

# 软体机器人本体材料研究综述

张园园<sup>1</sup>, 王利强<sup>1,2</sup>, 温永兴<sup>1</sup>

<sup>1</sup>天津职业技术师范大学电子工程学院, 天津

<sup>2</sup>天津市现场总线控制技术工程中心, 天津

收稿日期: 2024年9月30日; 录用日期: 2024年11月7日; 发布日期: 2024年11月20日

## 摘要

软体机器人采用柔性材料制造, 具有高度的柔性、可塑性和适应性, 因此在未来的工业制造、医疗、教育和探测任务中具有广泛的应用前景。随着科学技术的迅速发展, 软体机器人在本体制作材料方面的研究发生了巨大变化。现有很多研究人员对软体机器人本体制作材料类型进行了深入研究, 但是目前对其进行系统性总结的文章还比较缺乏。本文对近年来软体机器人领域的研究成果进行了综述, 对不同本体制作材料类型进行了对比总结, 并讨论了其应用领域。最后, 提出了目前软体机器人的研究还存在的一些问题, 指出了软体机器人的发展前景。

## 关键词

软体机器人, 材料类型, 驱动方式, 柔性

# A Review of Soft Robot Body Materials Research

Yuanyuan Zhang<sup>1</sup>, Liqiang Wang<sup>1,2</sup>, Yongxing Wen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin

<sup>2</sup>Tianjin Field Bus Control Technology Engineering Center, Tianjin

Received: Sep. 30<sup>th</sup>, 2024; accepted: Nov. 7<sup>th</sup>, 2024; published: Nov. 20<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Soft robots are made of flexible materials and are highly flexible, malleable and adaptable, and thus have a wide range of applications in future industrial manufacturing, medical, educational and exploration tasks. With the rapid development of science and technology, the research of soft robots in terms of body fabrication materials has changed dramatically. Many researchers have conducted in-depth studies on the types of materials used in the production of soft robots, but there is a lack

of articles that systematically summarize them. This paper gives an overview of the research results in the field of soft robotics in recent years, summarizes the comparison of different ontology fabrication material types, and discusses their application areas. Finally, it puts forward some problems that still exist in the current research of soft body robots and points out the development prospect of soft body robots.

## Keywords

Soft Robot, Material Type, Drive Mode, Flexibility

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着科研人员对材料的研究更加深入，特殊材料驱动更加广泛化，比如介电弹性体(Dielectric elastomer actuator, DEA)驱动[1]-[5]，DEA 是美国斯坦福研究院 1991 年最早提出的，Pelrine 等人[6]提出的驱动器所产生的应变达到 100%以上，而在此之前，能实现的应变平均只有 30%左右，在此之后，介电高弹聚合物广泛应用于软体机器人，例如麻省理工学院的研究团队报道 DEA 致动器[7]、2023 年 SUHANKIM 等人[8]制造的电致发光 DEA 致动器等。除此之外，磁驱动的软体机器人发展也非常迅速，基于磁驱动的软体机器人一般都是微型机器人，这对医疗领域的发展起到了至关重要的作用，它可以担任靶向药物输送[9]、体内病变检查等重要角色，如中国科学院与哈佛医学院的科研人员开发的全球首个用于内窥镜检查 and 球囊扩张的软体机器人[10]和 2022 年北京理工大学刘丹等人[11]提出的一种基于磁场驱动的具有转向和运动能力的微尺度软连续体微型机器人以及天津大学为首的团队提出的用于活检的胶囊机器人[12]等。

自 20 世纪 60 年代以来，随着新的柔性材料的出现，使得完全灵活的软体机器人的发展成为可能[13]。柔性致动器的首次出现，使得柔性机器人领域开始发展，尤其过去十年中，软体机器人取得了重大发展，软体机器人已经完成了从软驱动的刚体机器人到完全软系统的转变[14]。软体机器人的柔性主要取决于自身的材料，2015 年，麻省理工学院的 Rus 等[15]对制作机器人的材料进行了系统分类，结果如图 1 所示，结果将材料按照弹性模量划分为软材料和硬材料两部分，软材料是指弹性模量在  $10^4 \sim 10^9$  的材料，是软体机器人的主要制作材料。

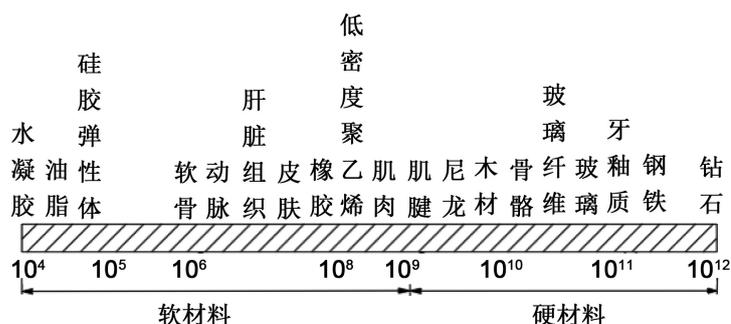


Figure 1. Material classification [15]

图 1. 材料分类[15]

在上述的材料分类中,水凝胶材料由于它本身的特性,使其在软体机器人领域中的应用变得有意义。水凝胶在特定情况下具有较好的生物相容性[16]。在软体机器人领域,水凝胶还可用作电极,因此它功能众多,所以水凝胶近年来作为一种在软体机器人中有前途的材料出现在研究者视野中。2015年, Li 等人[17]研发出一款水凝胶制动器,该制动器可以在粗糙基底上方做一维的单向运动,然而并不能够适应复杂地形,实现在二维或三维空间中自由移动,这一缺陷很大程度上限制了软体机器人的应用领域,因此,2022年,中科院提出一款水凝胶制成的软体机器人[18]。它可以在爬行过程中不断调整自身体积来适应地形变化,并能成功穿越像隘口、山谷以及山脊等一系列复杂地形。这一水凝胶机器人的研发,完美的解决了软体机器人单一运动的问题[19]。

随着材料学科的不断突破,越来越多的新型材料为软体机器人的研究提供了基础[20],例如弹性体材料、智能材料、生物材料等,下面对这三种新型材料进行阐述。

## 2. 弹性体材料

弹性体是软体机器人常用的材料之一,比如硅橡胶、氟橡胶、聚氨酯等都是弹性体材料[21]。这些材料具有优异的弹性和可塑性[22],可以在不同的形状和环境自由变形,同时也能够快速恢复形状。硅橡胶用于软体机器人的本体制作是软体机器人领域中的一种典型类型[23],具有高度的柔韧性和变形能力,能够实现类似于真实生物体的各种动作,因此受到了广泛的研究关注。

燕山大学姚建涛等人受蠕虫运动和结构特征启发,设计了一种轮式步行仿生软机器人,如图2所示。该机器人采用双腔结构,由高弹性硅橡胶制成,具有多个气囊结构,当向气囊注入空气时,它们可以相互膨胀和挤压,从而使机器人机身弯曲,且通过向两个腔室注入不同压力的空气,可以实现大角度转弯。该软机器人类似于尺蠖的蠕动运动是通过周期性充气 and 释放空气实现的,蠕动运动被转换为轮子的旋转运动,以加快机器人的移动速度[24]。

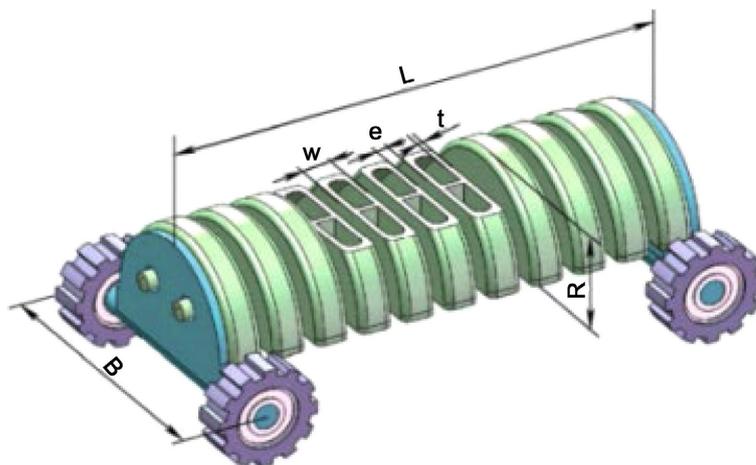


Figure 2. Structural diagram of a roto-footed robot [24]

图2. 轮足式机器人结构图[24]

除了上述由高弹性制成的气囊结构式的机器人,近年来,也出现了各种各样软体抓手,其中更多的是被动适应环境中的不确定性的机器人手[25],柔性手指使得机器人能够抓取不同的形状、大小、和姿态的物体而不需要了解其属性[26]-[29]。

来自哈佛大学微型机器人实验室 RJ Wood 教授团队的研究者们研发了一款硅橡胶制成的四指软体抓手[30],这款手指是有针对性的设计,它可以通过简单的控制实现对目标物体的动作,比如拧开瓶盖、定

向用于包装的食品、在抓取期间的重力补偿等，软体抓手能够很好地适应不同的物体和未知的环境，抓取形状和大小各异的物体。如图 3 所示为软体抓手的一个手指的结构图。软体手指主要的思想就是实现对目标物体抓取的同时不会损坏目标物体，但是真正意义上实现精确控制抓手难度非常大，正如哈佛大学的“面条”气动抓手[31]，它就是基于软体抓手进行精确控制难度相当大这一原因所提出的一种软体抓手，避免了精确控制、目标物体形状、大小等等所带来的困难。该抓手也是由弹性体制成，和硅橡胶类似，都可以有效避免对目标物体进行动作时所带来的不必要的损伤。

该研究证实了软体抓手能够在不知道物体的精确位置、形状或大小的情况下，对脆弱的物体进行稳定的手动操作，这种安全可靠的软体抓手在诸如家庭辅助机器人的场景中有很大的应用潜力。

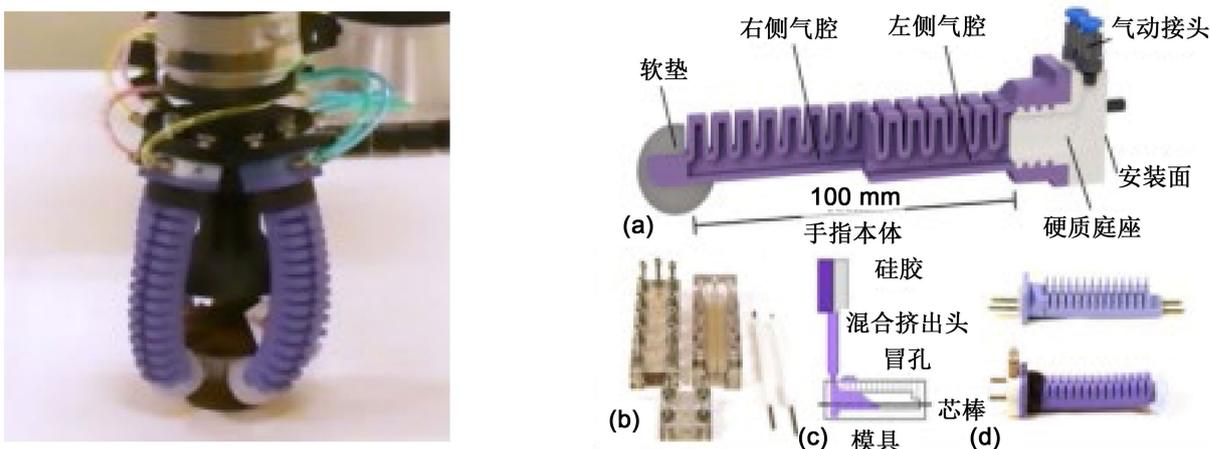


Figure 3. Four-finger soft grasp fingers [31]

图 3. 四指软体抓手[31]

### 3. 智能材料

2021 年 4 月，澳洲卧龙岗大学(UOW)的研究人员受到 DNA 超螺旋的启发，提出了一种新型人造肌肉[32]，应用于微型机器人。但是，由于新人造肌肉的响应速度缓慢，这一缺陷导致它的场景受到限制。因此，研究团队使用水凝胶来推动超螺旋的体积变化，该团队提出的人造肌肉与真正的肌肉高度相似，这一新研究的提出无论是对医学领域，还是软体机器人领域都有至关重要的意义。

除了上述 DNA 超螺旋启发下的人造肌肉外，还有一种液晶聚合物肌肉。2021 年 10 月，匹兹堡大学的研究人员提出一种水陆两通的微型机器人[33]，该机器人是受到昆虫启发而创造的，这款机器人使用了液晶弹性体(LCE)材料，LCE 材料是一种智能材料[34]，它在热、光、电、磁、pH、湿度等外界因素的刺激下，材料会发生宏观形变，撤去外界刺激后，又会恢复原状。基于此，可以制造不同结构与用途的微型机器人，这类机器人对结构和材料要求较高，因为它主要是依靠 LCE 的热机械响应来实现在合适电压下的致动，并且它的壳体几何结构并不是双稳态的，一旦停止供电，壳体结构会立即发生突变，这样一来，它的稳定性是没有保障的，它的形变量通常都非常小，控制精度也不够，因此它在软体机器人上的使用目前并不是很广泛，它只适用于控制精度不太高的地方，如图 4 所示。

2022 年 11 月清华大学张一慧教授、北京航空航天大学文力教授等人提出一种由液晶弹性体(LCE)材料为基础制成的软体机器人[35]，除了最基础的墙面、坡面、天花板，它还可以在圆柱面内外侧、波浪面、楔形面、球面等表面如履平地，不仅如此，还可以在爬行过程中完成转弯，翻跟头等动作，这些都基于它的制造材料，如图 5 所示。

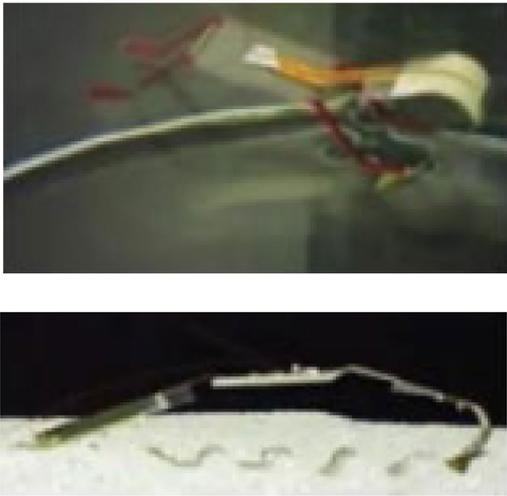


Figure 4. Land-to-water micro-robots [32]  
图 4. 水陆两通微型机器人[32]

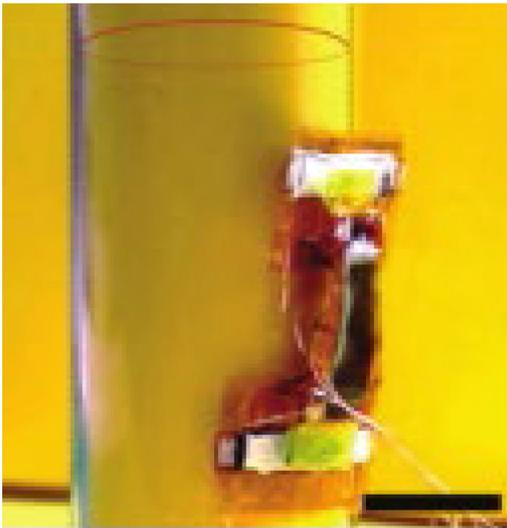
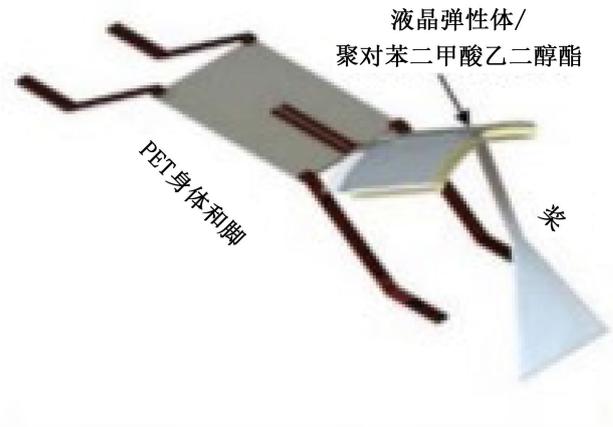
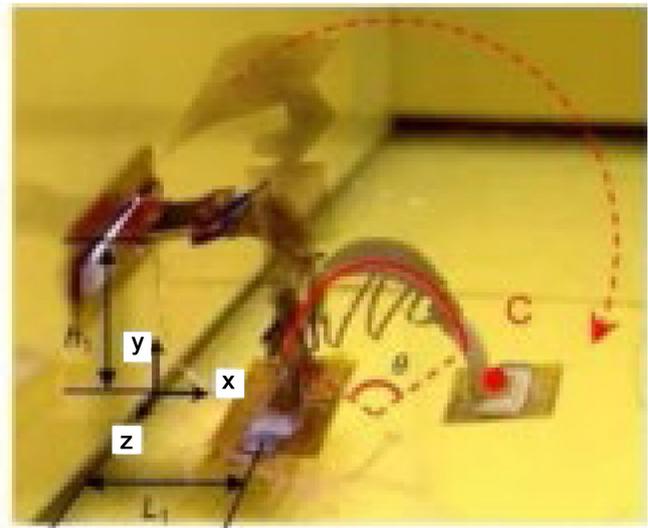


Figure 5. Liquid crystal elastomer soft robot [35]  
图 5. 液晶弹性体软体机器人[35]



尽管液晶弹性体材料现在受到科研人员的广泛关注，然而，它需要通过外界刺激来激活响应和需要较低的模量来实现较大的驱动力一直制约着其应用[36]，因此，研究者需要通过不断改善液晶弹性体材料的物理性质，来使其在软体机器人的研究方面更加完善。

#### 4. 生物材料

生物材料可以来自自然界，也可以在实验室中使用多种化学方法利用金属成分、聚合物、陶瓷或复合材料合成。由于生物材料在体内应用的长期安全性取决于生物降解性[37]，因此可生物降解的生物材料在软体机器人领域的应用，为软体机器人在医疗领域的应用提供了条件。

水凝胶制作的机器人虽然有很多优点，然而应用在医学方面也有它的不足[38]，大多数的微型机器人都是由不可降解的材料制成，这种材料限制了机器人在临床医学中的使用，因为它在人体内工作完毕后，必须通过手术切除，限制了它的适应性。2022年4月，香港城市大学的研究人员提出了一个来自磁性明

胶水凝胶的小型软机器人[39],如图6所示。选择猪皮的生物相容性明胶和铁氧化微粒,可以形成一种特殊水凝胶,这种水凝胶不仅可以实现生物降解,还具有较好的延展性,甚至可以拉伸至原长的2倍以上。在磁场中,它能够快速响应,氧化铁颗粒在凝胶内形成的磁链可以沿磁场方向磁化,从而在外磁场作用下可以实现磁力矩,产生爪状抓握动作。

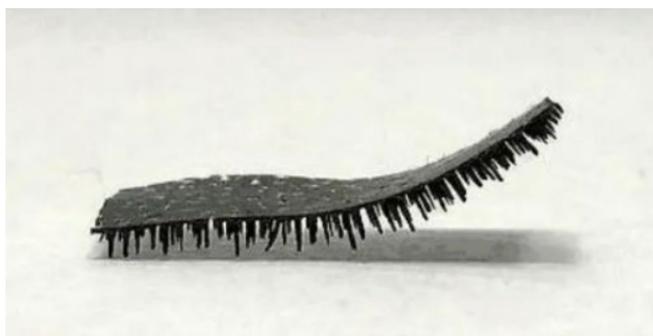


Figure 6. Magnetic hydrogel robot [39]  
图6. 磁性水凝胶机器人[39]

哈尔滨工业大学和香港中文大学的团队研发了一种磁性粘液机器人[40],如图7所示。其粘液组成包括聚乙烯醇、硼砂和钕磁铁颗粒等,能够由磁铁控制其移动和变形,并在机器人的外层包裹了一层无毒的二氧化硅,主要应用于生物医疗领域,特别是能够进入人体内的狭窄区域执行诊疗任务,例如,它可以用于取出被误吞食的电池等异物、监测人体运动、修复电路等。聚乙烯醇是一种水溶性高分子聚合物,具有良好的生物降解性,但硼砂和钕磁铁颗粒不具有生物降解性,因此其整体降解性受到限制。

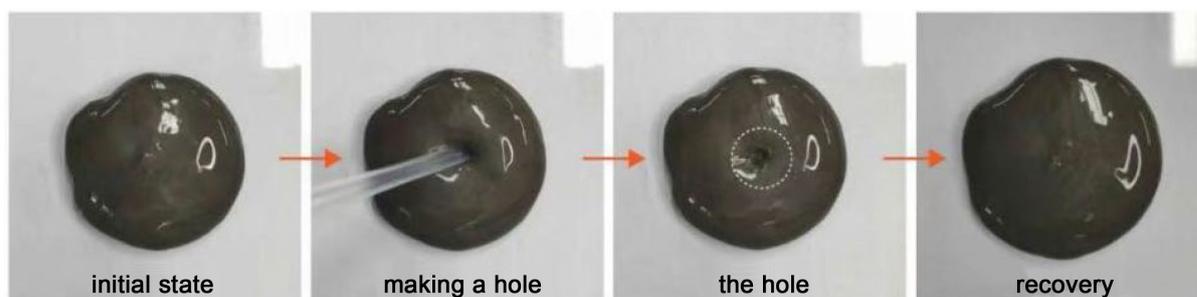


Figure 7. Magnetic slime robot [40]  
图7. 磁性粘液机器人[40]

近日,德国马克斯·普朗克智能系统研究所、奥地利约翰内斯开普勒大学和美国科罗拉多大学博尔德分校的联合团队合作设计了一种高性能人造肌肉[41],其人造肌肉的基本组成有明胶、油和生物塑料,具有完全可生物降解性,大大提高了软体机器人的可持续性。显然,这种人造肌肉最大的优势就是它良好的可生物降解性,对于一些特殊的应用领域,尤其是一次性应用,比如医疗手术、搜救任务和危险物质处理等都需要在产品寿命结束时,将它适当处理,而这种可生物降解的材料就可以直接堆积在肥箱中,几个月后直接生物降解,成为植物生长的堆肥。随着绿色技术的逐渐普及,相信未来这种可生物降解的生物材料建造的人造肌肉必将成为软体机器人的火热材料,为软体机器人的发展铺平了道路[42]。

## 5. 总结

本文综述了国内外近年来软体机器人的发展现状,列举出了各种较为典型的软体机器人。各种各样

的软体机器人本体制作材料类型的出现,有效扩展了软体机器人的应用领域,本文主要围绕软体机器人的本体制作材料类型进行综述,总结了近年来在软体机器人领域不同材料类型的发展状况以及发展方向。

最后总结了近年来材料类型的发展,无论是弹性体材料还是智能材料,或者说是可降解的生物材料,各种新型材料的突破,直接影响了软体机器人的发展方向,软体机器人很大程度主要依靠材料的性能[43],目前材料的应力、应变、响应速度、寿命等一系列问题都亟待解决,适用于软体机器人的新型材料开发已经刻不容缓。

## 参考文献

- [1] Hajiesmaili, E. and Clarke, D.R. (2021) Dielectric Elastomer Actuators. *Journal of Applied Physics*, **129**, Article 151102. <https://doi.org/10.1063/5.0043959>
- [2] Tang, C., Ma, W., Li, B., Jin, M. and Chen, H. (2020) Cephalopod-Inspired Swimming Robot Using Dielectric Elastomer Synthetic Jet Actuator. *Advanced Engineering Materials*, **22**, Article 2070014. <https://doi.org/10.1002/adem.202070014>
- [3] Sun, W., Liu, F., Ma, Z., Li, C. and Zhou, J. (2016) Soft Mobile Robots Driven by Foldable Dielectric Elastomer Actuators. *Journal of Applied Physics*, **120**, Article 084901. <https://doi.org/10.1063/1.4960718>
- [4] Yang, T., Xiao, Y., Zhang, Z., Liang, Y., Li, G., Zhang, M., et al. (2018) A Soft Artificial Muscle Driven Robot with Reinforcement Learning. *Scientific Reports*, **8**, Article 14518. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32757-9>
- [5] Christianson, C., Goldberg, N.N., Deheyn, D.D., Cai, S. and Tolley, M.T. (2018) Translucent Soft Robots Driven by Frameless Fluid Electrode Dielectric Elastomer Actuators. *Science Robotics*, **3**, eaat1893. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aat1893>
- [6] 周方浩. 介电高弹聚合物叠层驱动器建模与软体机器人系统设计研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [7] Ren, Z., Kim, S., Ji, X., Zhu, W., Niroui, F., Kong, J., et al. (2022) A High-Lift Micro-Aerial-Robot Powered by Low-Voltage and Long-Endurance Dielectric Elastomer Actuators. *Advanced Materials*, **34**, Article 2106757. <https://doi.org/10.1002/adma.202106757>
- [8] Kim, S., Hsiao, Y., Lee, Y., Zhu, W., Ren, Z., Niroui, F., et al. (2023) Laser-Assisted Failure Recovery for Dielectric Elastomer Actuators in Aerial Robots. *Science Robotics*, **8**, eadf4278. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.adf4278>
- [9] 马静, 李晨阳. 看完电影, 他造出“毒液”机器人[N]. 中国科学报, 2022-04-21(003).
- [10] Li, Y., Peine, J., Mencattelli, M., Wang, J., Ha, J. and Dupont, P.E. (2022) A Soft Robotic Balloon Endoscope for Airway Procedures. *Soft Robotics*, **9**, 1014-1029. <https://doi.org/10.1089/soro.2020.0161>
- [11] Liu, D., Liu, X., Chen, Z., Zuo, Z., Tang, X., Huang, Q., et al. (2022) Magnetically Driven Soft Continuum Microrobot for Intravascular Operations in Microscale. *Cyborg and Bionic Systems*, **2022**, Article ID: 9850832. <https://doi.org/10.34133/2022/9850832>
- [12] Song, Z., Zhang, W., Zhang, W. and Paolo, D. (2022) A Novel Biopsy Capsule Robot Based on High-Speed Cutting Tissue. *Cyborg and Bionic Systems*, **2022**, Article ID: 9783517. <https://doi.org/10.34133/2022/9783517>
- [13] Tauber, F., Desmulliez, M., Piccin, O. and Stokes, A.A. (2023) Perspective for Soft Robotics: The Field's Past and Future. *Bioinspiration & Biomimetics*, **18**, Article 035001. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/acbb48>
- [14] Esser, F.J., Auth, P. and Speck, T. (2020) Artificial Venus Flytraps: A Research Review and Outlook on Their Importance for Novel Bioinspired Materials Systems. *Frontiers in Robotics and AI*, **7**, Article 75. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00075>
- [15] Rus, D. and Tolley, M.T. (2015) Design, Fabrication and Control of Soft Robots. *Nature*, **521**, 467-475. <https://doi.org/10.1038/nature14543>
- [16] 郭晶晶, 郭校言, 脱佳霖, 等. 柔性有机聚合物光子器件及其生物医学应用[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(13): 211-229.
- [17] Li, C., Xue, Y., Han, M., Palmer, L.C., Rogers, J.A., Huang, Y., et al. (2021) Synergistic Photoactuation of Bilayered Spiropyran Hydrogels for Predictable Origami-Like Shape Change. *Matter*, **4**, 1377-1390. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.01.016>
- [18] Wu, B., Xue, Y., Ali, I., Lu, H., Yang, Y., Yang, X., et al. (2022) The Dynamic Mortise-and-Tenon Interlock Assists Hydrated Soft Robots toward Off-Road Locomotion. *Research*, **2022**, Article 15. <https://doi.org/10.34133/research.0015>
- [19] 王宇轩, 刘朝雨, 王江北, 等. 具有多地形运动能力的双模块软体机器人[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(10): 1388-1396.

- [20] 郭倩楠. 软体机器人研究现状与趋势[J]. 机器人技术与应用, 2022(3): 13-16.
- [21] 尹富强, 许啸, 李赵春. 聚乙烯醇导电水凝胶增强剂的研究进展[J]. 功能材料, 2023, 54(2): 2036-2042+2108.
- [22] 周伯先. 耕耘吧, 兴许会有收获!——记《合成橡胶工业》杂志创办 15 年[J]. 编辑学报, 1993(4): 241-245.
- [23] 白龙. 基于流体驱动的仿生变刚度软体驱动器设计与实验研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [24] 姚建涛, 陈新博, 陈俊涛, 等. 轮足式仿生软体机器人设计与运动分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 27-35.
- [25] Rus, D. and Tolley, M.T. (2015) Design, Fabrication and Control of Soft Robots. *Nature*, **521**, 467-475. <https://doi.org/10.1038/nature14543>
- [26] Odhner, L.U., Jentoft, L.P., Claffee, M.R., Corson, N., Tenzer, Y., Ma, R.R., *et al.* (2014) A Compliant, Underactuated Hand for Robust Manipulation. *The International Journal of Robotics Research*, **33**, 736-752. <https://doi.org/10.1177/0278364913514466>
- [27] Deimel, R. and Brock, O. (2015) A Novel Type of Compliant and Underactuated Robotic Hand for Dexterous Grasping. *The International Journal of Robotics Research*, **35**, 161-185. <https://doi.org/10.1177/0278364915592961>
- [28] Zhou, J., Yi, J., Chen, X., Liu, Z. and Wang, Z. (2018) BCL-13: A 13-DOF Soft Robotic Hand for Dexterous Grasping and In-Hand Manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **3**, 3379-3386. <https://doi.org/10.1109/lra.2018.2851360>
- [29] Zhou, J., Chen, X., Chang, U., Lu, J., Leung, C.C.Y., Chen, Y., *et al.* (2019) A Soft-Robotic Approach to Anthropomorphic Robotic Hand Dexterity. *IEEE Access*, **7**, 101483-101495. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2929690>
- [30] Abondance, S., Teeple, C.B. and Wood, R.J. (2020) A Dexterous Soft Robotic Hand for Delicate In-Hand Manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **5**, 5502-5509. <https://doi.org/10.1109/lra.2020.3007411>
- [31] Becker, K., Teeple, C., Charles, N., Jung, Y., Baum, D., Weaver, J.C., *et al.* (2022) Active Entanglement Enables Stochastic, Topological Grasping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **119**, e2209819119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2209819119>
- [32] Spinks, G.M., Martino, N.D., Naficy, S., Shepherd, D.J. and Foroughi, J. (2021) Dual High-Stroke and High-work Capacity Artificial Muscles Inspired by DNA Supercoiling. *Science Robotics*, **6**, eabf4788. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abf4788>
- [33] Gao, J., Clement, A., Tabrizi, M. and Shankar, M.R. (2021) Molecularly Directed, Geometrically Latched, Impulsive Actuation Powers Sub-Gram Scale Motility. *Advanced Materials Technologies*, **7**, Article 2100979. <https://doi.org/10.1002/admt.202100979>
- [34] 王萌, 宋贺, 祝伊飞. 智能响应蓝相液晶光子晶体[J]. 化学进展, 2022, 34(12): 2588-2603.
- [35] Pang, W., Xu, S., Wu, J., Bo, R., Jin, T., Xiao, Y., *et al.* (2022) A Soft Microrobot with Highly Deformable 3D Actuators for Climbing and Transitioning Complex Surfaces. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **119**, e2215028119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2215028119>
- [36] Wang, Y., Liu, J. and Yang, S. (2022) Multi-Functional Liquid Crystal Elastomer Composites. *Applied Physics Reviews*, **9**, Article 011301. <https://doi.org/10.1063/5.0075471>
- [37] 周洪玲, 吴也可, 赵立星. 碳纳米材料在引导骨再生膜中的应用研究进展[J]. 中国实用口腔科杂志, 2023, 16(1): 93-98.
- [38] 张倩, 安可心, 尚宏周, 等. 高分子水凝胶在医学领域应用的研究新进展[J]. 化学通报, 2023, 86(7): 868-872.
- [39] Yang, L., Miao, J., Li, G., Ren, H., Zhang, T., Guo, D., *et al.* (2022) Soft Tunable Gelatin Robot with Insect-Like Claw for Grasping, Transportation, and Delivery. *ACS Applied Polymer Materials*, **4**, 5431-5440. <https://doi.org/10.1021/acsapm.2c00522>
- [40] Sun, M., Tian, C., Mao, L., Meng, X., Shen, X., Hao, B., *et al.* (2022) Reconfigurable Magnetic Slime Robot: Deformation, Adaptability, and Multifunction. *Advanced Functional Materials*, **32**, Article 2112508. <https://doi.org/10.1002/adfm.202112508>
- [41] Rumley, E.H., Preninger, D., Shagan Shomron, A., Rothmund, P., Hartmann, F., Baumgartner, M., *et al.* (2023) Biodegradable Electrohydraulic Actuators for Sustainable Soft Robots. *Science Advances*, **9**, eadf5551. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adf5551>
- [42] 张梦然. 可生物降解人造肌肉问世[N]. 科技日报, 2023-03-24(004).
- [43] 袁菡悠. 气动软体机械手的设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2022.