源广、可压缩、质量轻、无污染等优势, 气动被广泛用作软体机器人驱动。但是气压和流量随时间非线性变化, 这给机器人的实时精确控制带来了一定的困难, 需要建立新的控制模型。为了将驱动系统集成化, 使机器人可以在野外独立作业, 学者们利用化学反应来驱动机器人, 虽然存在反应不可控的问题, 但随着相关技术的成熟, 这种方案将会为软体机器人带来突破性进展。而智能材料驱动的方式依赖于外界物理场, 如何建立安全、稳定、可控的物理场是该种驱动方式实现可靠有效驱动的关键。

2.2 加工工艺

气动肌肉已经产业化, 其加工工艺也已成熟。线缆驱动的软体机器人加工沿用了传统的加工工艺。智能材料的加工主要在于材料的选型和制备。而采用超弹性材料的软体机器人, 因其内部多为复

杂腔道结构, 很难用传统的机加工工艺加工。学者们对新的加工工艺进行了大量的尝试, 包括形状沉积制造(SDM)^[60-61](图 4a)、软体平板印刷术^[11, 35, 62-63](图 4b)、失蜡铸造^[49, 63-64](图 5)、多材料 3D 打印^[15]和多种加工技术的融合^[14]等。形状沉积制造是一种多层沉积工艺, 这种工艺可以将刚性和柔性材料组合到一起, 并将传感器、电路等嵌入到本体中, 适用于制造传感驱动一体化的高度集成机构。软体平板印刷术是加工超弹性材料软体机器人的一种常用工艺。这种工艺通常有步骤: ① 两个超弹性体部分(内含复杂气道的可延展部分和内嵌纤维或纸的限制部分)通过硅胶浇筑加工; ② 两部分固化脱模后将贴合面浸在未固化的硅胶中; ③ 贴合面固化后两部分被粘合在一起。这种工艺可以加工比较复杂的腔道, 但是贴合面粘接不牢, 在高压下很容易撕裂。

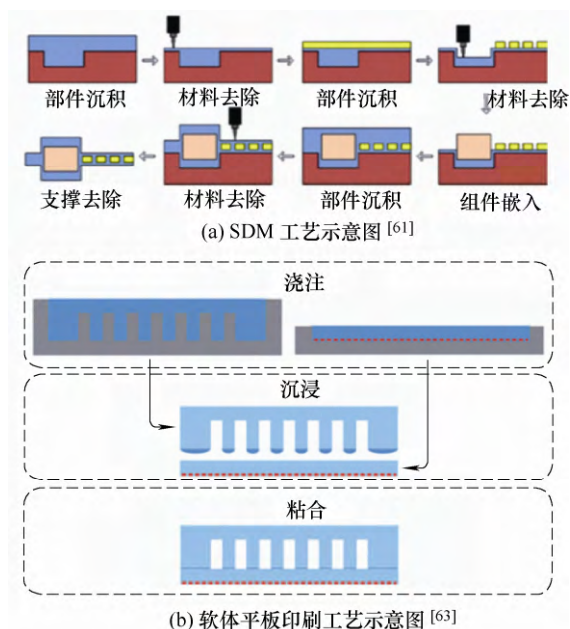


图 4 SDM 和软体平板印刷工艺

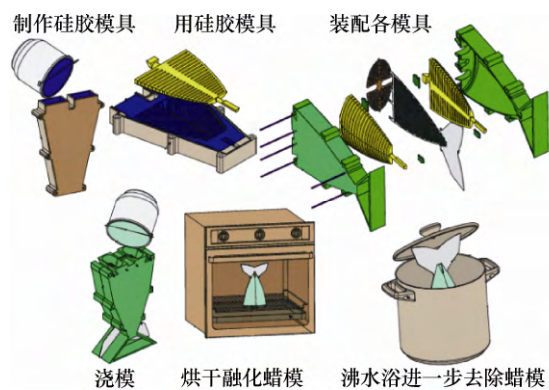


图 5 失蜡铸造工艺示意图^[63]

失蜡铸造事先用低熔点石蜡将内部复杂腔道加工出来, 然后将蜡模放入模具中, 用硅胶浇筑外层结构, 待成型后将蜡芯溶化取出。这种工艺不但

可以加工更加复杂的腔道, 而且因为延展层和限制层是一体成型, 提高了机器人的强度。此外, 学者们还尝试利用掩膜沉积^[65]和 3D 嵌入打印技术^[66]将某些液态导电材料(如 eGaIn 等)在硅胶材料未凝固时嵌入到硅胶中, 为机器人提供传感器, 避免了加工复杂腔道。但这些技术属于 2D 和 2.5D 加工方法, 很难加工三维复杂结构。随着 3D 打印技术的发展, 学者们开始尝试利用多材料 3D 打印^[15]、固液混合打印^[67]等新的加工方法实现机器人的刚柔耦合、一体化成型。

目前, 软体机器人用得比较多的加工工艺是 SDM、软体平版印刷和失蜡制造, 这三种工艺适用于加工比较复杂的 2D 或 2.5D 内部腔道。但是加工工序较多, 周期较长且使用材料单一, 很难加工更为复杂的三维腔道软体机器人。而 3D 打印技术的发展为软体机器人提供了更高效快捷的加工方法。目前多材料 3D 打印已经实现, 随着新的 3D 打印材料的不断出现, 复杂三维腔道的软体机器人加工也成为可能。如利用石蜡直接将三维腔道打印出来后进行加工, 采用易挥发材料通过嵌入式打印直接填充硅胶内部三维腔道, 待硅胶凝固后加热挥发^[14]。随着对材料和相关打印技术的不断研究, 利用 3D 打印直接打印驱动传感一体化的软体机器人也将成为可能。

3 传感与控制

3.1 传感器

软体机器人自身柔顺可变形, 不但要求传感器高精度、高带宽, 并且不能影响机器人本体的力学响应性能, 这使得传统的编码器、电位计、应变计等传感器很难得到应用, 急需开发新型的相容性好、可嵌入的传感器技术。目前商用柔性传感器如 Flex Sensor[®]、Flexiforce[®]、Bend Sensor[®]、StretchSense[™]等是基于导电材料在应变作用下电阻或电容变化的原理。这些传感器自身具备一定的柔性, 嵌入硅胶本体后可以用来测弯曲、拉伸、应力等信息。但这些传感器的弹性模量一般比硅胶材料大, 对软体机器人自身的运动会造成一定的影响, 并且型号固定, 不可裁减, 定制麻烦。为了使传感器更好地适应软体机器人的需求, 学者们在新的材料和加工工艺上进行了探索。如将导电液体 eGaIn 注入到硅胶本体的微腔道中, 本体变形时内部腔道发生变化, 从而改变导电液体的电阻^[68]。通过改变内部腔道的排布方式, 可以测轴向应变、压力、弯曲等信息^[69-71](图 6)。利用霍尔效应将微型磁铁和霍尔元件分别嵌入到软体机器人本体的不同部分, 根据磁场强度的变

化来检测机器人的弯曲曲率^[72-74]。

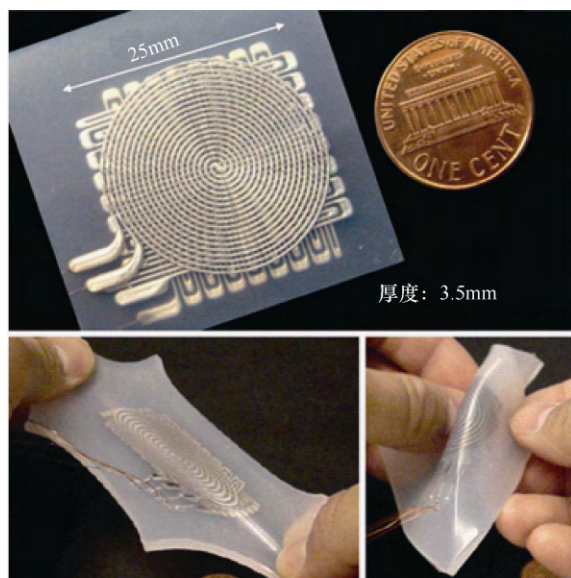


图6 内嵌 eGaIn 导电液体传感器^[69]

除了这些检测二维运动的传感方案,对于三维运动的软体机器人,如三维软体臂,要求传感器可以测到三维信息。如商用传感器 trakSTARTM,将磁通量传感器(EM sensor)嵌入到软体臂的末端,利用三维电磁跟踪系统对末端的坐标和角度进行实时反馈^[75]。将光导纤维嵌入机器人本体,利用内部光强的变化检测机器人的触觉^[76]或者变形^[77-78]。将导电材料缠绕在弹性内核上制成可延展导电线,嵌入到气动三维软体臂测量各腔道的长度和弯曲变化^[79]。智能材料在外界物理场的作用下可以变形,而利用其变形时产生的电压等信号也可以作为传感器来使用。如利用 SMA 制作的人工肌肉具有自感知能力^[80],利用介电弹性体变形时电容的变化来检测压力^[81],将 IPMC 作为传感器用于水下航行器^[82]等。

目前软体机器人传感技术虽然展开了一定的工作,但是仍处于起步阶段。现有传感器虽然可以测得弯曲、压力等信息,但软体机器人属于连续体大变形范畴,测量机器人的局部压强、应变等信息需要延展性极好的传感材料。导电液体如 eGaIn 等可以注入到软材料内部腔道中,腔道的变形和机器人变形保持同步,是软体机器人传感一个很好的选择。但是腔道变形达到极限会导致内部液体断流,对腔道结构设计和加工要求较高,且这种传感器通常是非线性的,传感器标定比较困难。但是随着传感材料的弹性模量、灵敏度和稳定性等性能的不断提升和配套信息处理元件的不断升级,软体机器人传感技术将会迅速发展。

3.2 建模和控制

软体机器人的运动学不同于传统的机器人,软

体机器人变形连续且自由度高度冗余,对于它们的运动学描述只能采用连续体方程。基于软体机器人变形后各部分曲率恒定或者分段恒定的现象,学者们在传统的 D-H 变换的基础上研究出一套分段常曲率(Piecewise constant curvature, PCC)理论模型^[83-84]。该模型用长度、曲率和偏转角来描述一条曲线在构型空间下的位姿,通过改进的 D-H 转换将曲线末端点映射到工作空间中,给出了从构型空间转换到工作空间的通用齐次矩阵。而从软体机器人的驱动空间到构型空间的映射因机器人本体的结构而异。如通过变形后的几何关系可得到构型空间下的位姿参数和三条驱动线缆长度的关系^[85];用系统辨识的方法可建立输入气压和构型空间参数的关系^[86]。但是 PCC 模型只适用于固定曲率的运动学求解,对于变曲率的软体机器人运动学问题,需要尝试新的方法,如将软体连续臂分为多段,每段近似曲率恒定^[87-88]。对于流体驱动弹性体和纤维增强制动器超弹性材料软体机器人,因其本构关系比较复杂,学者们多采用有限元分析来研究几何参数对运动学的影响^[89-90]。从变形前后的几何关系来分析其变形机理^[6, 52, 91],也是一个很好的尝试。

和串联机器人和冗余机器人相比,软体机器人的逆运动学问题(通过控制曲率使机器人到达指定位置)充满了更多的挑战。机器人自动避障、非结构环境下作业、自动抓取和放置物体等任务都离不开逆运动学问题的求解。目前,对于这方面的研究也展开了一些工作。如 MIT 的 RUS 团队,在给定软体机器人的起始点、终止点和期望的姿态后,通过级联反馈曲率控制算法,迭代雅可比矩阵计算每一步需要的曲率并控制其达到期望值^[50],并利用视觉反馈完成了二维平面内抓取^[92]和在限制空间下运动规划^[93]等复杂任务。RUS 还建立了三维软体机械臂的动力学模型,并完成了空间抓持任务^[51]。上海交通大学的王贺升等利用视觉伺服控制软体机械臂定位目标物体^[94]。

刚性机器人结构固定,通过 D-H 模型和齐次变换可以建立各关节变量和机器人末端的运动学模型。软体机器人虽然通过 PCC 模型可以建立其构型空间和操作空间的转换关系,但是因其本体的变形是非线性的,各驱动变量之间又相互耦合,建立驱动空间和构型空间的关系十分困难,并且本体结构和驱动方式不同,转换关系也不同。如何建立模型描述软体机器人驱动变量和变形之间的关系成为一个难点。而软体机器人的逆运动学问题很难找到解析解,只能通过数值分析和非线性优化来求解,这对软体机器人的控制提出了更高的要求。至于软体

机器人的动力学控制, 学者们虽然进行了一些尝试^[51, 95], 但仍是一个非常复杂的问题, 本文将不再赘述。

4 应用领域

4.1 仿生结构

生物体软组织结构的研究推进了软体机器人的发展, 而软体机器人关键技术的突破促进了仿生机器人, 特别是仿生软体机器人的发展。软体机器人具有类生物体的组织结构, 可以实现类生物体的弯曲、伸长、卷曲等高柔顺、高冗余的复杂运动。相比刚性仿生机器人, 软体仿生机器人系统的试验研究更能揭示生物运动学和生物力学的本质。如通过章鱼触手的肌肉性静水骨骼结构和运动特性的研究, 研发了仿生章鱼臂, 基本复现了生物触手伸缩和弯曲动作^[20]。通过对章鱼多触手协调和分工作业进行研究, 为章鱼机器人的水下作业提供了很好的控制策略, 使机器人可以像章鱼一样通过多臂协调在水下自如行走和抓捕物体^[45]。利用超弹性材料加工的软体尾鳍, 在保证了类生物体的柔软结构的同时, 可以完成生物鱼的 C 型转弯和快速游动^[6], 为揭示鱼类游动机理提供了更真实的机器人平台。通过研究毛毛虫的蠕曲运动研发的 GoQBot 机器人, 很好地揭示了毛虫瞬间卷曲跳跃的本质^[43]。软体机器人多用超弹性硅胶材料, 抗冲击性较好且驱动简单, 和刚性机器人相比, 更适合在野外极端环境下作业^[10]。软体机器人自身可连续变形, 自由度无限多, 既可以与障碍物相容, 也可以改变自身的运动模式, 在地震救援、军事勘察等空间受限的非结构环境下作业具有不可比拟的优势^[37, 93]。

4.2 抓持作业

物体抓持一直是机器人研究的难点。软体机器人具有与生俱来的安全性, 可以根据物体的形状和大小改变自己的形态从而很好地包覆物体, 因此在形状不规则物体, 特别是易碎物品抓持上具有很好的优势。软体机器人这方面的优势已经在基于“颗粒堵塞原理”的通用抓持器得到了很好的展示^[96](图 7a)。利用超弹性材料制成的气动软体抓持器和灵巧手, 也是软体机器人在抓持方面很好的尝试^[8-9, 33, 97]图 7a~7d)。相比刚性抓持器, 软体抓持器安全性高、成本低、结构和控制简单, 并且无需复杂的反馈就能抓取各种形状和大小的物体, 甚至易碎物品, 因此在物体抓持上具有更好的应用前景。

4.3 医疗康复

软体机器人具有无限自由度, 材料刚度和生物



图 7 几种软体抓持器

体相似, 可以在生物体复杂内腔内移动且不会对器官组织造成伤害, 与传统刚性机器人相比更能满足某些医疗手术, 如微创手术的需求, 目前在这方面也有了一些研究^[2, 98-99] (图 8a)。通过对仿生结构的机械预编程, 可以使软体机器人很好地复现人类关节的运动, 并且可以和人体亲密接触, 不会带来任何伤害, 因此在康复可穿戴机器人领域也有很好的应用前景。如为脑中风患者或骨折病人做康复训练的上肢手套^[40](图 8b), 脚踝辅助训练机器人^[100], 可以监测人体臀部、膝盖以及脚踝等部位关节运动的软体传感套装^[101]等。



图 8 软体机器人在医疗康复上的应用

5 总结与展望

软体机器人多采用软材料加工而成, 相比刚性机器人, 自由度高度冗余, 运动更加灵活, 且可根据周围的环境主动或者被动地改变自身的形态, 极大弥补了刚性机器人的不足, 将机器人的设计、建模、控制及应用推向了更高的平台。现有的软体机器人样机已经展示了其在移动、抓持、医疗和人机交互等领域的独特优势。软体机器人本体材料和软体生物组织相近, 可以很好地模拟软体动物的运动

模态^[6, 43-45], 可以在未知的地形地貌下自如行走^[10], 可以承受巨大的冲击而不损坏^[44], 并且可以穿越复杂狭小的空间^[37]。这些特性突破了刚性机器人的极限, 并且极大地简化了机器人的本体结构和控制系统的设计, 为仿生移动机器人的研究提供了新的思路。软体机器人具有与生俱来的安全性, 可以主动或被动适应物体的形态, 在抓持不同形状的物体, 尤其是软物体和易碎物体上具有绝对的优势^[8-9, 96], 推进了人机共融技术的发展。比如, 在工业生产线上软体机器人可以安全高效地与人协作完成分拣物体、装配等作业; 在服务业软体机器人可以安全可靠地端茶递水, 准备食物; 在医疗康复领域可以在不给人体带来任何不适和伤害的前提下帮病人捶背按摩, 辅助康复训练, 检测人体生理信号。软体机器人虽然展现了出刚性机器人不具备的优势, 但是软体机器人的发展也面临着诸多困难。如快速高效地将材料特性和结构结合设计出符合特定要求的机器人本体需要新的设计和仿真工具; 加工复杂结构或者微型尺度的机器人需要新的加工方法; 使机器人更加集成化、智能化需要新的驱动传感方案和控制理论支撑。

软体机器人因采用软材料制成从而能表现出很好的柔顺性, 但是在某些应用下因负载低、刚度差、强度低等原因造成负面影响。如何在保证软体机器人变形能力的基础上提高软体机器人的强度是一个值得思考的科学问题。通过在硅胶材料里添加弹性纤维等材料或者利用 jamming 原理可以提高软体机器人的强度^[102-103], 但是这种方法不能带来量级上的变化。智能材料如 SMA、SMP 和磁流变液等在外界条件刺激下可以改变材料的相位或者流体的粘度, 从而改变材料的刚度^[104-106], 并且材料的刚度可以通过和其他材料混合进行调节。将智能材料和软材料相结合的刚柔耦合机器人, 不但可以保证软体机器人的柔顺性, 在特殊需求下还可以将机器人的刚度提高数个量级, 从而使机器人的负载等作业能力得以提升。如何实现软体机器人的刚柔耦合、可变刚度将是一个很好的研究方向。

软体机器人多采用智能材料和智能结构, 通过机械预编程可以完成一定的动作, 实现了驱动本体一体化。随着嵌入式柔性传感器和柔性电子技术的不断发展, 软体机器人的驱动传感控制一体化成为可能。将传感器集成到软体机器人本体中, 可使机器人感知更多的外界信息, 实现智能化控制。如软体手在抓握物体时可以感知物体的形状, 在灾难救援中可以感知生命体信息, 在野外作业中可以感知障碍物和目标物等信息。但是实现软体机器人的传

感驱动一体化仍面临着很多科学问题: 如何把传感器嵌入到机器人本体? 如何在不影响机器人本体的力学特性的同时提高传感器的精度、响应频率等? 如何根据软体机器人的运动特点设计算法实现机器人的智能化控制? 这些都是值得深入探索并亟待解决的问题。

参 考 文 献

- [1] 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. A review on the soft robotics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 25-33.
- [2] RANZANI T, GERBONI G, CIANCHETTI M, et al. A bioinspired soft manipulator for minimally invasive surgery[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(3): 035008.
- [3] LUO Ming, TAO Weijia, CHEN Fuchen, et al. Design improvements and dynamic characterization on fluidic elastomer actuators for a soft robotic snake[C]// 2014 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), April 14-15, 2014, Greater Boston Area, Massachusetts, USA :IEEE, 2014: 1-6.
- [4] ANDRIKOPOULOS G, NIKOLAKOPOULOS G, MANESIS S. A survey on applications of pneumatic artificial muscles[C]// Control & Automation (MED), 2011 19th Mediterranean Conference on, June 20-23, 2011, Greece : IEEE, 2011: 1439-1446.
- [5] MOSASWGH B, POLYGERINOS P, KEPLINGER C, et al. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(15): 2163-2170.
- [6] 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.
- [7] SFAKIOTAKIS M, KAZAKIDI A, TSAKIRIS D P. Octopus-inspired multi-arm robotic swimming[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(3): 035005.
- [8] HAO Yufei, GONG Zheyuan, XIE Zhexin, et al. Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length[C]// Proceedings of the 35th Chinese Control Conference, July 27-29, 2016, Chengdu, China : IEEE, 2016: 7554316.
- [9] DEIMEL R, BROCK O. A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping[J]. International Journal of Robotics Research, 2015, 35(1):

- 161-185.
- [10] TOLLEY M T, SHEPHERD R F, MOSADEGH B, et al. A resilient, untethered soft robot[J]. *Soft Robotics*, 2014, 1(3) : 213-223.
- [11] MORIN S A, SHEPHERD R F, KWOK S W, et al. Camouflage and display for soft machines[J]. *Science*, 2012, 337(6096) : 828-832.
- [12] ROLF M, STEIL J J. Constant curvature continuum kinematics as fast approximate model for the bionic handling assistant[C]// 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 7-12, 2012, Vilamoura, Algarve, Portugal :IEEE, 2012 : 6385-6396.
- [13] LEI Jingtao, YU Huangying, WANG Tianmiao. Dynamic bending of bionic flexible body driven by pneumatic artificial muscles (PAMs) for spinning gait of quadruped robot[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(1) : 11-20.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] WANG Huaming, ZHU Yinglong, ZHAO Dongbiao, et al. Performance investigation of cone dielectric elastomer actuator using Taguchi method[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 24(4) : 685-692.
- [17] SHINTAKE J, ROSSET S, SCHUBERT B, et al. Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(2) : 231-238.
- [18] SHEN Qi, TRABIA S, STALBAUM T, et al. A multiple-shape memory polymer-metal composite actuator capable of programmable control, creating complex 3D motion of bending, twisting, and oscillation[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6 : 24462.
- [19] 郭闯强, 吴春亚, 刘宏. 离子聚合物金属复合材料驱动器在机器人中的应用进展[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(9) : 1-13.
- GUO Chuangqiang, WU Chunya, LIU Hong. The application progress of ionic polymer-metal composite materials in robotics[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(9) : 1-13.
- [20] LASCHI C, CIANCHETTI M, MAZZOLAI B, et al. Soft robot arm inspired by the octopus[J]. *Advanced Robotics*, 2012, 26(7) : 709-727.
- [21] FIROUZEH A, SALERNO M, PAIK J. Soft pneumatic actuator with adjustable stiffness layers for multi-DoF actuation[C]// *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015 IEEE/RSJ International Conference on, September 28 - October 2, 2015, Hamburg, Germany :IEEE, 2015 : 1117-1124.
- [22] CHOU C P, HANNAFORD B. Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, 12(1) : 90-102.
- [23] DAERDEN F, LEFEBER D. Pneumatic artificial muscles : Actuators for robotics and automation[J]. *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, 2002, 47(1) : 11-21.
- [24] DAVIS S, CALDWELL D G. Braid effects on contractile range and friction modeling in pneumatic muscle actuators[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2006, 25(4) : 359-369.
- [25] FAUDZI A A M, RAZIF M R M, NORDIN I N A M, et al. Development of bending soft actuator with different braided angles[C]// 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Jul 11-14, 2012, Taiwan, China. IEEE, 2012 : 1093-1098.
- [26] KANG Rongjie, GUO Yong, CHENG Kaiyu, et al. Design and control of a soft actuator driven by pneumatic muscles[C]// 2014 International Conference on Industrial Automation, Information and Communications Technology (IAICT), Aug. 28-30, 2014, Inna Kuta Bali, Indonesia : IEEE, 2014 : 26-30.
- [27] PRITTS M B, RAHN C D. Design of an artificial muscle continuum robot[C]// 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 26 - May 1, 2004, New Orleans Riverside Hilton & Towers, New Orleans, Louisiana : IEEE, 2004 : 4742-4746.
- [28] ROCHE E T, WOHLFARTH R, OVERVELDE J T B, et al. A bioinspired soft actuated material[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(8) : 1200-1206.
- [29] MCMAHAN W, CHITRAKARAN V, CSENSITS M, et al. Field trials and testing of the OctArm continuum manipulator[C]// 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 15-19, 2006, Orlando, Florida, USA : IEEE, 2006 : 2336-2341.
- [30] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. *Nature*, 2015, 521(7553) : 467-475.
- [31] WAKIMOTO S, SUZUMORI K, OGURA K. Miniature pneumatic curling rubber actuator generating bidirectional

- motion with one air-supply tube[J]. *Advanced Robotics*, 2011, 25(9-10) : 1311-1330.
- [32] MARTINEZ R V, BRANCH J L, FISH C R, et al. Robotic tentacles with three - dimensional mobility based on flexible elastomers[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(2) : 205-212.
- [33] ILIEVSKI F, MAZZEO A D, SHEPHERD R F, et al. Soft robotics for chemists[J]. *Angewandte Chemie*, 2011, 123(8) : 1930-1935.
- [34] ONAL C D, RUS D. Autonomous undulatory serpentine locomotion utilizing body dynamics of a fluidic soft robot[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2013, 8(2) : 026003.
- [35] 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.
- [36] GALLOWAY K C, POLYGERINOS P, WALSH C J, et al. Mechanically programmable bend radius for fiber-reinforced soft actuators[C]// 2013 16th International Conference on Advanced Robotics (ICRA), May 6-10, 2013, Karlsruhe, Germany : IEEE, 2013 : 1-6.
- [37] CONNOLLY F, POLYGERINOS P, WALSH C J, et al. Mechanical programming of soft actuators by varying fiber angle[J]. *Soft Robotics*, 2015, 2(1) : 26-32.
- [38] 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 (IROS), October 7-12, 2012, Vilamoura, Algarve, Portugal : IEEE, 2012 : 4264-4269.
- [39] KRISHNAN G, BISHOP-MOSER J, KIM C, et al. Evaluating mobility behavior of fluid filled fiber-reinforced elastomeric enclosures[C]// ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, August 12-15, 2012, Chicago : ASME, 2012 : 1089-1099.
- [40] POLYGERINOS P, WANG Z, GALLOWAY K C, et al. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 73 : 135-143.
- [41] SUZUMORI K, IIKURA S, TANAKA H. Development of flexible microactuator and its applications to robotic mechanisms[C]// *Robotics and Automation*, 1991. *Proceedings of 1991 IEEE International Conference on*, April 9-11, 1991, Sacramento, CA USA : IEEE, 1991 : 1622-1627.
- [42] SUZUMORI K, ENDO S, KANDA T, et al. A bending pneumatic rubber actuator realizing soft-bodied manta swimming robot[C]// *Robotics and Automation*, 2007 *IEEE International Conference on*, April 10-14, 2007, Rome, Italy : IEEE, 2007 : 4975-4980.
- [43] LIN H T, LEISK G G, TRIMMER B. GoQBot : A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2011, 6(2) : 026007.
- [44] SEOK S, ONAL C D, CHO K J, et al. Meshworm : A peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(5) : 1485-1497.
- [45] 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) : 035003.
- [46] AUKES D M, HEYNEMAN B, ULMEN J, et al. Design and testing of a selectively compliant underactuated hand[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2014, 33(5) : 721-735.
- [47] 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.
- [48] MCMAHAN W, JONES B A, WALKER I D. Design and implementation of a multi-section continuum robot : Air-octor[C]// 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Aug. 2-6, 2005, Edmonton, Alberta, Canada : IEEE, 2005 : 3345-3352.
- [49] KATZSCHMANN R K, MARCHESE A D, RUS D. Hydraulic autonomous soft robotic fish for 3D swimming[C]// *Experimental Robotics*. Springer International Publishing, 2016 : 405-420.
- [50] MARCHESE A D, KOMOROWSKI K, ONAL C D, et al. Design and control of a soft and continuously deformable 2D robotic manipulation system[C]// 2014 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 31 - June 5, 2014, Hong Kong, China : IEEE, 2014 : 2189-2196.
- [51] MARCHESE A D, TEDRAKE R, RUS D. Dynamics and trajectory optimization for a soft spatial fluidic elastomer manipulator[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2016, 35(8) : 1000-1019.
- [52] ONAL C D, CHEN Xin, WHITESIDES G M, et al. Soft mobile robots with on-board chemical pressure generation[C]// *International Symposium on Robotics Research*, 2011 : 1-16.
- [53] KOJIMOTO N. Pneumatic battery :A chemical alternative to pneumatic energy storage[D]. USA : Massachusetts Institute of Technology, 2012.

- [54] UMEDACHI T, VIKAS V, TRIMMER B A. Softworms : The design and control of non-pneumatic, 3D-printed, deformable robots[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2016, 11(2) : 025001.
- [55] MAO Shixin, DONG Erbao, XU Min, et al. Design and development of starfish-like robot : Soft bionic platform with multi-motion using SMA actuators[C]// *Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2013 IEEE International Conference on, December 12-14, 2013, Shenzhen, China : IEEE, 2013 : 91-96.
- [56] MAZZOLAI B, MARGHERI L, CIANCHETTI M, et al. Soft-robotic arm inspired by the octopus : II. From artificial requirements to innovative technological solutions[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2012, 7(2) : 025005.
- [57] SHIAN S, BERTOLDI K, CLARKE D R. Dielectric elastomer based “ grippers ” for soft robotics[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(43) : 6814-6819.
- [58] ANDERSON I A, GISBY T A, MCKAY T G, et al. Multi-functional dielectric elastomer artificial muscles for soft and smart machines[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(4) : 041101.
- [59] KASHIMA S, MIYASAKA F, HIRATA K. Novel soft actuator using magnetorheological elastomer[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(4) : 1649-1652.
- [60] GAFFORD J, DING Ye, HARRIS A, et al. Shape deposition manufacturing of a soft, atraumatic, and deployable surgical grasper[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2015, 7(2) : 021006.
- [61] CHO K J, KOH J S, KIM S, et al. Review of manufacturing processes for soft biomimetic robots[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2009, 10(3) : 171-181.
- [62] XIA Younan, WHITESIDES G M. Soft lithography[J]. *Annual Review of Materials Science*, 1998, 28(1) : 153-184.
- [63] MARCHESE A D, KATZSCHMANN R K, RUS D. A recipe for soft fluidic elastomer robots[J]. *Soft Robotics*, 2015, 2(1) : 7-25.
- [64] HOMBERG B S, KATZSCHMANN R K, DOGAR M R, et al. Haptic identification of objects using a modular soft robotic gripper[C]// *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015 IEEE/RSJ International Conference on, Sept 28 - Oct 3, 2015, Hamburg, Germany :IEEE, 2015 : 1698-1705.
- [65] KRAMER R K, MAJIDI C, WOOD R J. Masked deposition of gallium - indium alloys for liquid - embedded elastomer conductors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(42) : 5292-5296.
- [66] MUTH J T, VOGT D M, TRUBY R L, et al. Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(36) : 6307-6312.
- [67] MACCURDY R, KATZSCHMANN R, KIM Y, et al. Printable hydraulics : A method for fabricating robots by 3D co-printing solids and liquids[C]// *Robotics and Automation (ICRA)*, 2016 IEEE International Conference on, May 16-21, 2016, Stockholm, Sweden : IEEE, 2016 : 3878-3885.
- [68] KRAMER R K, MAJIDI C, WOOD R J. Wearable tactile keypad with stretchable artificial skin[C]// *Robotics and Automation (ICRA)*, 2011 IEEE International Conference on, May 9-13, 2011, Shanghai, China : IEEE, 2011 : 1103-1107.
- [69] PARK Y L, CHEN B R, WOOD R J. Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(8) : 2711-2718.
- [70] FARROW N, CORRELL N. A soft pneumatic actuator that can sense grasp and touch[C]// *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015 IEEE/RSJ International Conference on, Sept. 28 – Oct. 3, 2015, Hamburg, Germany : IEEE, 2015 : 2317-2323.
- [71] BILODEAU R A, WHITE E L, KRAMER R K. Monolithic fabrication of sensors and actuators in a soft robotic gripper[C]// *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015 IEEE/RSJ International Conference on, Sept. 28 – Oct. 3, 2015, Congress Center Hamburg, Hamburg, Germany : IEEE, 2015 : 2324-2329.
- [72] OZEL S, KESKIN N A, KHEA D, et al. A precise embedded curvature sensor module for soft-bodied robots[J]. *Sensors and Actuators A :Physical*, 2015, 236 : 349-356.
- [73] DOBRZYNSKI M K, PERICET-CAMARA R, FLOREANO D. Contactless deflection sensor for soft robots[C]// 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sept. 25- 30, 2011, San Francisco, California, USA : IEEE, 2011 : 1913-1918.
- [74] OZEL S, SKORINA E H, LUO M, et al. A composite soft bending actuation module with integrated curvature sensing[C]// 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 16-21, 2016, Stockholm, Sweden : IEEE, 2016 : 4963-4968.
- [75] SUN Yi, SONG Shuang, LIANG Xinquan, et al. A miniature soft robotic manipulator based on novel fabrication methods[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, 1(2) : 617-623..

- [76] SAREH S, JIANG A, FARAGASSO A, et al. Bio-inspired tactile sensor sleeve for surgical soft manipulators[C]// 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 31 - June 5, 2014, Hong Kong, China : IEEE, 2014 : 1454-1459.
- [77] SERALE T C, ALTHOEFER K, SENEVIRATNE L, et al. An optical curvature sensor for flexible manipulators[C]// Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on, May 6-10, 2013, Karlsruhe, Germany : IEEE, 2013 : 4415-4420.
- [78] SAREH S, NOH Y, LI Min, et al. Macrobend optical sensing for pose measurement in soft robot arms[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(12) : 125024.
- [79] WURDEMANN H A, SAREH S, SHAFTI A, et al. Embedded electro-conductive yarn for shape sensing of soft robotic manipulators[C]// 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), August 25-29, 2015, Milan, Italy : IEEE, 2015 : 8026-8029.
- [80] ZHANG Jianjun, YIN Yuehong, ZHU Jianying. Electrical resistivity-based study of self-sensing properties for shape memory alloy-actuated artificial muscle[J]. Sensors, 2013, 13(10) : 12958-12974.
- [81] MANNSFELD S C B, TEE B C K, STOLTENBERG R M, et al. Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers[J]. Nature Materials, 2010, 9(10) : 859-864.
- [82] SHEN Qi, WANG Tianmiao, KIM K J. A biomimetic underwater vehicle actuated by waves with ionic polymer - metal composite soft sensors[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(5) : 055007.
- [83] 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 : 0278364910368147.
- [84] HANNAN M W, WALKER I D. Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum style robots[J]. Journal of Robotic Systems, 2003, 20(2) : 45-63.
- [85] JONES B A, WALKER I D. Kinematics for multisection continuum robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(1) : 43-55.
- [86] WANG Xiaochen, TAO Geng, ELSAYED Y, et al. A unified system identification approach for a class of pneumatically-driven soft actuators[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2015, 63 : 136-149.
- [87] 张润玺, 王贺升, 陈卫东. 仿章鱼软体机器人形状控制[J]. 机器人, 2016(6) : 754-759.
- ZHANG Runxi, WANG Hesheng, CHEN Weidong. The shape control of a bioinspired octopus soft robot[J]. ROBOT, 2016(6) : 754-759.
- [88] MAHL T, HILDEBRANDT A, SAWODNY O. A variable curvature continuum kinematics for kinematic control of the bionic handling assistant[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(4) : 935-949.
- [89] ELSAYED Y, LEKAKOU C, GENG T, et al. Design optimisation of soft silicone pneumatic actuators using finite element analysis[C]// 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronic, July 8-11, 2014, Besançon, France : IEEE, 2014 : 44-49.
- [90] NORDIN I N A M, RAZIF M R M, NATARAJAN E, et al. 3-D finite-element analysis of fiber-reinforced soft bending actuator for finger flexion[C]// 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 8-11, 2014, Besançon, France : IEEE, 2013 : 128-133.
- [91] KRISHNAN G. Kinematics of a new class of smart actuators for soft robots based on generalized pneumatic artificial muscles[C]// 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 14-18, 2014, Chicago, IL, USA : IEEE, 2014 : 587-592.
- [92] KATZSCHMANN R K, MARCHESE A D, RUS D. Autonomous object manipulation using a soft planar grasping manipulator[J]. Soft Robotics, 2015, 2(4) : 155-164.
- [93] MARCHESE A D, KATZSCHMANN R K, RUS D. Whole arm planning for a soft and highly compliant 2d robotic manipulator[C]// 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 14-18, 2014, Chicago, IL, USA : IEEE, 2014 : 554-560.
- [94] WANG Hesheng, CHEN Weidong, YU Xiaojin, et al. Visual servo control of cable-driven soft robotic manipulator[C]// 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, November 3-7, 2013, Tokyo, Japan : IEEE, 2013 : 57-62.
- [95] LUO Min, AGHELI M, ONAL C D. Theoretical modeling and experimental analysis of a pressure-operated soft robotic snake[J]. Soft Robotics, 2014, 1(2) : 136-146.
- [96] 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, 2010, 107(44) : 18809-18814.
- [97] 王宁扬, 孙昊, 姜皓, 等. 一种基于蜂巢气动网络的软体夹持器抓取策略研究[J]. 机器人, 2016(3) : 371-377, 384.

- WANG Ningyang, SUN Hao, JIANG Hao, et al. The research on the grasping strategy of a soft manipulator based on the honeycomb pneumatic networks[J]. ROBOT, 2016(3) : 371-377, 384.
- [98] CIANCHETTI M, RANZANI T, GERBONI G, et al. Soft robotics technologies to address shortcomings in today's minimally invasive surgery : The STIFF-FLOP approach[J]. Soft Robotics, 2014, 1(2) : 122-131.
- [99] DENG Tao, WANG Hesheng, CHEN Weidong, et al. Development of a new cable-driven soft robot for cardiac ablation[C]// Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2013 IEEE International Conference on, Dec. 12 - 14, 2013, Shenzhen, China : IEEE, 2013 : 728-733.
- [100] PARK Y L, CHEN B, YOUNG D, et al. Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle? foot rehabilitation[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2014, 9(1) : 016007.
- [101] MENGUC Y, PARK Y L, PEI H, et al. Wearable soft sensing suit for human gait measurement[J]. International Journal of Robotics Research, 2014, 33(14) : 1748-1764.
- [102] SHEPHERD R F, STOKES A A, NUNES R, et al. Soft machines that are resistant to puncture and that self seal[J]. Advanced Materials, 2013, 25(46) : 6709-6713.
- [103] WALL V, DEIMEL R, BROCK O. Selective stiffening of soft actuators based on jamming[C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 26-30, 2015, Seattle, WA, USA : IEEE, 2015 : 252-257.
- [104] SHAN Wanliang, LU Tong, MAJIDI C. Soft-matter composites with electrically tunable elastic rigidity[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(8) : 085005.
- [105] SHAN Wanliang, DILLER S, TUTCUOGLU A, et al. Rigidity-tuning conductive elastomer[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(6) : 065001.
- [106] WEN Li, DANIEL V, SHI Zhenyun, et al. Design, fabrication, properties and applications of smart and advanced materials[M]. Boca Raton : CRC Press/Taylor & Francis Group, 2016.

作者简介：王田苗，男，1960 年出生，博士，教授，博士研究生导师，国家杰出青年基金获得者，教育部长江学者特聘教授。主要研究方向为工业机器人与嵌入式控制技术、仿生机器鱼推进机理、医疗外科机器人。发表论文 70 余篇，发明专利 10 余项，著作 3 部。

E-mail : itm@buaa.edu.cn

郝雨飞，男，1990 年出生，博士研究生。主要研究方向为软体机器人、仿生机器人。

E-mail : yufeiha01990@163.com

杨兴帮，男，1987 年出生，博士。主要研究方向为微小型机器人，软体机器人，仿生两栖多模式运动。

E-mail : xingbang1987@163.com

文力(通信作者)，男，1983 年出生，副教授，博士研究生导师。主要研究方向为软体机器人、仿生机器人。发表论文 40 余篇。

E-mail : liwen@buaa.edu.cn