科学通报
评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

软体机器人的仿生物理智能

王世强[1], 谢哲新[1,2], 袁菲阳[1], 李磊[1], 刘昱辰[1], 王田苗[1], 文力[1*]

1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学高等理工学院, 北京 100191
* 联系人, E-mail: liwen@buaa.edu.cn

2021-11-22 收稿, 2022-02-05 修回, 2022-02-10 接受, 2022-02-11 网络版发表
国家重点研发计划(2018YFB1304600, 2019YFB1309600)和国家自然科学基金(91848206, 92048302)资助

摘要 生物可以在各种非结构化自然环境中生存, 其身体中所蕴含的物理智能至关重要, 涉及材料、结构和形态等要素. 通过融合仿生物理智能, 有望降低软体机器人控制成本, 提高机器人系统响应速度和极端环境下的鲁棒性, 以及使微型机器人更加智能化. 本文阐述了自然界生物的材料、结构、形态学物理智能特征及其原理, 介绍了软体机器人实现仿生物理智能的目的及相关的关键技术与方法, 列举了软体机器人仿生物理智能的典型应用, 最后展望了软体机器人仿生物理智能的未来发展及挑战. 软体机器人仿生物理智能有望在高速动态作业、极端环境探索及微型机器人智能化等方面发挥独特的优势, 相关研究将进一步促进生物、机器人、材料、化学和计算机学科之间的交叉.

关键词 软体机器人, 仿生, 物理智能, 材料, 结构, 形态

随着机器人从工厂、仓库等高度结构化的环境进入千家万户以及深海、太空、人体体内等非结构化环境中, 它们需要在动态和不确定性的环境中执行各种任务, 并与人交互. 以机器学习为代表的智能技术蓬勃发展, 促进了机器人的智能化. 当前, 机器人的智能大多体现在算法与软件层面, 而硬件组件仅仅局限于执行控制器下达的任务指令[1]. 智能体(如生物和机器人等)的智能不仅包括大脑中的计算智能(computational intelligence), 还包括编码在身体中的物理智能(physical intelligence), 以及将二者紧密耦合在一起的嵌入智能(embodied intelligence)[2], 如图1所示. 其中, 物理智能是指将传感、驱动、控制、记忆、逻辑、计算、适应、学习和决策等智能要素编码到智能体的身体中(或产生于身体与环境的交互过程中)[2]. 物理智能(主要包括材料智能、结构智能、形态学智能)可以降低控制成本, 提高机器人系统响应速度和极端环境下的鲁棒性, 并使微型机器人更加智能化. 物理智能作为一种新的范式, 有望使未来的机器人研究不仅仅局限于计算智能, 同时挖掘探索蕴藏在机器人身体中的巨大潜力. 这对于应对未来老龄化社会人力短缺, 提供物理实体服务将有着重要的作用.

不同于刚性机器人大量使用传感器和控制器来感受和响应外界刺激, 软体机器人往往采用刺激响应型功能材料对光、热、电、磁等外界刺激进行响应[3]. 随着将传感、驱动、计算、通信、记忆等功能集成在一起的智能软体材料被进一步开发[4,5], 软体机器人有望充分发挥物理智能的潜力, 成为探索自然界物理智能的重要载体和平台. 生物可以在各种非结构化环境中生存、觅食、繁衍, 这得益于其身体(包括材料、结构和形态)中蕴含的物理智能. 本综述将重点讨论仿生设计的方法, 以及如何将仿生智能材料、结构和形态融入软体机器人的身体中, 进而将仿生物理智能引入

引用格式: 王世强, 谢哲新, 袁菲阳, 等. 软体机器人的仿生物理智能. 科学通报, 2022, 67: 1–17
Wang S Q, Xie Z X, Yuan F Y, et al. Bio-inspired physical intelligence for soft robotics (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 1–17, doi: 10.1360/TB-2021-1217

© 2022《中国科学》杂志社

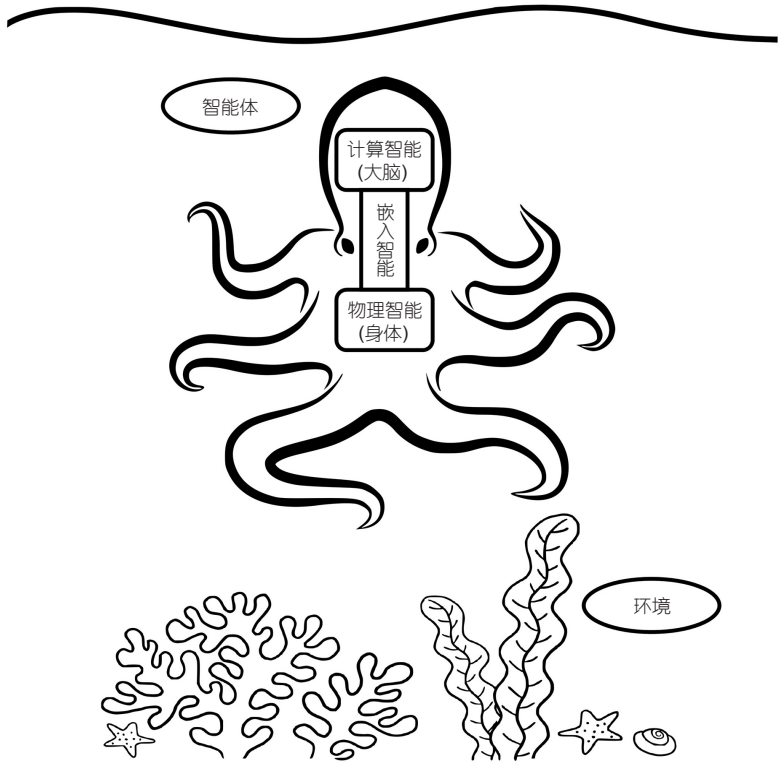

图 1 仿生物理智能的基本概念
Figure 1 Basic concept of bio-inspired physical intelligence

软体机器人中.

近年来国内外已经发表了一些软体机器人的综述[6,7], 从材料[3]、结构、驱动[8]、传感、控制和应用等方面对软体机器人进行了介绍和总结. 软体机器人的智能化是一项重要挑战, 本综述从仿生物理智能这一个视角对相关研究工作进行了总结、分析和讨论, 有望为软体机器人智能化的研究提供一个新的思路.

1 自然界生物的物理智能及其原理

人类的大脑有1.4 kg重, 由约860亿个神经元组成, 其中大脑皮层的神经元数量约160亿, 是自然界中最多的, 人类的神经系统也是自然界最复杂的神经系统[2]. 高度发达的神经系统使得人类神经智能在过去受到了广泛的关注与深入的探索. 但是, 生物的认知和智能行为并不是大脑孤立计算的结果, 而是源于大脑、身体和环境的相互作用[1]. 换言之, 任何生物系统的行为都不仅是神经系统控制的结果, 同时还受到形态(如身体形状)、感受器和肌肉驱动的类型和位置、组织材料特性等多重因素的共同影响[9]. 软体动物章鱼不仅具有无脊椎动物中最发达的神经系统(脑内约有1亿个神经元), 还具有突出的物理智能. 神经智能与物理智能二者共同促成了其在复杂和极端的自然环境下卓越的生存、捕食、变形伪装等能力. 而单细胞生物、所有植物以及部分多细胞生物(如真菌、海绵、黏菌、扁盘动物等)均没有神经元, 这些生物只能依靠物理智能来实现智能行为[2].

探索生物物理智能的机制有助于开发机器人的物理智能. 编码在生物体中的物理智能主要依赖身体的材料、结构和形态三大要素来实现. 自然界生物的物理智能有很多例子, 本文将通过一些典型的例子阐述这三大要素在动物和植物的功能中发挥的作用.

1.1 生物材料的物理智能

经过数十亿年优胜劣汰、适者生存的进化, 生物材料具备了人工材料不可比拟的优势. 生物材料几乎都是复合材料, 具有刺激响应性、变刚度、自愈合等智能特性. 一些植物种子的自埋行为可以提高它们发芽和存活的机会, 这是通过可响应环境湿度变化的芒来实现的. 例如, 天竺葵种子的芒在潮湿环境中处于舒展状态, 在干燥环境中则会螺旋缠绕, 由此产生的运动

可以帮助种子钻入土壤[10], 如图2(a)所示. 类似地, 野生小麦具有一对芒, 在干燥的白天弯曲, 在潮湿的晚上变直. 每天的湿度循环导致芒的周期性运动, 而覆盖在芒上的微毛则使种子只能向下运动, 最终钻入土壤[11]. 在干旱环境中生长的冰草具有一种独特的种子传播机制[12]. 在干燥时, 冰草种皮上的5个保护阀覆盖种子室, 防止种子过早传播. 在吸水充足时, 每个阀门在几分钟内以约150°的角度向外和向后展开, 从而增加了种子在有利于发芽的条件下传播的可能性. 柳叶鳗(鳗鱼幼体)的组织和器官主要由活性透明水凝胶组成, 在水中可以实现光学伪装, 能够减少被天敌发现的风险[13]. 许多棘皮动物可以快速且可逆地改变真皮刚度, 实现抵御天敌的目的. 例如, 海参真皮中的刚性胶原纤维可以增强软基质, 在刺激条件下可通过相邻胶原纤维之间的瞬态相互作用迅速增强真皮刚度(从5 MPa到50 MPa)[14]. 此外, 自愈合也是生物材料最突出的特性之一, 可以提高生物的生存能力和寿命. 在自然界中, 自愈合可以发生在单分子水平上(例如DNA修复), 也可以发生在宏观水平上(例如骨折愈合、受损血管的闭合和愈合)[15].

1.2 生物结构的物理智能

一个物种要能成功地生存, 一方面要使组成自身结构的材料最少, 以减少自身生长所消耗的能量; 另一方面要尽可能地利用更大的环境空间, 以从自然界中获得更多的能量[16]. 双稳态结构、折纸结构、张拉整体结构等智能结构广泛地存在于自然界的生物中, 可以满足生物体这两方面的要求. 捕蝇草叶片具有双稳态结构, 可以利用机械不稳定性在大约100 ms内快速闭合, 是植物界最快的运动之一[17]. 折纸结构可以在植物的叶子和昆虫的翅膀中找到. 角树和山毛榉的叶子具有波纹状的Miura-Ori图案, 使它们能够在萌芽时展开[18]. 叶子侧脉与中心脉的角度越大, 叶子在芽内折叠得越紧凑, 但展开所需的时间也更长. 蠼螋的翅膀为典型的折纸结构, 拥有动物界最高的折叠比(1∶10到1∶18), 可以在没有肌肉驱动的情况下实现快速自折叠. 此外, 中翼区域的双稳态结构可以使翅膀在飞行过程中自锁并保持展开状态[19], 如图2(b)所示. 张拉整体结构在自然界中各种不同尺度的生物体上均有发现. 例如, 细胞骨架类似于张拉整体结构, 细胞骨架中的微管和微丝分别对应受压构件和受拉构件[20]. 脊椎动物则通过刚性的骨骼和柔韧的肌肉相互联结来保证其结构兼具坚固性和灵活性[21].

1.3 生物形态的物理智能

形态在生物的行为和运动策略中起着重要的作用. 风滚草具有球形的骨架, 当干燥的秋天来临时会与根部脱离, 利用风力在平坦的土地上滚动和弹跳, 以此传播种子[22]. 枫树的种子受其几何形状和重心分布影响, 在下落时会自动旋转并产生稳定的前缘涡流, 带来的高升力可使其在空中飞行更长时间, 从而扩大传播范围[23]. 一条死去的虹鳟鱼在卡门涡街中可以左右摆动并逆流而上, 看起来和活鱼无异[24,25], 如图2(c)所示. 这得益于其身体形态与涡流相互作用产生的被动推力. 自适应形态使生物能够克服固定形态所带来的限制. 由于不同的环境需要特定的形态, 许多动物已经进化出可变形的身体来扩大它们的活动范围. 例如, 章鱼可以挤过比其身体小得多的孔. 鸟类的翅膀可以根据不同的飞行模式进行变形以获得最佳的飞行性能. 伸展的翅膀更适合慢速滑行和转弯; 后掠翼更适合快速滑行和转弯[26]. 鸟类还利用折叠的翅膀在非常杂乱的环境中飞行, 并穿越略大于它们身体的缝隙[27]. 自适应形态还可以帮助动物快速躲避捕食者. 例如, 金轮蜘蛛在受到其死敌——捕食性黄蜂的攻击时, 会在短暂的奔跑后将身体变成轮形并滚下沙丘[28]. 当受到惊扰时, 蹼趾蜥蜴会将自身卷曲成环状, 从岩石表面的斜坡上滚下, 速度远远快于在斜坡上奔跑[29].

2 软体机器人仿生物理智能

仿生物理智能不仅仅局限于软体机器人的研究, 该研究思路/范式也可以服务于其他的智能机器人或无人系统. 仿生物理智能有3个核心要素: 材料智能、结构智能、形态学智能. 通过融合仿生物理智能, 软体机器人有望达到4个核心目的: (1) 降低控制成本, (2) 提高系统响应速度, (3) 提高极端环境下的鲁棒性, (4) 使微型机器人智能化, 如图3所示. 本文提到的以上仿生物理智能的3个核心要素和4个核心目的主要是面向服务于下一代的软体机器人研究, 提供新的研究思路. 针对其他的智能机器人或无人系统的仿生物理智能, 未在本文中过多讨论.

2.1 软体机器人物理智能目的

2.1.1 降低控制成本

生物系统通常不仅仅依靠大脑来控制自己的身体,

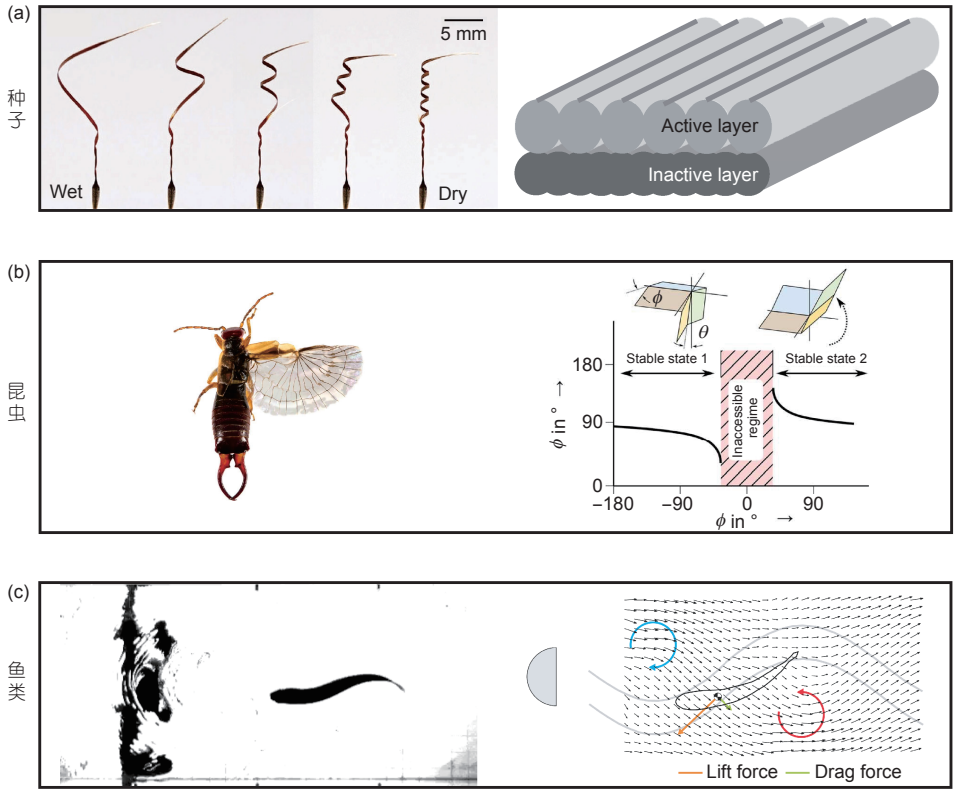

图 2 (网络版彩色)自然界生物的物理智能及其原理. (a) 天竺葵种子的芒可响应湿度变化, 干燥状态下螺旋缠绕, 帮助种子钻入土壤[10]; (b) 蠼螋的翅膀通过折纸结构和双稳态结构实现自折叠和自锁功能[19]; (c) 一条死鱼在身体与涡流的相互作用下逆流而上[24,25]

Figure 2 (Color online) Physical intelligence of natural organisms and its principle. (a) The awns of Pelargonium seeds can respond to changes in humidity and spirally twist in the dry state, which enable the seeds to burrow into the soil[10]; (b) the earwig wing has self-folding and self-locking functions realized by origami and bistable structures[19]; (c) a dead fish swims upstream through the interaction between its body morphology and the vortices[24,25]

而是将部分控制交付于身体本身. 对于以计算智能为主的机器人, 增加身体中的物理智能可以降低控制成本. 目前, 多数机器人的控制通常采用集中式控制方案, 即通过中央控制器控制所有关节的运动. 该控制方案对于在非结构化环境中运行的机器人尚未取得很好的控制效果[9]. 例如, 刚性机器人在进行抓取或者越障等需要和环境进行交互的任务时, 一方面需要大量的传感器, 显著增加了控制算法的复杂性; 另一方面仍然缺乏适应性. 物理智能通过将计算和控制分配给身体, 为解决机器人的上述挑战提供了可行的方案. 特别是软体材料固有的柔顺性, 可以根据环境的状态变化自适应地做出机械响应, 减少了软体机器人对传感器和控制算法的依赖.

例如, 基于颗粒阻塞原理的“通用软体抓手”无需任何传感器和智能控制算法, 利用自身柔性即可实现对不规则物体的抓取[30]. 仿植物根部生长型机器人通过增材制造技术实现身体的生长, 并利用身体与环境的交互被动地调整身体形态和生长方向, 成功地在粗糙的土壤环境中穿越各种障碍物[31]. 该机器人利用软体材料、身体动力学以及与环境的交互来执行复杂的避障任务, 有效地降低了控制策略的复杂性. 适应地形变化是机器人在非结构化的现实环境中部署的关键. 像动物一样具备柔性的腿部, 可以显著提高机器人在不同环境条件下的运动速度和稳定性[32]. 气动软体腿式机器人无需任何额外的控制策略调整, 采用相同的交替三脚架步态即可在一系列具有挑战性的环境(如崎岖、陡峭和不稳定的地形)中运行, 这得益于其软体腿部结构对地形环境的适应性[33].

2.1.2 提高系统响应速度

生物体的神经系统和机械系统是动态耦合的, 慢速、变频运动的控制主要由中枢神经系统主导, 而快速、节律性的运动更多由机械系统控制[34]. 对于以中枢神经系统为主导的主动控制, 首先传感器要感知到刺激, 再将传感信息传送到神经系统进行处理, 神经系

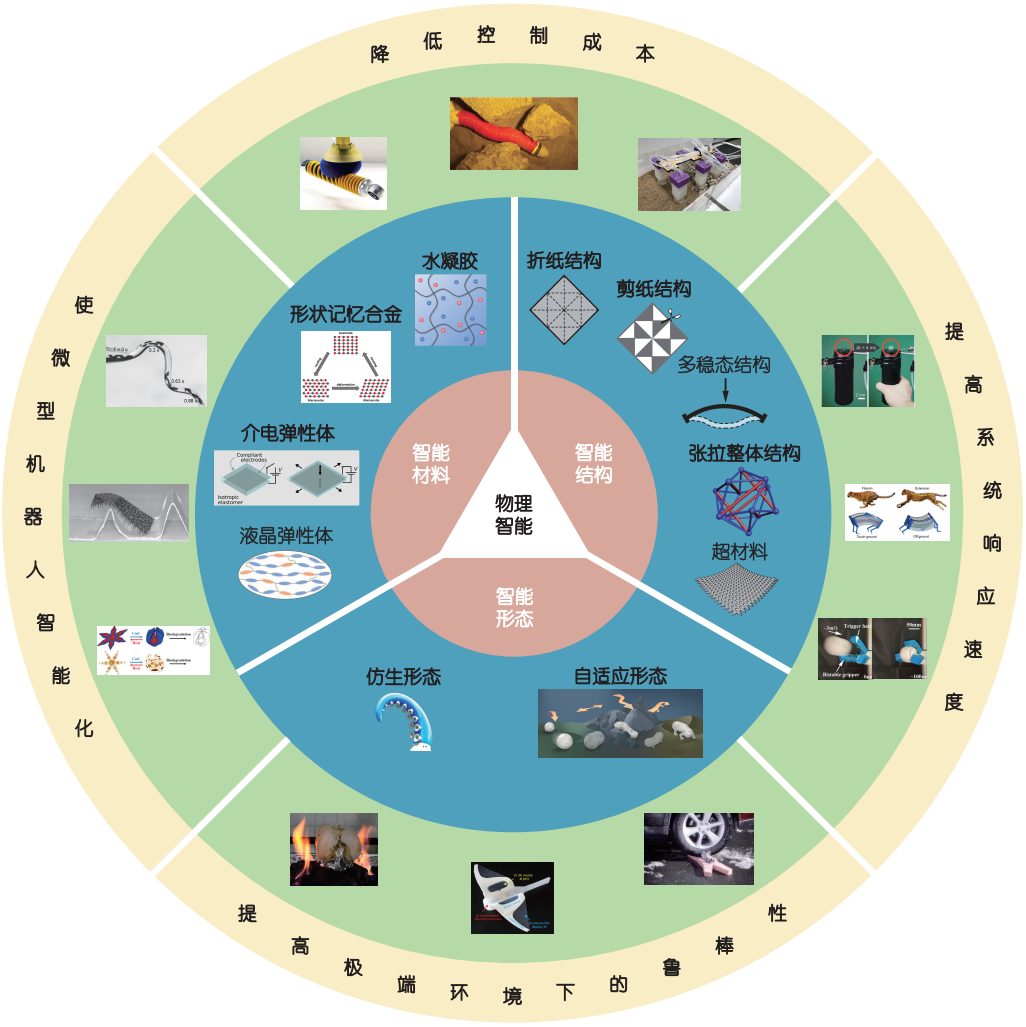

图 3 (网络版彩色)软体机器人实现物理智能的目的及方法
Figure 3 (Color online) Purposes and methods to create physical intelligence in soft robots

统将运动指令传送给肌肉, 肌肉再做出响应, 因此整个环路不可避免地会产生时间延迟. 以无意识的简单反应为例, 人类对于光刺激的反应时间大约是190 ms, 对于声音刺激的反应时间大约是160 ms[35]. 另一方面, 身体的被动响应——预反射(preflexes)在不涉及神经信号传输的情况下提供了对扰动的即时响应[36]. 例如, 蟑螂在奔跑中无需停顿即可快速适应不同地形. 这种适应不受大脑对感觉的反应所控制; 它基本上是机械的, 由肩部角度的变化给出, 并由柔性腿部关节的自稳定引导[37]. 该预反射有效地提供了一个机械闭环, 足以使蟑螂在扰动或地形变化中保持运动稳定性.

通过纯机械反馈的被动响应, 软体机器人可以避免因传感和控制信号的传输和处理所造成的延迟, 提高系统的响应速度. 受捕蝇草利用机械不稳定性实现叶片快速闭合的启发, 软体机器人还可以利用机械不稳定性进一步提高驱动速度. Stadlbauer等人[38]基于天然橡胶气球充气过程中出现的机械不稳定性, 设计了一种体温触发的超高速纯机械软体驱动器. 当用手握住储液罐时, 罐内的低沸点液体会发生液-气相变, 触发机械不稳定性, 在不到4 ms的时间内使气球尺寸迅速变大. Tang等人[39]受猎豹高速奔跑时脊椎弯曲和伸展的启发, 提出了一种基于双稳态脊椎的混合软体驱动器. 与传统的单稳态软体弯曲驱动器相比, 双稳态结构不仅使驱动器的响应时间加快了20倍(仅数十毫秒), 而且还使作用力提高了3倍以上. 邹俊教授课题组[40]受捕蝇草捕食反射的启发, 将应激反应策略应用于软体

抓手上，设计和制造了一种能够执行高速动态抓取任务的软体抓手. 利用双稳态软结构在预应力作用下的不稳定性，该软体抓手能够感知机械刺激并快速驱动，接住高速飞来的棒球. 这一抓取过程是完全被动的，既不需要高级传感和计算单元，也不需要高性能的驱动器.

2.1.3 提高极端环境下的鲁棒性

在诸如深海、太空、核电站等极端环境中，高温、高压、辐射等恶劣条件可能会阻碍电子器件的运行，使得计算智能无法发挥作用. 在此种情况下，物理智能将是机器人智能化的重要选择[2]. 软体机器人具有身体可变形、柔顺性高及在撞击时可吸收能量等优点，对于锤击[41]、汽车碾压[42]、超高静水压力[43]、积雪[42]、明火[42,44]、电磁辐射[44]等环境威胁具有较强的损伤抵抗力，适合在极端环境下运行. 同时，智能自愈材料在软体机器人中的使用将进一步提高机器人的鲁棒性和使用寿命[45].

2.1.4 使微型机器人智能化

自然界中个体微小的单细胞生物由于没有神经元，不具备神经系统，因此其智能完全取决于物理智能. 类似地，对于毫米尺度的微型机器人，由于尺寸限制，其机载计算和供电能力有限，物理智能与计算智能一样重要. 对于更小尺度的微型机器人，比如亚毫米尺度到微米尺度(即单细胞尺寸)，由于其不具备机载计算和供电能力，因此物理智能成为智能化的关键途径[2]. 目前的微型机器人通常是基于远程操作的移动微型机器人，使用磁场或声波进行无线驱动，其机动性往往非常有限，无法在非结构化环境中越过障碍物.

软体机器人由于具有更高的自由度，实现高机动性的潜力更大. 迈向完全自主的重要一步是使用刺激响应型材料、非线性力学机制和流体-结构相互作用来构建机载控制系统，直接将热和压力等环境刺激转换为驱动，而无需经历感知和计算循环[46]. Kobayashi等人[47]提出了一种可生物降解的热磁响应型软体微型抓手. 该微型抓手由热响应型水凝胶组成，可以根据热信号抓取和释放药物. 通过在水凝胶中掺杂磁性纳米颗粒，还可以在磁场引导下移动到指定位置. 完成药物输送任务后，在生理温度(~37°C)下即可实现生物降解. 申亚京教授与王钻开教授合作团队[48]将仿生锥形脚结构与软体磁性材料相结合，提出了一种多足软体微型机器人. 该机器人可由外部磁场驱动，在干燥和潮湿条件下都具有超快的移动速度、超强的承载能力和出色的越障能力. Huang等人[49]采用磁性水凝胶纳米复合材料制作了一种微型软体游泳机器人. 该机器人无需机载传感器，利用弹性流体动力学耦合即可根据周围流体的特性连续变形，从而实现自适应运动.

2.2 软体机器人实现物理智能的方法

如第1节所述，自然界中的动物和植物依靠材料、结构和形态这三大身体要素实现了丰富多样的智能行为. 受此启发，软体机器人可以利用智能材料(如液晶弹性体[50]、介电弹性体[51]、形状记忆合金[52]、水凝胶[53]等)、智能结构(如折纸结构[54]、剪纸结构[54]、多稳态结构[54]、张拉整体结构[55]、超材料[54]等)和智能形态(如仿生形态[56]、自适应形态[57]等)实现其物理智能，如图3所示. 我们将用于实现物理智能的智能材料、结构和形态分别命名为材料物理智能、结构物理智能、形态物理智能.

2.2.1 材料物理智能

目前人们通常将刺激响应型材料作为智能材料的同义词[58]. 刺激响应型材料能够感知、响应外部刺激(如光、电流、力等)而改变其属性(如形状、颜色、刚度等)，包括介电弹性体、水凝胶、形状记忆聚合物、液晶弹性体、磁弹性材料等[3]. 智能材料的加入使身体不仅可以产生驱动，还可以承担感知环境和处理相关信息的任务. 通过在材料中引入自愈能力，还可以帮助机器人在部分受损和发生物理故障时自主恢复功能.

Ren等人[59]采用磁弹性材料研制了一种可在充满液体的受限空间中进行自适应多模态运动的微型软体机器人，如图4(a)所示. 该机器人可以通过外部磁驱动进行主动变形，在滚动、波动爬行、波动游泳和螺旋表面爬行等多种运动模式间切换，实现在充满液体的受限空间中的灵活运动. 刘明杰教授与文力教授合作团队[60]研制了一种可热致多级变刚度的多相有机水凝胶，并用该材料分别制造了软体抓手和仿生章鱼触手. 软体抓手可以实现对不同物体的自适应抓取和刚度匹配，仿生章鱼触手则可以实现对多种表面形貌的可编程吸附(图4(b)). Terryn等人[61]合成了由热可逆共价网络组成的柔性自愈合Diels-Alder聚合物，并将其用于制造3种不同的自愈合气动软体机器人：软体手(图4(c))、软体夹持器和人工肌肉. 在这3种应用中，软体机器人受到的损伤都可以通过温和的加热实现完全愈合. 该方法提高了软体机器人的物理鲁棒性和使用寿命. Mishra等人[62]采用水凝胶制作了一种可以通过自主排汗来维持稳定体温的流体弹性体驱动器，如图4(d)所

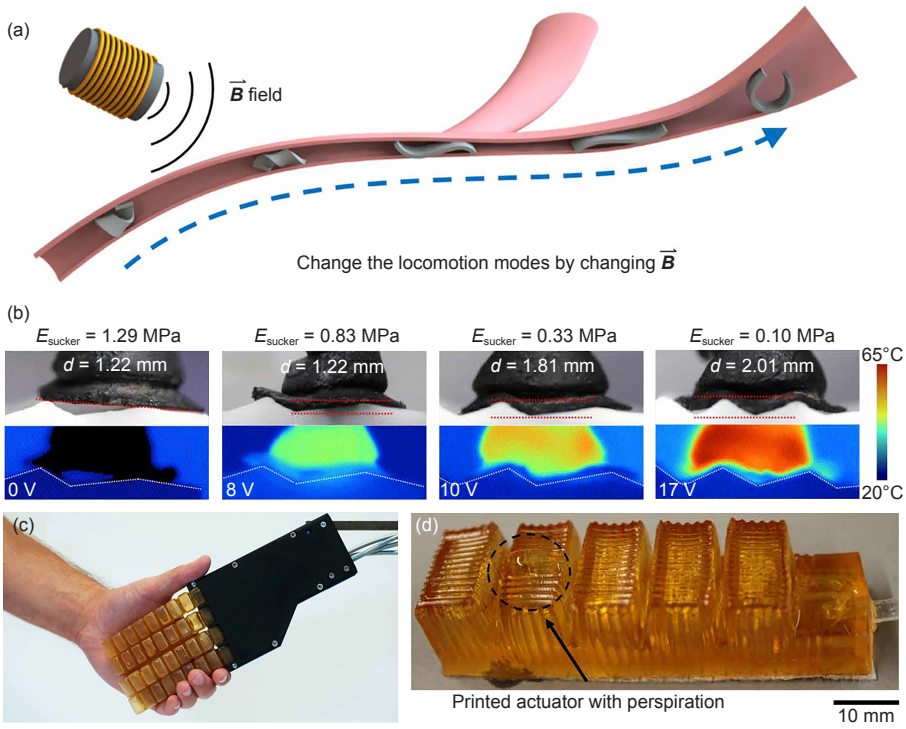

图 4 (网络版彩色)通过智能材料实现物理智能. (a) 由磁弹性材料制成的微型软体机器人可在充满液体的受限空间中实现多模态运动[59]; (b) 由多相有机水凝胶制成的变刚度仿生章鱼吸盘可吸附在不同粗糙表面上[60]; (c) 由Diels-Alder聚合物制成的软体手具有自愈合能力[61]; (d) 由水凝胶制成的软体驱动器可通过自主排汗保持稳定的体温[62]

Figure 4 (Color online) Intelligent materials-based physical intelligence examples in soft robots. (a) Soft millirobot constructed of magneto-elastic materials with multimodal locomotion in fluid-filled confined spaces[59]; (b) multiphase organohydrogel-based variable stiffness biomimetic octopus sucker that can stick to a wide range of rough surfaces[60]; (c) soft hand made of Diels-Alder polymers with the self-healing ability[61]; (d) soft hydrogel-based actuator maintaining stable body temperatures via autonomic perspiration[62]

示. 在低温时, 驱动器上的气孔充分闭合, 以便进行加压和驱动; 而在高温时, 气孔会膨胀扩张, 以实现液压驱动器的局部排汗. 通过使用集成了驱动、传感和温度调节的智能材料, 该驱动器可以在没有传感器和控制器的情况下控制排汗率和特定区域的体温调节.

2.2.2 结构物理智能

智能结构对于增加基于软体材料的智能系统的系统复杂性和功能多样性至关重要. 智能结构具有非传统和可编程的机械性能, 以形态和功能自适应的方式对环境变化做出响应[55]. 这些特征将智能结构与主要目的为提供承载能力的典型静态结构区分开来. 折纸、剪纸、多稳态、张拉整体结构和超材料等智能结构是实现软体机器人物理智能的重要选择.

折纸是一种将带有预设计折痕的二维平面材料按照折痕折叠形成三维结构的技术[63]. 折纸结构具有很强的折叠和展开能力, 制造和装配简单. 通过折叠和展开的切换, 基于折纸结构的机器人可以根据特定的任务和环境调整自己的形状, 并实现灵活的运动. 例如, Felton等人[64]开发了一种以折纸为灵感的自折叠爬行机器人, 如图5(a)所示. 该机器人由结构内部嵌入的形状记忆复合材料驱动, 能够在4 min内从平板结构自动折叠成为三维结构, 无需人工干预即可自行运动. Lee等人[65]提出了一种基于折纸结构的可变直径车轮, 使机器人能通过低矮的通道, 跨越高台阶等, 进而提高了其在非结构化地形中的机动性.

剪纸是折纸的一种变体, 可以通过对剪裁后的二维平面材料施加外力形成三维结构[66]. 剪纸结构可以简单、高效地产生二维到三维的形状变化. 例如, 将剪纸技术应用于基于液晶聚合物网络的光敏薄膜, 通过拉伸、扭转和弯曲等外部应力场可以建立不同的三维结构[66]. 采用此方法制造的剪纸结构滚动机器人在光驱动下可以实现多步态滚动运动. 四瓣花形状的剪纸结构薄壳在单轴拉伸下可以产生抓取运动[67]. 基于该原理制成的剪纸结构抓手可以快速、精确地抓取各种

不同形状和刚度的物体, 如图5(b)所示. 剪纸皮肤在软体驱动器充气拉伸时会形成三维纹理并改变表面的摩擦特性, 使得单个软体驱动器能够有效地爬行, 简化了软体爬行机器人所需的驱动[68].

双稳态结构具有两个局部势能极小值, 在没有外部载荷的情况下可以停留在两个稳定平衡状态中的任何一个[39]. 在适当的外部载荷作用下, 双稳态结构会触发突跳动作, 即从一种稳态转换到另一种稳态, 高速产生大位移和大变形的同时快速释放能量. 一个具有两个以上稳定平衡状态的结构被称作多稳态结构. 利用双稳态或多稳态结构的机械不稳定性可以提高软体机器人的驱动速度和输出功率, 建立机械传感、逻辑和

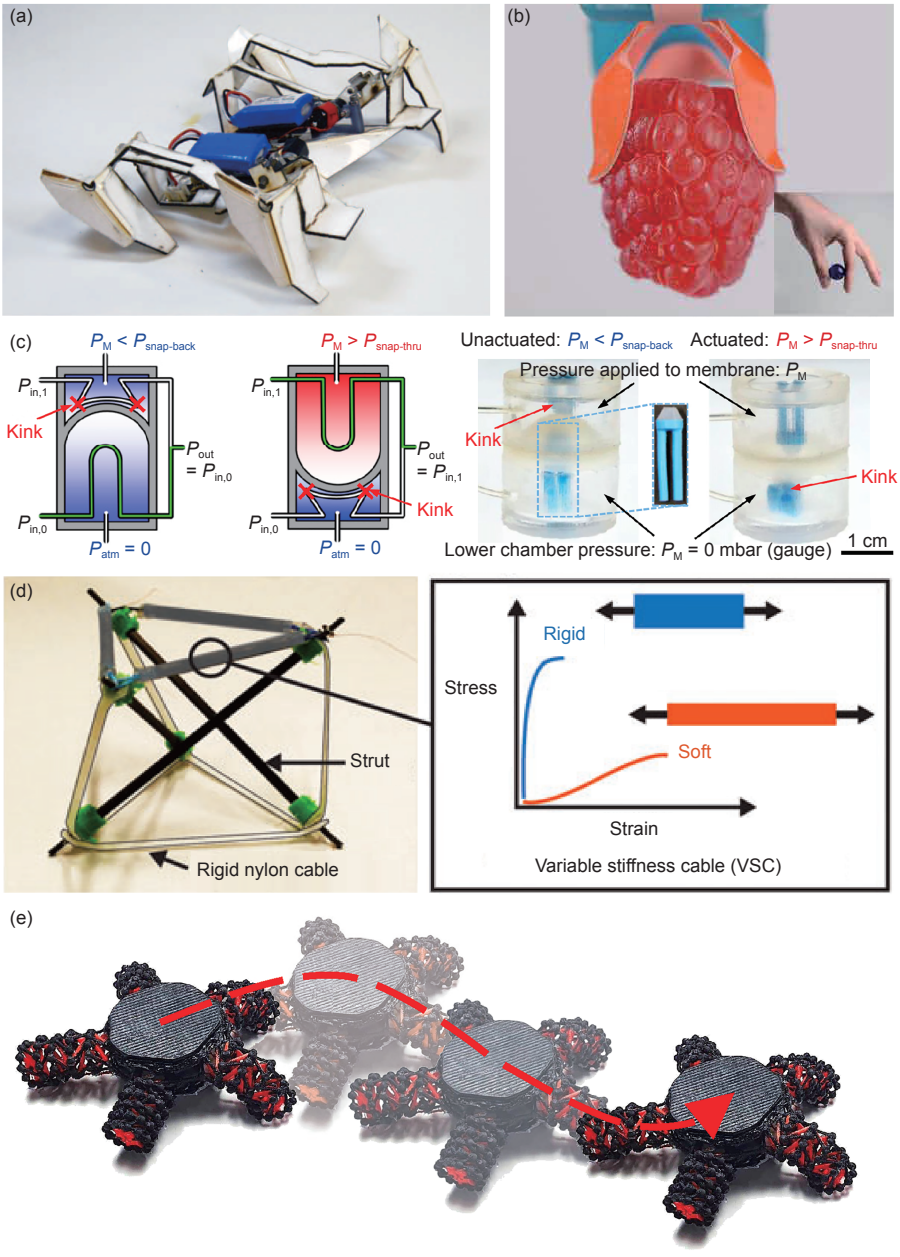

图 5 (网络版彩色)通过智能结构实现物理智能. (a) 以折纸为灵感的自折叠爬行机器人[64]; (b) 剪纸结构抓手[67]; (c) 软体气动双稳态阀, 可组合形成全软气动数字逻辑门(与或非)[70]; (d) 变刚度张拉整体结构[73]; (e) 能够向任意方向行走的张拉整体超材料软体机器人[55]

Figure 5 (Color online) Intelligent structures-based physical intelligence examples in soft robots. (a) Origami-inspired self-folding crawling robot[64]; (b) kirigami gripper[67]; (c) soft pneumatic bistable valve, which can be combined to generate completely soft pneumatic digital logic gates (OR, AND, and NOT)[70]; (d) variable-stiffness tensegrity structures[73]; (e) soft robot made of tensegrity metamaterials capable of walking in any direction[55]

控制. 例如, Pal等人[69]设计了一种由3个双稳态气动驱动器组成的全软抓取器, 其中包括两个双稳态叶片和一个中央双稳态触发器. 每个双稳态元件都由预拉伸弹性层和应变限制层组成. 在对中央双稳态触发器进行气动加压后, 两个双稳态叶片能够同时在约50 ms内从凸起打开状态转换到凹陷闭合状态, 从而实现抓取器的闭合. Preston等人[70]将软体气动双稳态阀(图5(c))与一个或多个气动输入相结合开发了软体气动数字逻辑门(与或非). 由软体气动数字逻辑门组合形成的软体数字逻辑电路可以实现数据存储、信号处理、数模转换、环境传感以及人机交互等功能.

张拉整体结构是一些离散的受压构件包含于一组连续的受拉构件中形成的稳定自平衡结构[71]. 张拉整体结构具有刚度质量比高、可控性好、可靠性高、结构柔顺和可展开等优点. 例如, Liu等人[72]使用热响应形状记忆聚合物作为张拉整体结构的压杆, 弹性体作为拉索, 创建了可主动展开的张拉整体结构. 压杆可预先编程为紧凑的形状, 在加热后再恢复笔直, 使张拉整体结构展开, 实现显著的形状变化. Zappetti等人[73]在可拉伸管道中封装低熔点合金作为变刚度拉索, 设计了一种新的变刚度张拉整体结构, 如图5(d)所示. 该变刚度张拉整体结构可产生显著的刚度变化, 进而提供可调的承载特性、形状锁定和可控变形. 此外, 张拉整体结构的柔顺性使其能够吸收冲击, 与人意外碰撞时对人的伤害也较小, 在人机交互中具有应用前景. 例如, Wang等人[74]采用刚性有机玻璃棒作为压杆, 人工肌肉纤维作为拉索来组成张拉整体结构. 人工肌肉纤维由液晶弹性体-碳纳米管复合材料组成, 可产生较大的可逆光致变形, 从而实现张拉整体机器人的光驱滚动运动. 该张拉整体机器人不但具有较强的变形能力和承载能力, 而且具有出色的弹性和缓冲能力, 能够保护易碎货物免受损坏.

超材料是一类具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或材料[75], 其性质往往取决于内部的人工结构, 而非构成材料的本征性质. 超材料的基本组成单位称为胞元, 剪纸结构、折纸结构、张拉整体结构和多稳态结构等都可以作为超材料胞元. 机械超材料是超材料的一个重要分支, 具有各种独特的机械性能, 如超高的刚度和强度重量比、负泊松比和负热膨胀系数等[54]. 在软体机器人中使用机械超材料可能会使未来智能机器人的设计、制造和感知发生范式转变. 在机械超材料结构中利用机械不稳定性可以创建机械记忆和逻辑. 例如, Chen等人[76]提出了一种具有稳定记忆的可重编程机械超材料. 该超材料由一组物理二进制元素(m-bits)构成, 具有清晰的写入和读取阶段. 利用磁驱动在双稳态外壳的平衡点之间移动, 每个m-bit可以在两个稳定状态(作为存储器)之间独立可逆地切换. 通过霍尔传感器测量每个m-bit正上方的磁场强度可以读取其编程状态. El Helou等人[77]提出了一种具有可编程弹性不稳定性的软体导电机械超材料, 其具有数字逻辑门的功能, 能够对机械应力输入组合执行数字计算. 通过在超材料的弹性基板表面图案化导电聚合物网络, 不同的机械应力输入组合使得超材料发生不同的弹性屈曲变形, 进而使导电聚合物网络的通断状态也相应改变. 软体机器人设计者还可以在机械超材料的体系结构内直接编程复杂的运动, 简化机器人的驱动和控制. 例如, Mark等人[78]使用Auxetic超材料设计了一种尺蠖型软体机器人, 只用一个软体波纹管驱动器就能使机器人轻松地在垂直管道中爬行. Lee等人[55]将由刚性压杆和软磁性肌腱构成的张拉整体结构作为基本结构单元来构建张拉整体超材料. 通过简单的磁驱动, 张拉整体超材料可以快速变形和恢复. 研究人员还开发了一种能够朝任何方向爬行的海星形软体机器人, 该机器人具有多条张拉整体超材料腿, 如图5(e)所示. 每条腿都可以通过由两个独立电机驱动的线缆进行压缩和弯曲, 从而使机器人爬行并实现定向转向.

2.2.3 形态物理智能

对于固定形态的机器人而言, 通过纯控制器优化的行为适应只能提供有限的适应性. 自适应形态提供了额外的自由度, 增加了机器人对环境和任务变化的适应性, 无需每次遇到新的环境或任务时都重新设计和制作. 最近的研究表明, 机器人的形态自适应可以作为经典的控制器自适应的有效替代方案, 甚至可以获得更好的结果[79]. 在某些情况下, 改变机器人的形态可能是诱导理想行为的唯一可行选择[80]. 可承受大变形的软体材料赋予了软体机器人自适应地改变形态的能力[81]. 通过主动改变自身形态, 软体机器人可以获得新的步态, 提高运动性能以及扩展新的功能[57].

自适应形态可以使软体机器人获得新的步态, 提高对环境的适应性. Lin等人[82]提出了一种受毛毛虫启发的软体滚动机器人GoQBot. 该机器人由形状记忆合金驱动, 既可以以蠕虫状形态爬行, 还可以将身体卷曲成轮形快速翻滚. Shah等人[83]仿真、设计和建造了一

个软体机器人，该机器人通过内部气囊充气/放气来改变形状以适应在不同环境中的运动，如图6(a)所示. 在平面上，机器人充气变为圆柱形并采用滚动步态运动; 在斜面上，机器人放气变成扁平片状并采用尺蠖步态运动. 仿真和实际实验表明, 变形机器人比同等但不变形的机器人更快地穿越这两种环境. Baines等人[84]展示了一种用于两栖腿式机器人运动的仿生变刚度变形肢体, 其结合了海龟游泳和乌龟行走的运动适应能力. 该肢体利用与气动驱动器系统耦合的可变刚度材料(热固性环氧树脂)，可以在海龟鳍状肢和乌龟腿部形状之间来回变形.

自适应形态可以改变水下软体机器人的水动力特性, 提高其运动性能. 为了适应水下不断变化的水流条件，Ishida等人[85]开发了一种具有可变形身体的水下软体四足机器人，如图6(b)所示. 该机器人可以通过改变形状来产生良好的水动力特性，帮助机器人在水流中保持静止或者行走. 当顺流行走时, 机器人可以增加水流对身体的阻力; 当在水中静止或者逆流行走时, 可以减小阻力. 为研究鱼中鳍的水动力性能, 文力教授课题组[86]设计和制造了一种具有变形中鳍的仿生机器鱼, 如图6(c)所示. 实验结果表明，竖立中鳍显著提高了线性加速度, 比折叠中鳍状态提高了32.5%.

自适应形态可以帮助软体机器人获得新的功能, 如避障和药物释放. Shah等人[87]将机器人皮肤包裹在可雕刻材料上，提出了一种可变形的滚动软体机器人. 机器人皮肤共有两层: 运动皮肤由气动驱动产生滚动运动, 变形皮肤由电缆驱动控制变形行为. 当机器人在运动过程中遇到障碍物时，机器人变成哑铃形状以翻过障碍物. Yim和Sitti[88]提出了一种用于半植入式药物输送的形状可编程磁驱动软体胶囊机器人. 吞食后, 初始形状为圆柱形的胶囊机器人进入胃部，在外部磁场的控制下变形为球形, 以便在胃内长时间停留. 机器人将携带的药物释放后，通过外部磁驱动恢复为圆柱形并自然排出. 史鹏教授与陈资教授合作团队[89]提出了一种光信号遥控的组织工程可变形机器人, 如图6(d)所示. 该软体机器人具有飞机形状的“机翼”, 附着在其上的心肌细胞的同步收缩为系统提供动力. 当“机翼”吸收近红外辐射时，“机翼”从展开形式转变为卷曲形式, 有效弯曲刚度急剧增加，从而最小化“机翼”的推进输出，使机器人直接停在目标位置上方并将抗癌药物释放到癌细胞上.

3 软体机器人物理智能的典型应用

3.1 高速抓取与栖息

由于软体材料的柔软性，软体抓手通常表现出较长的响应时间. 高速动态抓取任务对于软体抓手来说是一项具有挑战性的任务. 近年来, 利用双稳态结构的

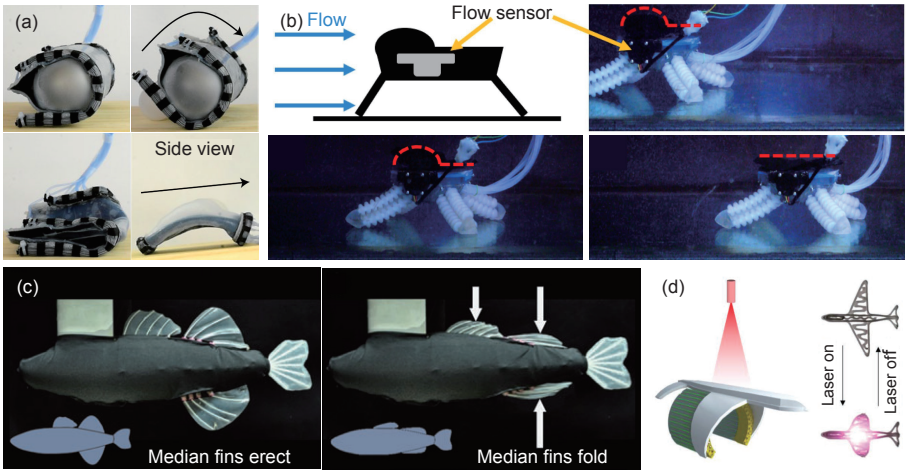

图 6 (网络版彩色)通过智能形态实现物理智能. (a) 软体机器人可通过变形实现滚动步态和爬行步态的切换[83]; (b) 软体水下行走机器人可以通过变形改变自己的水动力学特性[85]; (c) 具有可变形中鳍的机器鱼可通过竖起或折叠中鳍调节游动时的线性加速度[86]; (d) 具有光激活变形翼的组织工程机器人[89]

Figure 6 (Color online) Intelligent morphologies-based physical intelligence examples in soft robots. (a) Soft robot changing shape to switch between rolling gait and crawling gait[83]; (b) soft underwater walking robot that can change shape to influence its hydrodynamic characteristics[85]; (c) robotic fish with morphing median fins adjusting linear acceleration swimming performance through erecting/folding median fins[86]; (d) tissue engineered robot with light-activated morphing wings[89]

机械不稳定性，研究人员创造了包括形状记忆合金驱动[90]、光驱动[91]、气动[69]等在内的各种能够快速响应的软体抓手. 这些软体抓手的最快响应时间为50~330 ms, 与捕蝇草的响应时间相当(~100 ms). 然而, 实现高速动态抓取任务不仅需要快速驱动，而且需要快速感知. 利用环境的机械刺激实现被动响应是实现快速感知的一种有效方法. 当高速运动物体与软体抓手的双稳态触发机构产生机械接触时，软体抓手将快速闭合并抓住物体[40,92].

无人机由于电池容量有限，只能飞行较短的时间, 栖息在墙壁、树木等物体上能够延长其工作时间. 然而, 无人机在飞行状态下实现动态栖息具有挑战性. 将纯机械感知和驱动的双稳态抓手安装在无人机上可以很好地解决这一问题[93]. 利用抓手和栖息物体之间碰撞产生的冲击力，双稳态抓手可以被动地从打开状态切换到关闭状态, 从而降低对精确运动控制的要求.

3.2 极端环境探索

在深海、极地、火山、核反应堆、太空等极端环境中进行探索是机器人面临的重大挑战之一[94]. 极端的温度、压力和辐射条件容易使得传统的电子设备发生故障. 基于物理智能的机械设备可提供更好的保护, 使其免受对电子产品有害的环境的影响. 例如, 加州理工学院喷气推进实验室[95]提出了一款以机械计算机为设计灵感的用于极端环境探索的自动漫游车，目前已完成该概念的可行性分析和验证.

随着增材制造、材料科学和结构工程的进步，通过非线性力学机制和刺激响应型材料实现信息处理的机械计算技术正在兴起[96]，使得无电子化软体机器人的研究得到快速发展. 内存和逻辑元件是电子电路的核心元件，这些元件的机械化和软体化是实现软体机器人无电子化的关键. 基于微流体阀[97]、双稳态软体阀门[98]、体积折纸单元[99]、双稳态机械超材料[76]的非易失性机械存储器已被开发出来. 利用微流控技术[100]、双稳态软体阀门[70]、双稳态屈曲机构[101]、折纸结构[102]和刺激响应型材料[103]等也可以实现组合和时序数字逻辑门和电路, 用于物理计算. 上述技术的突破使得无电子化软体机器人的实现成为可能. Wehner等人[104]采用多材料嵌入式3D打印方法制造了第一个完全由软体材料组成的机器人——Octobot, 如图7(a)所示. 该机器人利用过氧化氢溶液催化分解产生的气体进行驱动，采用微流控逻辑作为软体控制器. 其中，止回阀、燃料箱、振荡器、反应室、驱动器和通风口分别作为二极管、电源电容器、电子振荡器、放大器、电容器和下拉电阻的机械替代物，以实现对机器人的流体控制. Drotman等人[105]将软体气动控制回路集成到软体机器人上，提出了一种能够与环境交互并做出决策的无电子气动软体腿式机器人，如图7(b)所示. 该机器人的控制系统包括3个部分: 由软体阀门组成的环形振荡器产生运动步态，气动记忆元件实现步态选择, 机载触觉传感器根据环境输入半自动切换步态. 随着相关技术的进一步发展，无电子化软体机器人在极端环境探索方面将具有广阔的应用前景.

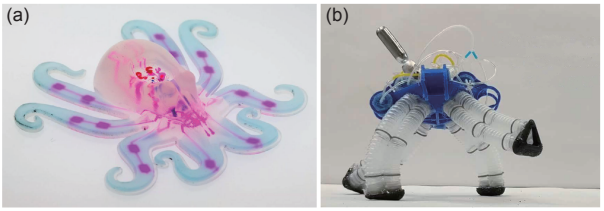

图 7 (网络版彩色)无电子化软体机器人. (a) 全软体机器人Octobot[104]; (b) 无电子气动软体腿式机器人[105]

Figure 7 (Color online) Electronics-free soft robots. (a) Entirely soft robot—The octobot[104]; (b) electronics-free pneumatic soft-legged robot[105]

3.3 微型软体机器人

宏观尺度机器人通常由独立的传感器、驱动器和控制器组成，将这些组件在微尺度下实现和集成具有挑战性. 开发微型机器人的有效策略是用物理智能部分甚至完全替代计算智能. 例如, 使用智能的刺激响应型软体材料实现驱动、传感和控制的一体化，使微型机器人能够感知环境并对外界刺激做出响应[106].

目前，微型软体机器人主要用于靶向药物输送等体内医疗应用. 水凝胶材料由于具有较好的生物相容性和生物降解性而被广泛使用. 机器人在磁场驱动下携带药物到达特定位置，利用外界刺激(如温度[47]、pH[107]、酶浓度[108]、离子浓度[109]等)使水凝胶产生溶胀或形变, 从而根据需要触发释放药物.

由于人体内组织、生物流体和流体-空气界面的多样性、动态性和复杂性，微型软体机器人在体内的运动和导航具有挑战性. 通过磁场调控, 微型软体机器人能够连续改变形状，实现包括滚动、爬行、游动等多模态运动, 大幅提高机动性[59]. 此外, 微型软体机器人可以自发调节其形态以响应周围流体黏度的变化，通过狭窄的管道[49]. 利用弹性流体力学耦合实现形状和

步态的自适应，为微型软体机器人在非结构化的流体环境中导航提供了新的思路和方向.

4 未来展望

4.1 仿生物理智能原理

仿生设计是开发软体机器人物理智能的关键设计方法. 生物通过漫长的进化形成了高级的物理智能, 研究人员可以从生物的物理智能中得到启发，设计和制造具有高级物理智能的软体机器人. 生物具有高度的复杂性，研究人员需充分探索并凝练生物物理智能的基本原理，然后利用该原理来指导软体机器人物理智能的开发. 因此，跨学科的交流和合作将具有重要意义. 随着对生物物理智能原理的理解不断深入, 我们相信软体机器人仿生物理智能将迅速发展.

4.2 材料物理智能

具有嵌入式传感和驱动的刺激响应型材料促进了物理智能的发展[110]，但智能材料需要进一步实现传感、驱动、记忆、计算、通信等功能的完全集成[4,5]. 从单一材料中实现这一目标无疑是非常困难的，经过数十年的研究，许多不同类型的刺激响应型材料已经被研制开发出来，这些材料各自可以实现一种或多种的智能功能. 一个更可行的方法是将各种刺激响应型材料作为基本的构建块，通过材料的组合将不同类型的功能集成到一种更为复杂的复合材料中[111]. 多材料3D/4D打印技术为这种材料的制造奠定了基础[112]. 尽管存在若干技术挑战(如材料兼容性问题), 但构建具备物理智能的智能材料的未来前景光明.

4.3 结构物理智能

机械超材料通过各种巧妙的微观结构设计获得了不同寻常的物理和机械性能，在剪纸结构、折纸结构、张拉整体结构和多稳态结构等智能结构中脱颖而出, 已成为智能结构领域的一个研究热点. 然而, 机械超材料中微观结构的复杂性和多样性导致了设计局部几何结构的困难，特别是为了实现某些特定的机械性能时. 人工智能技术是解决机械超材料设计和优化挑战的有效方法[113]. 采用人工智能技术进行数据挖掘、处理和分析，可以大大提高超材料结构设计的准确性和效率. 此外，3D打印技术的不断进步促进了功能性机械超材料的制造, 使其具有前所未有的复杂性. 在人工智能技术和3D打印技术的助力下，机械超材料将很快为软体机器人提供目前尚无法预见的强大功能.

4.4 形态物理智能

目前的自适应形态机器人大多数只能实现有限的形态变化. 增加自由度通常可以提高机器人的变形能力, 但相应地也会增加系统的复杂性. 有望从根本上解决这一问题的方法是赋予软体机器人以生长的能力[114]. 此外，自适应形态机器人在变形过程中经常需要人参与决策, 何时变形以及变形到何种程度最佳, 尚无法自主决策. 虽然在软体机器人形状自感知[115]和环境感知[116]方面已经取得了一些进展，其根据环境的动态变化自主地改变相匹配的形态仍然是一个重要的挑战. 最后, 形态和控制是相互高度依赖的, 它们对行为和性能的影响非常复杂——考虑到机器人的操作环境时更是如此. 因此, 单独优化形态或控制都无法实现最佳性能. 形态与控制的联合优化[117]将充分发挥自适应形态的潜力.

4.5 物理智能系统集成

目前，越来越多的研究将智能材料与智能结构结合在一起, 融合力学和材料科学的前沿, 以实现更集成与一体化的物理智能, 例如, 将形状记忆聚合物与折纸结构相结合[64]，液晶聚合物网络与剪纸结构相结合[66]，形状记忆聚合物与双稳态结构相结合[118]，形状记忆聚合物[72]、低熔点合金[73]、液晶弹性体-碳纳米管复合材料[74]与张拉整体结构相结合，软磁复合材料与超材料相结合[55]等. 将智能材料、智能结构和智能形态三者有机融合在软体机器人系统中无疑会大幅提升其物理智能的水平，这将成为日后软体机器人仿生物理智能的一个重要研究方向. 需要指出的是, 智能材料、智能结构和智能形态在整体和局部上所处的研究阶段并不太相同. 从整体来看, 目前关于智能材料和智能结构的研究相对深入, 而智能形态的研究相对不足. 从局部来看, 例如从驱动的角度, 电驱动的物理智能系统更多地聚焦于智能材料的性能研究(如材料的非线性问题[119]), 对于智能形态方面的研究较少涉及; 而气动的物理智能系统由于较少应用智能材料，在智能形态方面已有较深研究(如形态控制[120]). 此外, 除了在极端环境探索和微型机器人等部分应用中希望用物理智能完全取代计算智能外，大部分应用都需要物理智能与计算智能相互协调和补充. 二者如何实现1+1>2的效果是

一个有待解决的科学问题. 需要进一步推动软体仿真工具、设计优化算法、柔性电子技术、形态与控制协同进化算法等多方面的进步来解决这一问题.

5 结论

通过将生物复杂的身体分解为材料、结构和形态三大要素, 将有助于加深对生物物理智能机制的理解. 仿生物理智能可以降低软体机器人的控制成本, 提高系统响应速度和极端环境下的鲁棒性, 以及使微型机器人智能化. 通过仿生设计的方法, 可以将智能材料、智能结构和智能形态融入机器人的身体中, 进而将生物中的物理智能引入软体机器人中. 软体机器人物理智能将在高速动态作业、极端环境探索和微型机器人智能化等方面发挥独特的优势. 尽管目前软体机器人物理智能的研究在各方面都取得了一定进展, 但仍处于初级阶段, 尚有一系列的问题和挑战需要解决, 包括仿生设计、智能材料、智能结构、智能形态、系统集成等. 仿生物理智能研究更进一步的发展需要生物学家、机器人学家、材料学家、化学家和计算机学家之间的充分交流与合作.

参考文献

1 Pfeifer R, Bongard J. How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence. Cambridge: MIT Press, 2006
2 Sitti M. Physical intelligence as a new paradigm. Extreme Mech Lett, 2021, 46: 101340
3 Shen Z, Chen F, Zhu X, et al. Stimuli-responsive functional materials for soft robotics. J Mater Chem B, 2020, 8: 8972–8991
4 McEvoy M A, Correll N. Materials that couple sensing, actuation, computation, and communication. Science, 2015, 347: 1261689
5 Kaspar C, Ravoo B J, van der Wiel W G, et al. The rise of intelligent matter. Nature, 2021, 594: 345–355
6 Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots. Nature, 2015, 521: 467–475
7 Wang T M, Hao Y F, Yang X B, et al. Soft robotics: Structure, actuation, sensing and control (in Chinese). J Mech Eng, 2017, 53: 1–13 [王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构, 驱动, 传感与控制. 机械工程学报, 2017, 53: 1–13]
8 Gu G Y, Zhu J, Zhu L M, et al. A survey on dielectric elastomer actuators for soft robots. Bioinspir Biomim, 2017, 12: 011003
9 Pfeifer R, Lungarella M, Iida F. Self-organization, embodiment, and biologically inspired robotics. Science, 2007, 318: 1088–1093
10 Ha J, Choi S M, Shin B, et al. Hygroresponsive coiling of seed awns and soft actuators. Extreme Mech Lett, 2020, 38: 100746
11 Elbaum R, Zaltzman L, Burgert I, et al. The role of wheat awns in the seed dispersal unit. Science, 2007, 316: 884–886
12 Harrington M J, Razghandi K, Ditsch F, et al. Origami-like unfolding of hydro-actuated ice plant seed capsules. Nat Commun, 2011, 2: 337
13 Miller M J, Rutgers R, Haythorne B, et al. Observations of large muraenid leptocephali in coastal Indonesia: Locations of sightings and behaviour of the larvae. Mar Biodivers Rec, 2013, 6: e82
14 Capadona J R, Shanmuganathan K, Tyler D J, et al. Stimuli-responsive polymer nanocomposites inspired by the sea cucumber dermis. Science, 2008, 319: 1370–1374
15 Hager M D, Greil P, Leyens C, et al. Self-healing materials. Adv Mater, 2010, 22: 5424–5430
16 Vincent J F V. Deployable structures in biology. In: Hara F, Pfeifer R, eds. Morpho-functional Machines: The New Species. Tokyo: Springer, 2003, 23–40
17 Forterre Y, Skotheim J M, Dumais J, et al. How the Venus flytrap snaps. Nature, 2005, 433: 421–425
18 Kobayashi H, Kresling B, Vincent J F V. The geometry of unfolding tree leaves. Proc R Soc Lond B, 1998, 265: 147–154
19 Faber J A, Arrieta A F, Studart A R. Bioinspired spring origami. Science, 2018, 359: 1386–1391
20 Wang N, Butler J P, Ingber D E. Mechanotransduction across the cell surface and through the cytoskeleton. Science, 1993, 260: 1124–1127
21 Levin S M. The tensegrity-truss as a model for spine mechanics: Biotensegrity. J Mech Med Biol, 2002, 02: 375–388
22 Armour R H, Vincent J F V. Rolling in nature and robotics: A review. J Bionic Eng, 2006, 3: 195–208
23 Lentink D, Dickson W B, van Leeuwen J L, et al. Leading-edge vortices elevate lift of autorotating plant seeds. Science, 2009, 324: 1438–1440
24 Beal D N, Hover F S, Triantafyllou M S, et al. Passive propulsion in vortex wakes. J Fluid Mech, 2006, 549: 385–402
25 Liao J C. A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. Phil Trans R Soc B, 2007, 362: 1973–1993
26 Lentink D, Müller U K, Stamhuis E J, et al. How swifts control their glide performance with morphing wings. Nature, 2007, 446: 1082–1085
27 Williams C D, Biewener A A. Pigeons trade efficiency for stability in response to level of challenge during confined flight. Proc Natl Acad Sci USA, 2015, 112: 3392–3396
28 Garcia-Paris M, Deban S M. A novel antipredator mechanism in salamanders: rolling escape in hydromantes platycephalus. J Herpetol, 1995, 29: 149–151
29 Henschel J R. Spiders wheel to escape. S Afr J Sci, 1990, 86: 151–152

30 Brown E, Rodenberg N, Amend J, et al. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, 107: 18809–18814
31 Sadeghi A, Del Dottore E, Mondini A, et al. Passive morphological adaptation for obstacle avoidance in a self-growing robot produced by additive manufacturing. Soft Robot, 2019, 7: 85–94
32 Rummel J, Blum Y, Maus H M, et al. Stable and robust walking with compliant legs. In: 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Anchorage: IEEE, 2010. 5250–5255
33 Liu Z, Lu Z, Karydis K. SoRX: A soft pneumatic hexapedal robot to traverse rough, steep, and unstable terrain. In: 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Paris: IEEE, 2020. 420–426
34 Full R J, Koditschek D E. Templates and anchors: Neuromechanical hypotheses of legged locomotion on land. J Exp Biol, 1999, 202: 3325–3332
35 Kosinski R J. A Literature Review on Reaction Time. Technical Report, Psychology, Clemson University. 2008
36 Proctor J, Holmes P. Reflexes and preflexes: On the role of sensory feedback on rhythmic patterns in insect locomotion. Biol Cybern, 2010, 102: 513–531
37 Laschi C, Mazzolai B. Lessons from animals and plants: The symbiosis of morphological computation and soft robotics. IEEE Robot Automat Mag, 2016, 23: 107–114
38 Stadlbauer J M, Haderer W, Graz I, et al. Body temperature-triggered mechanical instabilities for high-speed soft robots. Soft Robot, 2022, 9: 128–134
39 Tang Y, Chi Y, Sun J, et al. Leveraging elastic instabilities for amplified performance: Spine-inspired high-speed and high-force soft robots. Sci Adv, 2020, 6: eaaz6912
40 Lin Y, Zhang C, Tang W, et al. A bioinspired stress-response strategy for high-speed soft grippers. Adv Sci, 2021, 8: 2102539
41 Seok S, Onal C D, Cho K J, et al. Meshworm: A peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators. IEEE ASME Trans Mechatron, 2013, 18: 1485–1497
42 Tolley M T, Shepherd R F, Mosadegh B, et al. A resilient, untethered soft robot. Soft Robot, 2014, 1: 213–223
43 Li G, Chen X, Zhou F, et al. Self-powered soft robot in the Mariana Trench. Nature, 2021, 591: 66–71
44 Jing L, Hsiao L Y, Li S, et al. 2D-Material-integrated hydrogels as multifunctional protective skins for soft robots. Mater Horiz, 2021, 8: 2065–2078
45 Bilodeau R A, Kramer R K. Self-healing and damage resilience for soft robotics: A review. Front Robot AI, 2017, 4: 48
46 Dolev A, Kaynak M, Sakar M S. On-board mechanical control systems for untethered microrobots. Adv Intell Syst, 2021, 3: 2000233
47 Kobayashi K, Yoon C K, Oh S H, et al. Biodegradable thermomagnetically responsive soft untethered grippers. ACS Appl Mater Interfaces, 2019, 11: 151–159
48 Lu H, Zhang M, Yang Y, et al. A bioinspired multilegged soft millirobot that functions in both dry and wet conditions. Nat Commun, 2018, 9: 3944
49 Huang H W, Uslu F E, Katsamba P, et al. Adaptive locomotion of artificial microswimmers. Sci Adv, 2019, 5: eaau1532
50 Li S, Bai H, Liu Z, et al. Digital light processing of liquid crystal elastomers for self-sensing artificial muscles. Sci Adv, 2021, 7: eabg3677
51 Davidson Z S, Shahsavan H, Aghakhani A, et al. Monolithic shape-programmable dielectric liquid crystal elastomer actuators. Sci Adv, 2019, 5: eaay0855
52 Sellitto A, Riccio A. Overview and future advanced engineering applications for morphing surfaces by shape memory alloy materials. Materials, 2019, 12: 708
53 Lee Y, Song W J, Sun J Y. Hydrogel soft robotics. Mater Today Phys, 2020, 15: 100258
54 Rafsanjani A, Bertoldi K, Studart A R. Programming soft robots with flexible mechanical metamaterials. Sci Robot, 2019, 4: eaav7874
55 Lee H, Jang Y, Choe J K, et al. 3D-printed programmable tensegrity for soft robotics. Sci Robot, 2020, 5: eaay9024
56 Xie Z, Domel A G, An N, et al. Octopus arm-inspired tapered soft actuators with suckers for improved grasping. Soft Robot, 2020, 7: 639–648
57 Shah D, Yang B, Kriegman S, et al. Shape changing robots: Bioinspiration, simulation, and physical realization. Adv Mater, 2021, 33: 2002882
58 McCracken J M, Donovan B R, White T J. Materials as machines. Adv Mater, 2020, 32: 1906564
59 Ren Z, Zhang R, Soon R H, et al. Soft-bodied adaptive multimodal locomotion strategies in fluid-filled confined spaces. Sci Adv, 2021, 7: eabh2022
60 Zhuo S, Zhao Z, Xie Z, et al. Complex multiphase organohydrogels with programmable mechanics toward adaptive soft-matter machines. Sci Adv, 2020, 6: eaax1464
61 Terryn S, Brancart J, Lefeber D, et al. Self-healing soft pneumatic robots. Sci Robot, 2017, 2: eaan4268
62 Mishra A K, Wallin T J, Pan W, et al. Autonomic perspiration in 3D-printed hydrogel actuators. Sci Robot, 2020, 5: eaaz3918
63 Zhang Z, Tian Z, Mei Y, et al. Shaping and structuring 2D materials via kirigami and origami. Mater Sci Eng-R-Rep, 2021, 145: 100621
64 Felton S, Tolley M, Demaine E, et al. A method for building self-folding machines. Science, 2014, 345: 644–646

65 Lee D Y, Kim S R, Kim J S, et al. Origami wheel transformer: A variable-diameter wheel drive robot using an origami structure. Soft Robot, 2017, 4: 163–180
66 Cheng Y C, Lu H C, Lee X, et al. Kirigami-based light-induced shape-morphing and locomotion. Adv Mater, 2019, 32: 1906233
67 Yang Y, Vella K, Holmes D P. Grasping with kirigami shells. Sci Robot, 2021, 6: eabd6426
68 Rafsanjani A, Zhang Y, Liu B, et al. Kirigami skins make a simple soft actuator crawl. Sci Robot, 2018, 3: eaar7555
69 Pal A, Goswami D, Martinez R V. Elastic energy storage enables rapid and programmable actuation in soft machines. Adv Funct Mater, 2020, 30: 1906603
70 Preston D J, Rothemund P, Jiang H J, et al. Digital logic for soft devices. Proc Natl Acad Sci USA, 2019, 116: 7750–7759
71 Motro M. Tensegrity: Structural Systems for the Future. London: Kogan Page Science, 2003
72 Liu K, Wu J, Paulino G H, et al. Programmable deployment of tensegrity structures by stimulus-responsive polymers. Sci Rep, 2017, 7: 3511
73 Zappetti D, Jeong S H, Shintake J, et al. Phase changing materials-based variable-stiffness tensegrity structures. Soft Robot, 2020, 7: 362–369
74 Wang Z, Li K, He Q, et al. A light-powered ultralight tensegrity robot with high deformability and load capacity. Adv Mater, 2019, 31: 1806849
75 Kshetrimayum R S. A brief intro to metamaterials. IEEE Potentials, 2005, 23: 44–46
76 Chen T, Pauly M, Reis P M. A reprogrammable mechanical metamaterial with stable memory. Nature, 2021, 589: 386–390
77 El Helou C, Buskohl P R, Tabor C E, et al. Digital logic gates in soft, conductive mechanical metamaterials. Nat Commun, 2021, 12: 1633
78 Mark A G, Palagi S, Qiu T, et al. Auxetic metamaterial simplifies soft robot design. In: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm: IEEE, 2016. 4951–4956
79 Kriegman S, Walker S, Shah D, et al. Automated shapeshifting for function recovery in damaged robots. In: 2019 15th Conference on Robotics-Science and Systems. Freiburg im Breisgau: IEEE, 2019
80 Picardi G, Hauser H, Laschi C, et al. Morphologically induced stability on an underwater legged robot with a deformable body. Int J Robot Res, 2021, 40: 435–448
81 Mintchev S, Floreano D. Adaptive morphology: A design principle for multimodal and multifunctional robots. IEEE Robot Automat Mag, 2016, 23: 42–54
82 Lin H T, Leisk G G, Trimmer B. GoQBot: A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot. Bioinspir Biomim, 2011, 6: 026007
83 Shah D S, Powers J P, Tilton L G, et al. A soft robot that adapts to environments through shape change. Nat Mach Intell, 2021, 3: 51–59
84 Baines R, Freeman S, Fish F, et al. Variable stiffness morphing limb for amphibious legged robots inspired by chelonian environmental adaptations. Bioinspir Biomim, 2020, 15: 025002
85 Ishida M, Drotman D, Shih B, et al. Morphing structure for changing hydrodynamic characteristics of a soft underwater walking robot. IEEE Robot Autom Lett, 2019, 4: 4163–4169
86 Wen L, Ren Z, Di Santo V, et al. Understanding fish linear acceleration using an undulatory biorobotic model with soft fluidic elastomer actuated morphing median fins. Soft Robot, 2018, 5: 375–388
87 Shah D S, Yuen M C, Tilton L G, et al. Morphing robots using robotic skins that sculpt clay. IEEE Robot Autom Lett, 2019, 4: 2204–2211
88 Yim S, Sitti M. Shape-programmable soft capsule robots for semi-implantable drug delivery. IEEE Trans Robot, 2012, 28: 1198–1202
89 Xu B, Han X, Hu Y, et al. A remotely controlled transformable soft robot based on engineered cardiac tissue construct. Small, 2019, 15: 1900006
90 Kim S W, Koh J S, Lee J G, et al. Flytrap-inspired robot using structurally integrated actuation based on bistability and a developable surface. Bioinspir Biomim, 2014, 9: 036004
91 Wani O M, Zeng H, Priimagi A. A light-driven artificial flytrap. Nat Commun, 2017, 8: 15546
92 Thuruthel T G, Abidi S H, Cianchetti M, et al. A bistable soft gripper with mechanically embedded sensing and actuation for fast closed-loop grasping. In: 2020 29th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN). Naples: IEEE, 2020. 1049–1054
93 Zhang H, Lerner E, Cheng B, et al. Compliant bistable grippers enable passive perching for micro aerial vehicles. IEEE ASME Trans Mechatron, 2021, 26: 2316–2326
94 Yang G Z, Bellingham J, Dupont P E, et al. The grand challenges of Science Robotics. Sci Robot, 2018, 3: eaar7650
95 Sauder J, Hilgemann E, Johnson M, et al. Automation Rover for Extreme Environments. Technical Report, Mechanical Engineering, California Institute of Technology. 2017
96 Yasuda H, Buskohl P R, Gillman A, et al. Mechanical computing. Nature, 2021, 598: 39–48
97 Hoang S, Karydis K, Brisk P, et al. A pneumatic random-access memory for controlling soft robots. PLoS One, 2021, 16: e0254524
98 Nemitz M P, Abrahamsson C K, Wille L, et al. Soft non-volatile memory for non-electronic information storage in soft robots. In: 2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). New Haven: IEEE, 2020. 7–12
99 Yasuda H, Tachi T, Lee M, et al. Origami-based tunable truss structures for non-volatile mechanical memory operation. Nat Commun, 2017, 8: 962

100 Rhee M, Burns M A. Microfluidic pneumatic logic circuits and digital pneumatic microprocessors for integrated microfluidic systems. Lab Chip, 2009, 9: 3131–3143

101 Song Y, Panas R M, Chizari S, et al. Additively manufacturable micro-mechanical logic gates. Nat Commun, 2019, 10: 882

102 Treml B, Gillman A, Buskohl P, et al. Origami mechanologic. Proc Natl Acad Sci USA, 2018, 115: 6916–6921

103 Zhang X, Soh S. Performing logical operations with stimuli-responsive building blocks. Adv Mater, 2017, 29: 1606483

104 Wehner M, Truby R L, Fitzgerald D J, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots. Nature, 2016, 536: 451–455

105 Drotman D, Jadhav S, Sharp D, et al. Electronics-free pneumatic circuits for controlling soft-legged robots. Sci Robot, 2021, 6: eaay2627

106 Palagi S, Fischer P. Bioinspired microrobots. Nat Rev Mater, 2018, 3: 113–124

107 Li H, Go G, Ko S Y, et al. Magnetic actuated pH-responsive hydrogel-based soft micro-robot for targeted drug delivery. Smart Mater Struct, 2016, 25: 027001

108 Ceylan H, Yasa I C, Yasa O, et al. 3D-printed biodegradable microswimmer for theranostic cargo delivery and release. ACS Nano, 2019, 13: 3353–3362

109 Zheng Z, Wang H, Dong L, et al. Ionic shape-morphing microrobotic end-effectors for environmentally adaptive targeting, releasing, and sampling. Nat Commun, 2021, 12: 411

110 Ford M J, Ohm Y, Chin K, et al. Composites of functional polymers: Toward physical intelligence using flexible and soft materials. J Mater Res, 2022, 37: 2–24

111 Zhang X, Chen L, Lim K H, et al. The pathway to intelligence: Using stimuli-responsive materials as building blocks for constructing smart and functional systems. Adv Mater, 2019, 31: 1804540

112 Truby R L, Lewis J A. Printing soft matter in three dimensions. Nature, 2016, 540: 371–378

113 Jiao P, Alavi A H. Artificial intelligence-enabled smart mechanical metamaterials: Advent and future trends. Int Mater Rev, 2021, 66: 365–393

114 Hawkes E W, Blumenschein L H, Greer J D, et al. A soft robot that navigates its environment through growth. Sci Robot, 2017, 2: eaan3028

115 Soter G, Conn A, Hauser H, et al. Bodily aware soft robots: Integration of proprioceptive and exteroceptive sensors. In: 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Brisbane: IEEE, 2018. 2448–2453

116 Umedachi T, Kano T, Ishiguro A, et al. Gait control in a soft robot by sensing interactions with the environment using self-deformation. R Soc Open Sci, 2016, 3: 160766

117 Nygaard T F, Martin C P, Howard D, et al. Environmental adaptation of robot morphology and control through real-world evolution. Evol Comput, 2021, 29: 441–461

118 Chen T, Bilal O R, Shea K, et al. Harnessing bistability for directional propulsion of soft, untethered robots. Proc Natl Acad Sci USA, 2018, 115: 5698–5702

119 Gu G Y, Gupta U, Zhu J, et al. Modeling of viscoelastic electromechanical behavior in a soft dielectric elastomer actuator. IEEE Trans Robot, 2017, 33: 1263–1271

120 Huang X, Zou J, Gu G. Kinematic modeling and control of variable curvature soft continuum robots. IEEE ASME Trans Mechatron, 2021, 26: 3175–3185

Summary for “软体机器人的仿生物理智能”

Bio-inspired physical intelligence for soft robotics

Shiqiang Wang[1], Zhexin Xie[1,2], Feiyang Yuan[1], Lei Li[1], Yuchen Liu[1], Tianmiao Wang[1] & Li Wen[1*]

[1] *School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;*
[2] *Shenyuan Honors College, Beihang University, Beijing 100191, China*
* Corresponding author, E-mail: liwen@buaa.edu.cn

Biological organisms can efficiently move, prey, mate, and grow in complex, unstructured natural environments. These remarkable behaviors are endowed not only by the computational intelligence in the biological brains but also by the physical intelligence encoded in their bodies. Physical intelligence can be defined as encoding sensing, actuation, control, memory, logic, computation, adaptative material and structure, self-learning, self-healing, and self-decision-making into physical bodies of the biological or robotic agents. Physical intelligence can also be generated during the interaction between the agent’s body and the environment over time. The previous focus of intelligent robots is primarily focused on the computational intelligence. As a new paradigm, physical intelligence is expected to boost intelligent robots in real-world applications.

Soft robots commonly use soft stimuli-responsive materials and intelligent structures and maintain high stretchability and considerable deformation, therefore, have intrinsic environmental conformable physical property. Thus, soft robots are essential platforms for testing hypothesis of physical intelligence in nature. This review mainly focused on three key physical intelligence elements encoded in the natural organisms’ bodies: Material, structure, and morphology. Through bio-inspired design, smart soft materials, smart soft structures, and adaptable morphologies can be integrated into the robot’s body, thus introducing bio-inspired physical intelligence into the robots. By integrating bio-inspired physical intelligence, soft robots could reduce the cost of control, improve the response speed of the systems, enhance the robustness of robots in extreme environments, and embed intelligence into the micro- and small-scale robots. The research on bio-inspired physical intelligence may also promote the multi-disciplinary collaboration of biology, robotics, materials science, chemistry, computer science, etc.

In this review, we first describe the characteristics and principles of physical intelligence in natural organisms’ material, structure, and morphology. Then we introduce the purposes and related key technologies and methods of realizing bio-inspired physical intelligence of soft robots. Furthermore, we enumerate the typical applications of bio-inspired physical intelligence of soft robots. Finally, we highlight the trends and challenges of bio-inspired physical intelligence of soft robots in the future.

The research on bio-inspired physical intelligence for soft robots is still in the primary stage. There are several critical questions and challenges to be addressed. First, researchers should investigate the basic principles of physical intelligence in biomechanics and then apply the basic principles to guide the development of soft robots. Second, intelligent materials need to meet the challenges of fully integrating sensing, actuation, memory, computation, and communication in soft robots. To this end, an interesting approach is to use stimulus-responsive materials as the basic building blocks to rationally design and integrate different functions into a single composite material. Third, smart structures, like mechanical metamaterials can be a promising research direction in the field of intelligent structures for soft robots. Aided by artificial intelligence and 3D printing, mechanical metamaterials will boost the performance of soft robots in the foreseeable future. Fourth, the potential of adaptive morphology can be realized by endowing soft robots with the ability to self-optimize their morphologies in the environments. Finally, the integration of intelligent materials, structures, and morphologies in the soft robot system will significantly improve physical intelligence. We believe that bio-inspired physical intelligence for soft robotics will be an important research direction in the future.

soft robotics, biomimetic, physical intelligence, material, structure, morphology

doi: 10.1360/TB-2021-1217