

第 5 章 软体机器人的应用

水下生物灵巧的结构与高效的运动机理为软体机器人的设计提供了丰富的灵感。基于柔性材料的仿生软体机器人能够和生物体一样通过不同结构、不同形态变化获取不同的运动模式。目前,形状记忆合金(Shape Memory Alloy, SMA)、介电弹性体(Dielectric Elastomer, DE)、离子聚合物-金属复合材料(Ionic Polymer-Metal Composites, IPMC)、水凝胶等智能材料与纤维增强结构、气动网格结构、颗粒阻塞结构等软体结构已经应用于软体机器人的构建与驱动,使软体机器人实现了爬行、跳跃、滚动、游动等多种仿生运动。同时,软体机器人凭借出色的安全性和目标物适应性,在抓持、医疗康复等领域有着巨大的应用前景。

5.1 仿生、特种与极端环境

5.1.1 仿生软体机器人

在仿生软体机器人方面,软体机器人已实现了爬行、跳跃、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学的理解。在仿生机器人领域较早地应用软体机器人技术是利用气动肌肉来取代电动机驱动。例如,Festo 公司设计的仿人手臂 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。但这类机器人只是将驱动方式改为类肌肉的软体驱动器,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。此外,该公司还研发了多种仿生软体机器人,比如模仿鱼尾鳍的自适应抓手 DHAS、模仿变色龙舌头的自适应抓手 DHEF,以及基于气动纤维波纹管单元的仿生软体臂和软体手等,如图 5-1 所示。

基于超弹性材料的仿生软体机器人可以像生物体一样改变自身的形状、刚

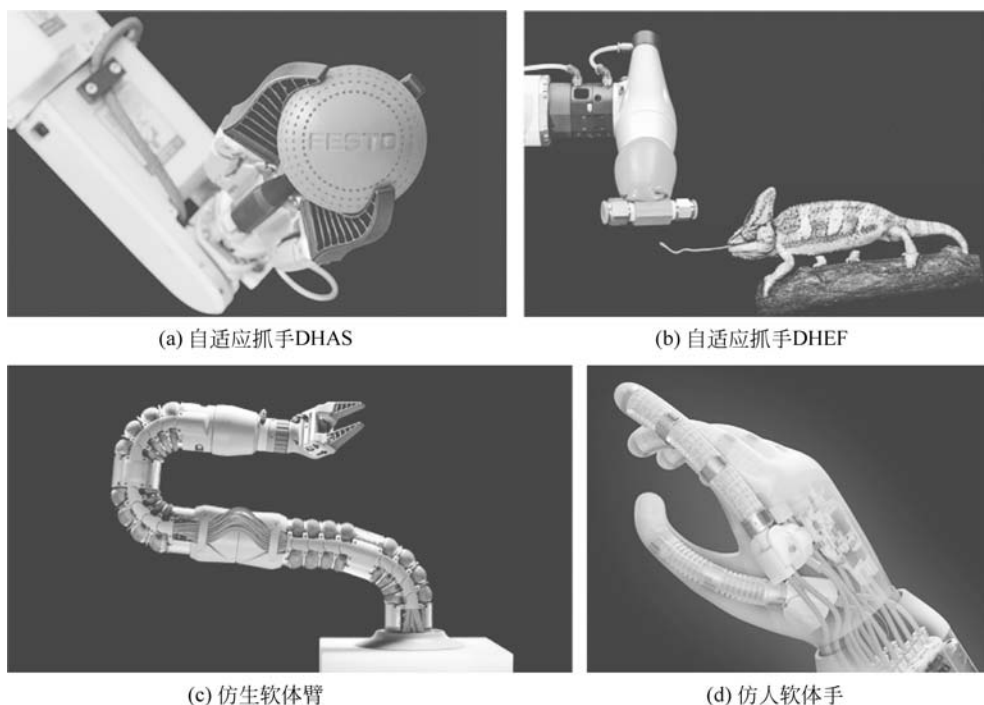
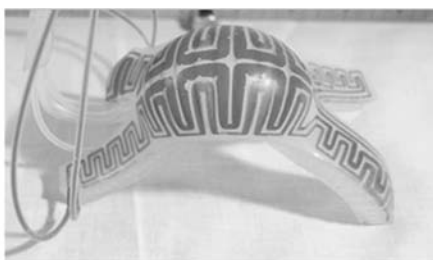


图 5-1 Festo 仿生软体机器人

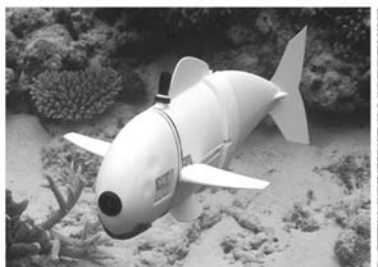
度与运动模态,从而更加高效、安全地与自然界进行交互,为仿生机器人的发展提供了新的发展思路。早在 1991 年,日本东芝公司和横滨国立大学合作研发了一种三通道的纤维驱动器,该驱动器能够实现伸长、弯曲和扭曲等基本动作,既可以完成拧螺丝等复杂操作,又可以模仿腿式机器人行走,如图 5-2(a)所示。2007 年,日本冈山大学与大阪大学合作,利用纤维增强驱动器研发了一种蝠鲼机器人,仅仅通过控制两个驱动器的弯曲就可以在水里游动。2011 年,美国哈佛大学 Whitesides 课题组研发了基于流体弹性驱动器的气动四足软体机器人,通过有序地驱动五个驱动器可以产生爬行和起伏两种运动模态。该机器人可以在冰雪、炭火等极端环境下作业,并且可以承受汽车碾压等巨大压力。但为了搭载驱动控制单元,机器人本体较为庞大。2012 年,该课题组通过改变样机的颜色实现了伪装等功能,相关工作发表在 *Science* 上,如图 5-2(b)所示。2014 年,美国 MIT 的 Rus 课题组用流体弹性驱动器作为鱼尾驱动研发了一种自主游动的软体机器鱼,将能源、驱动和控制集成于一体,实现了水下自由游动和快速逃逸。2018 年,该课题组利用超声控制机器鱼,实现了真实野外环境的水下勘探,并发表在 *Science Robotics* 上,如图 5-2(c)所示。2015 年,哈佛大学的



(a) 微小型软体移动机器人



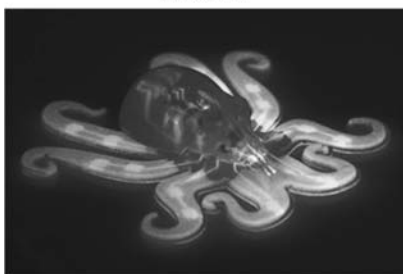
(b) 软体四足机器人



(c) 软体鱼



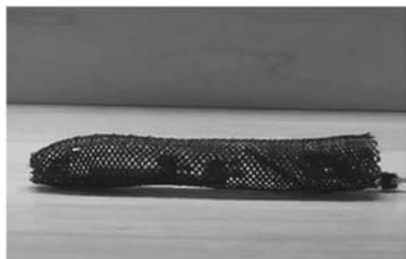
(d) 软体弹跳机器人



(e) 多材料3D打印的仿生章鱼机器人



(f) 生物细胞驱动的双目鱼机器人



(g) 软体蠕虫机器人Meshworm



(h) 形状记忆合金仿生章鱼机器人

图 5-2 几种典型的仿生软体机器人

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在一起,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。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,相关研

究发表在 *Science* 上,如图 5-2(d)所示。2016 年,Wood 课题组和 Lewis 课题组合作,利用多材料 3D 打印制作了全软的仿生章鱼机器人,使用燃料分解来提供能源,使用微流体逻辑单元来控制各腔道的运动,相关研究发表在 *Nature* 上,如图 5-2(e)所示。同年,哈佛大学的 Parker 课题组还将小鼠细胞植入鳐形目鱼机器人中,实现了生物细胞驱动的 Cyborg 机器人,并发表在 *Science* 上,如图 5-2(f)所示。

将智能材料嵌入机器人本体中,通过控制材料的变形来模仿生物的运动,也是软体仿生机器人一个很好的突破。例如,2011 年美国塔夫茨大学的 Trimmer 课题组就将形状记忆合金作为驱动嵌入硅胶里面,研发了一种仿毛毛虫机器人 GoQBot,揭示了毛毛虫快速滚动的运动机理。2013 年,美国 MIT 的 Rus 课题组将形状记忆合金编织成网状结构并研发了一种仿生蠕虫机器人 Meshworm,不但实现了蠕动动作,还具有很强的抗冲击性能,如图 5-2(g)所示。2015 年,意大利仿生机器人实验室的 Mazzolai 课题组利用形状记忆合金与软材料相结合,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,如图 5-2(h)所示。

与刚性仿生机器人相比,软体仿生机器人不仅实现了生物的某些运动和功能,而且通过材料模仿生物组织的运动,比刚性机器人更能贴近生物原型。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。而且随着智能材料的不断突破,机器人的能源、驱动、传感反馈等有了更好的解决途径,研发从前不可能实现的新型仿生机器人也成为可能,如微纳机器人、自愈机器人等。

5.1.2 仿生水下软体机器人

在海洋环境中具有高效、高机动捕食、移动能力的水下生物(如鱼类、软体动物类等)为仿生水下软体机器人的设计提供了丰富的灵感。目前,仿生水下软体机器人相关研究主要面向模仿章鱼触手的水下抓取,模仿鲫鱼、章鱼吸盘水下吸附,模仿鱼类、水母的水下游动三个方面展开。

1. 水下抓取

海洋中头足纲软体动物(如章鱼等)拥有多吸盘阵列的、具有多自由度弯

曲、伸缩和扭转功能的软体触手,能够完成抓握、捕食、移动等复杂动作。章鱼在水下所表现出的柔顺、高效的捕食与移动特性给予了软体机器人学者一系列的仿生灵感。意大利仿生机器人实验室的 Mazzolai 教授课题组通过模拟章鱼肌肉研制出了仿生软体章鱼肌肉,该触手纵向采用绳索驱动,横向采用形状记忆合金驱动,可在水下伸长、收缩和弯曲,如图 5-3(a)所示。在此基础上,该课题组模仿章鱼的形态学与运动学机理,集成了具有抓捕与移动独立功能的仿生软体章鱼臂,研制了具有八个仿生软体触手的章鱼机器人。通过多软体章鱼臂的协同作用,该机器人能够完成水下自如行走、穿越障碍与卷曲抓取物体等工作,如图 5-3(b)所示。北京航空航天大学文力教授课题组与德国 Festo 公司联合研制了仿生软体章鱼触手。该机器人模拟了章鱼抓捕时的缠绕与吸附动作,能够快速地对目标物进行缠绕,同时利用触手弯曲内侧的吸盘对目标物进行吸附;缠绕与吸附的结合,使得仿生软体章鱼触手能够对多种不同尺寸、不同形状、不同姿态的物体实现安全、稳定抓持,如图 5-3(c)所示。

在深入理解章鱼等水下软体生物高效抓捕机制的基础上,结合软体机器人与生俱来的安全、目标物适应性等优势,研究人员进一步探索了水下软体抓持器的新材料、新结构、新应用。哈佛大学 Wood 教授课题组将气动网格结构软体抓持器及纤维增强结构软体缠绕驱动器集成在水下刚性机械臂上,应用于水下易损生物样本的采集,并成功在浅海无损采集珊瑚样本,如图 5-3(d)所示。该课题组还结合纤维增强结构研制了可独立弯曲或扭转的单自由度腕关节模块组,并完成模拟环境下 2300m 水压测试,如图 5-3(e)所示。随后,该课题组集成上述模块,研制出数据手套控制的软体臂样机,并应用在海洋 700m 深处抓取展示中。需要指出的是,该软体臂尚未具备基于逆运动学模型的可控性,无法根据目标物的位置进行运动学反解、实现精确定位抓取。康奈尔大学 Baxter 教授课题组将基于颗粒阻塞原理的软体抓持器应用于水下环境,并成功在 1200m 海洋深处完成驱动实验,如图 5-3(f)所示,实现 35N 的最大抓取力,具有 10s 的驱动延滞。麻省理工学院的赵选贺教授课题组利用水凝胶材料研发了一种水下软体驱动器,可以在水环境中很好地伪装,躲避视觉和声呐探测。北京航空航天大学文力教授课题组研发了一种水下软体抓持器,并探索了其水下抓取时的流场结构等水动力学特性。

2. 水下吸附

对于仿生软体吸附方面,研究人员相继开发出一些能够模仿生物吸附的软

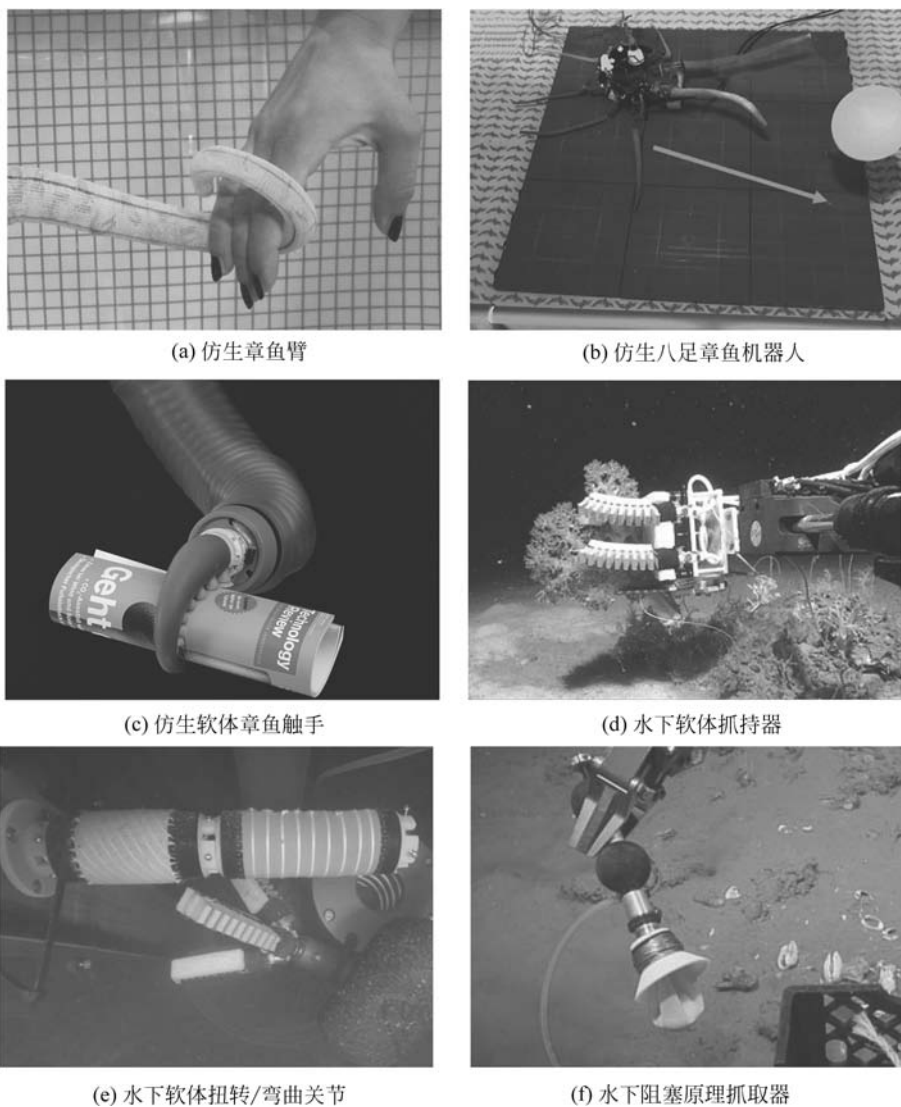


图 5-3 软体机器人水下抓取研究

体吸盘。路易克拉克大学 Autumn 教授从壁虎在竖直墙壁上的迅速攀爬行为获得灵感,与斯坦福大学合作研制出壁虎机器人 Stickybot。该机器人能够在空气环境下的光滑壁面上爬动,如图 5-4(a)所示。水下的仿生吸附相关机理近来也取得一些研究进展,美国布鲁克林学院 Setlur 研究组仿照章鱼吸盘制成了人造吸盘,并成功模拟了生物章鱼吸盘的水压调节过程。意大利理工学院 Follador 研究组通过对章鱼吸盘的吸附动作研究,利用 DE 制作出了仿生吸盘,如图 5-4(b)所示。上海交通大学付庄教授课题组在深入研究章鱼吸盘的基础

上研发出 SMA 驱动的仿生吸盘, SMA 以弹簧的形式嵌入软体结构中, 通电驱动使 SMA 弹簧收缩或扩张从而产生吸附力。意大利 Sadeghi 研究组仿照海胆的管足形态结构制作出具有硬质内核与柔性软质外皮的吸盘结构, 探索海胆管足的吸附过程, 如图 5-4(c) 所示。北京航空航天大学文力教授课题组通过深入研究鲫鱼吸盘结构学与水下吸附运动学机理, 利用多材料 3D 打印及微激光加工技术研制出一体化成型、多材料硬度梯度的仿生软体鲫鱼吸盘样机, 如图 5-4(d) 所示。该样机能够产生相当于自身重力的 340 倍的吸附力; 可通过调节鳍片抬起角度定量调节吸附摩擦力大小, 从而实现各向异性摩擦力的调控。该课题组将仿生鲫鱼吸盘样机集成在水下机器人上, 完成了水下机器人在不同表面上的自主吸附-脱附实验。

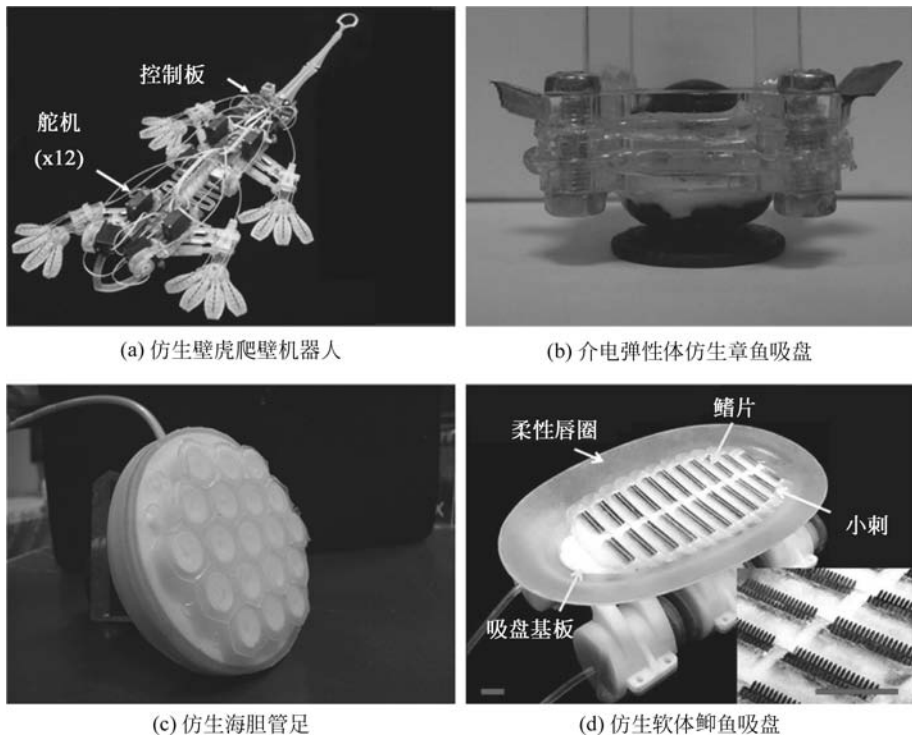
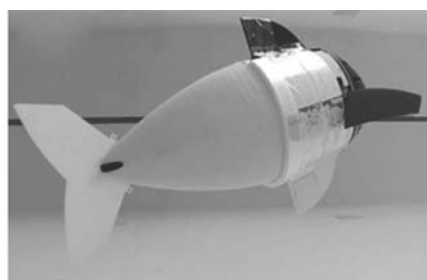


图 5-4 软体机器人水下吸附研究

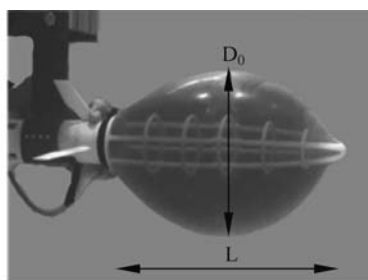
3. 水下游动

水下游动的软体机器人具有类似柔性生物组织的柔顺连续变形的驱动结构, 能够模仿鱼类等水下生物柔顺连续的游动模式, 一些可模仿鱼类及无脊椎

类生物推进的软体机器人也先后出现。麻省理工学院 Rus 教授课题组研制出一种用于 C 形启动的快速逃逸机器鱼,其大部分鱼身由高弹性软体材料加工而成,并集成了驱动、控制等各个子系统,在自主导航条件下实现了海洋环境下的自由游动,如图 5-5(a)所示。麻省理工学院 Triantafyllou 教授课题组研制了一种可以模仿章鱼喷射水流以快速逃逸的软体机器人,能够在逃逸过程中产生大幅收缩形变,使得该机器人在极短时间内产生高速射流,从而提高了逃逸速度,如图 5-5(b)所示。日本冈山大学 Suzumori 教授课题组研制了一种蝠鲼机器鱼,由两个可以双向弯曲的气动软体驱动器驱动,实现了水下自由游动,如图 5-5(c)所示。韩国首尔国立大学 Ahn 教授课题组研制了 SMA 驱动的仿生蝠鲼,能够实现拍动、波动等不同推进方式,如图 5-5(d)所示。浙江大学李铁风教授课题



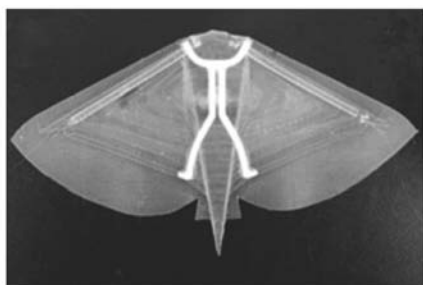
(a) 软体机器鱼



(b) 仿生章鱼射流逃逸



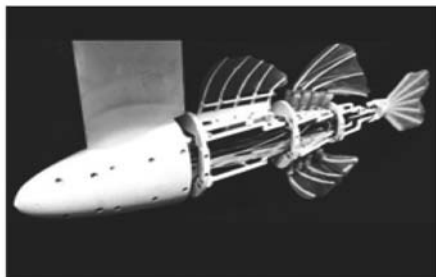
(c) 气动仿生蝠鲼



(d) SMA 仿生蝠鲼



(e) 仿生狮子鱼深海软体机器人



(f) 软体鱼鳍机器鱼

图 5-5 软体机器人水下游动研究

组研制了一种仿生狮子鱼深海软体机器人,将刚性电子器件分布集成在软体硅胶材料中以承受深海静水压力,应用 DE 肌肉使该机器人在马里亚纳海沟成功驱动,如图 5-5(e)所示。北京航空航天大学研制出由 IPMC 驱动、可在水中自如游动的小型机器鱼,及具有柔性鳍膜与柔性驱动、可模仿鱼鳍波动、收合等多运动模态的仿生尾鳍、仿生背鳍,并将软体鱼鳍集成在机器鱼平台上,探究了鱼在不同推进条件下的自推进水动力学特性,如图 5-5(f)所示。

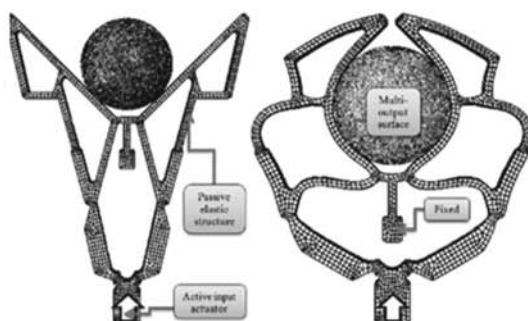
5.2 抓取、操作与可穿戴

机械手一直是众多科研人员的研究热点。经过数十年的发展,传统刚性手的研究已日趋成熟并且在工业上得到了应用。大部分的刚性手设计将电动机、力矩传感器和位置传感器等布置在关节处,将压力传感器等布置在手指表层或指尖,机械结构设计复杂。并且需要将多传感融合,运用复杂的控制算法才能完成抓取任务。尽管如此,因为自身缺乏柔顺性和适应性,它们极有可能损坏易碎的、易变形的和柔软的物体。为了提高机械手的适应性,人们开始研究基于柔顺机构的机械手设计。比如通过减少驱动器而增加自由度的欠驱动手,通过线缆驱动或者欠驱动机构,可以部分实现对物体的适应包覆,如图 5-6(a)所示。此外,人们还研发了可以随着物体被动变形的机械手结构,比如德国 Festo 公司研发的 Fin-ray 抓持手、基于几何拓扑结构的自适应手和基于颗粒阻塞的通用软体手等,分别如图 5-6(b)和图 5-6(c)所示。

近期,软体机器人领域和材料科学领域的不断突破将机械手的研究推向了一种更简单、更通用的研究方向——软体手。软体手大多由弹性硅胶材料制成,可以连续变形,所以它们可以轻松地环抱物体和适应物体。根据软体手不同的驱动策略,可以将软体手分为四类:线缆驱动、智能材料驱动、表面吸附和流体驱动。与欠驱动机械手不同,线缆驱动的软体手大部分采用硅橡胶材料制作主体,从而保证手和物体全方位的软接触。智能材料可以在如声、光、电、热等外界刺激下改变自身的形状,是研究微小型软体手的最佳方案。比如,介电弹性体在受到麦克斯韦力的时候,其厚度会减小从而增大面积,人们充分利用这种电场下的内应力研制了介电弹性体 MES 软体手,如图 5-7(a)所示,并且将介电弹性体和低熔点合金或者形状记忆聚合物等材料融合研制了可变刚度的软体手,如图 5-7(b)所示。但是该软体手需要很高的电压才能驱动。离子聚合物



(a) 欠驱动手



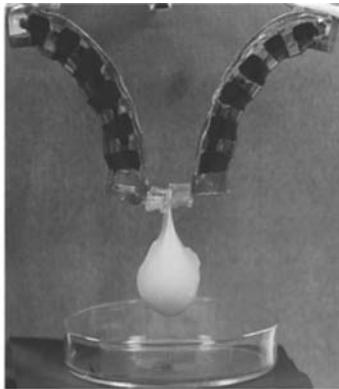
(b) Fin-ray抓持手



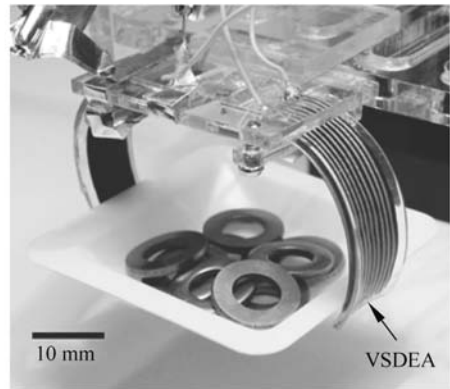
(c) 基于颗粒阻塞的通用软件手

图 5-6 基于被动机制的机械手

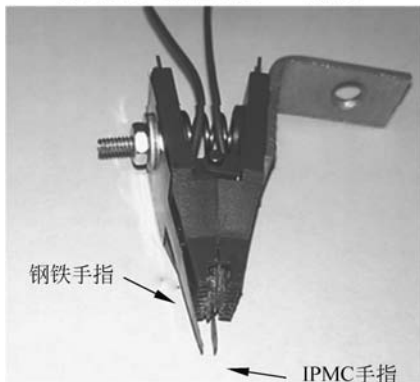
金属复合材料是另一种可以制作软体手的电活性聚合物,但是由于这种材料的亲水性,这类软体手只能在手下应用,如图 5-7(c)所示。形状记忆合金的马氏体相变效应也被用来驱动软体手,如图 5-7(d)所示,并且它在相变时的变刚度效应也被用在变刚度软体手的研发中。此外,有的科学家还将导电纳米颗粒如铁粉等以及液态合金与硅胶结合,研制了电磁驱动的微型软体手。还有利用智能材料的热变形、光驱动和溶胀效应制作的微型软体手,如图 5-7(e)所示。



(a) 基于介电弹性体的MES软体手



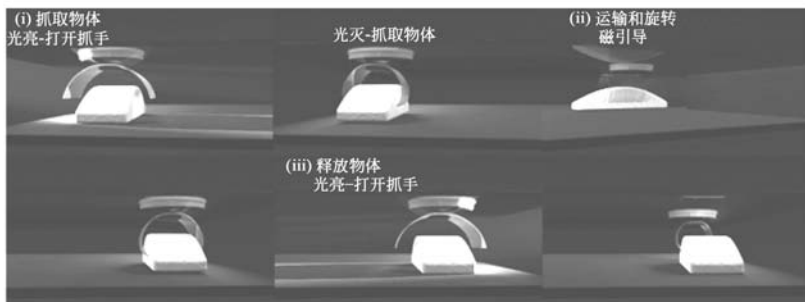
(b) 介电弹性体和低熔点合金结合的软体手



(c) IPMC软体手



(d) 基于SMA的软体手



(e) 光驱动软体手

图 5-7 基于智能材料的软体手

对于那些基于吸附机理的软体手,广为人知的就是基于壁虎刚毛的吸附,在正向压力下,这种微结构可以产生很大的范德华力,从而实现光滑物体的贴附抓取。科学家将壁虎刚毛微结构和弹性基底或者流体弹性驱动器结合,研发了可以抓取数百倍于自身质量的软体手,如图 5-8(a)所示。另外一种基于吸附机理的软体手是利用静电吸附的电吸附软体手,如 Grabbit Inc. 公司研发的软体手和基于介电弹性体的电吸附软体手,分别如图 5-8(b)和图 5-8(c)所示。

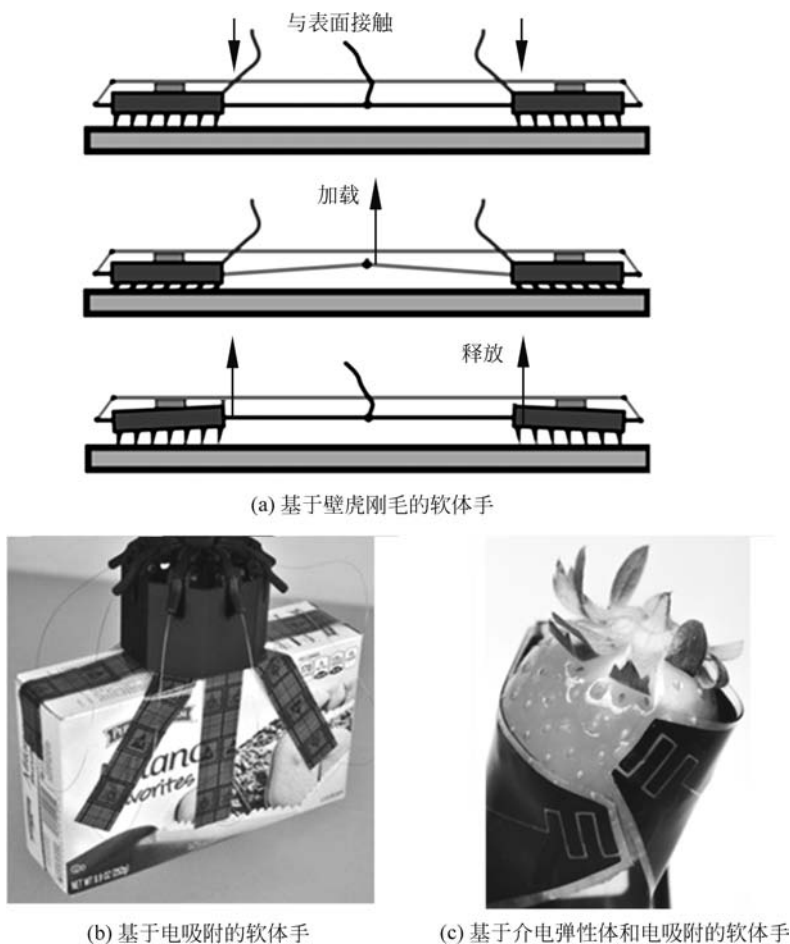
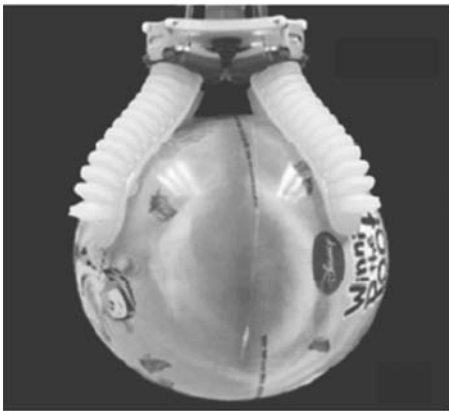


图 5-8 基于吸附机理的软体手

流体弹性驱动器因为其低成本、高鲁棒性和易加工的特点被广泛应用在软体手中,与其他类型的软体手相比,它们不需要高电压、干净的物体表面和电磁场或水等这些特殊环境需求。为了实现弯曲包覆动作,基于流体弹性驱动器的软体手都设计为非对称几何结构[如图 5-9(a)所示]或者由各向异性材料制备

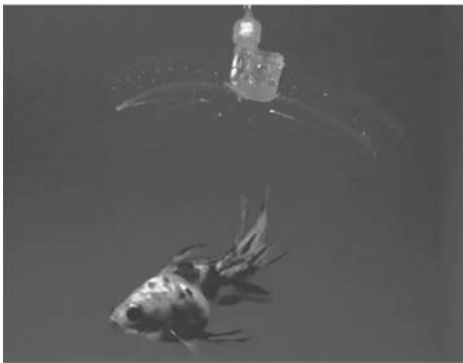
而成,从而保证在压力驱动下将腔道的伸长转换为弯曲运动。在软体手中最为常见的流体弹性驱动器是纤维增强驱动器和特殊几何非对称形状的驱动器。这种基于流体弹性驱动器的软体手被广泛应用于点到点抓取、可穿戴软体手套、水下伪装作业和自修复软体手等,如图 5-9(b)~(d)所示。此外,为了丰富软体手的传感功能,各种各样的传感器也相继被研发出来,比如基于透明硅胶的可延展的光波导传感器、基于霍尔效应的弯曲传感器、弹性织物制作的电容传感器,以及用液态合金制作的各种应变传感器、压力传感器等。由于流体弹性驱动器多为硅胶材料制成,在某些同时要求负载和柔顺性的场合下不能输出足够的力或者承受大的载荷,所以有科学家开始引入变刚度机制,研发变刚度软体手。例如,基于颗粒阻塞的变刚度软体手、利用低熔点合金和形状记忆聚合物等智能材料的变刚度软体手等。



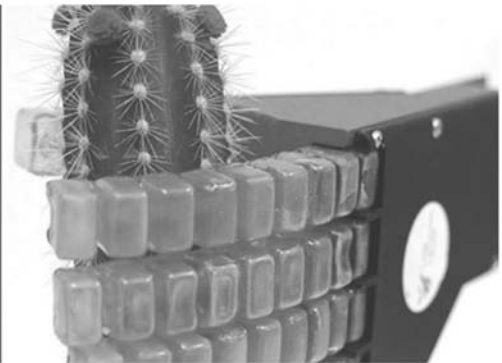
(a) 非对称几何结构软体手



(b) 纤维增强驱动器软体手



(c) 水下伪装软体手



(d) 自愈修复软体手

图 5-9 基于流体弹性驱动器的软体手

习题

1. 简述在水下抓取应用中软体臂相比于刚性臂的优势。
2. 生物的吸附方式可以分为互锁、摩擦力和黏结,查阅相关文献,简述这三种吸附方式的基本原理和对应的典型生物以及仿生软体机器人。
3. 简述 SMA 驱动、IPMC 驱动和 DE 驱动用于水下驱动时各自的优势。
4. 鱼类的游动方式主要分为 BCF 和 MPF 推进模式,查阅相关文献,简述这两种推进方式的特点和对应的典型生物以及仿生软体机器人。
5. 简述 Fin-ray 抓持手的结构特点和抓取机制。