

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.230010

软体机器人建模与控制技术研究进展

梅 栋^{1,2}, 赵 鑫^{1,2}, 唐刚强^{1,2}, 赵 春^{1,2}, 李 博^{3,4}, 骆敏舟^{1,2},
王延杰^{1,2}

(1. 河海大学机电工程学院, 江苏 常州 213022; 2. 河海大学江苏省特种机器人技术重点实验室, 江苏 常州 213022;
3. 西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049; 4. 西安交通大学陕西省智能机器人重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 由于软体机器人具有超高冗余、大变形以及非线性等特点, 如何精准控制软体机器人实现预期目标的抓取和操作, 一直以来都是研究人员广泛关注的问题。本文根据是否建立机器人数学模型、是否采用传感器反馈以及采用何种控制算法将现有软体机器人控制技术划分为基于模型的控制与无模型控制、开环控制与闭环控制、经典控制与智能控制 3 个类别, 分别阐述软体机器人在建模、反馈以及控制算法方面的研究现状并进行归纳总结。最后, 讨论了软体机器人控制技术面临的问题和挑战, 并对未来软体机器人控制技术的发展进行了展望。

关键词: 软体机器人; 控制技术; 数学模型; 传感器反馈; 控制算法

A Review of Soft Robot Modeling and Control

MEI Dong^{1,2}, ZHAO Xin^{1,2}, TANG Gangqiang^{1,2}, ZHAO Chun^{1,2}, LI Bo^{3,4}, LUO Minzhou^{1,2},
WANG Yanjie^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Special Robotics Technology, Hohai University, Changzhou 213022, China;
3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
4. Shaanxi Province Key Laboratory for Intelligent Robots, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Soft robots have such features as hyper redundancy, large deformation, and nonlinearity, and its precise control for grasping and manipulating the desired objects is a widely concerned problem. In this paper, the existing soft robot control technologies are divided into three categories: model-based control and model-free control, open-loop control and closed-loop control, classical control and intelligent control, according to whether to establish a mathematical model of the robot, whether to use sensor feedback, and what kind of control algorithm to be used. The research statuses of soft robots in modeling, feedback, and control algorithm are expounded and summarized, respectively. Finally, the problems and challenges of the soft robot control technology are discussed, and its future development is prospected.

Keywords: soft robot; control technology; mathematical model; sensor feedback; control algorithm

作为一种自动化装备, 机器人自问世伊始, 便被各领域内的专家学者广泛关注。随着机器人技术的不断发展, 机器人已经被广泛应用于工业生产^[1]、物流运输^[2]、医疗康复^[3]以及军事勘探^[4]等各个领域, 在社会生产活动中占据着举足轻重的地位。传统意义上的机器人主要由金属材料构成其本体结构, 齿轮、齿条和铰链等组成运动关节, 电机等刚性驱动件作为动力源, 具有输出力矩大、传动精度高以及运动速度快等诸多优点。但相应的, 其结构复杂、运动灵活性低、与环境交互能力差且只能在结构化环境下工作, 极大限制了机器人的

发展^[5]。为解决这一问题, 拥有更多驱动关节的冗余机器人和超冗余机器人应运而生, 比如多自由度机械手^[6-7]、蛇形机器人^[8-9]等。采用的关节数量越多, 机器人的冗余度越高、运动灵活性越大、环境适应能力越强。然而, 大多数冗余机器人仍采用刚性结构, 使其无法任意改变自身尺寸, 缺少柔顺性与交互安全性^[10]。随着仿生学、材料学的不断发展, 机器人系统有了突破性的进展并衍生出一个新的分支——软体机器人。软体机器人本体采用柔性材料或软材料(杨氏模量为 $10^4 \sim 10^9$ Pa)制作而成, 可以实现连续变形, 理论上具有无限自由度,

且能够任意改变自身形状通过狭缝等障碍区域, 具有良好的柔顺性与安全交互能力^[11-12], 弥补了传统机器人与冗余机器人的不足。软体机器人与传统机器人、冗余机器人的演变关系如图 1 所示。

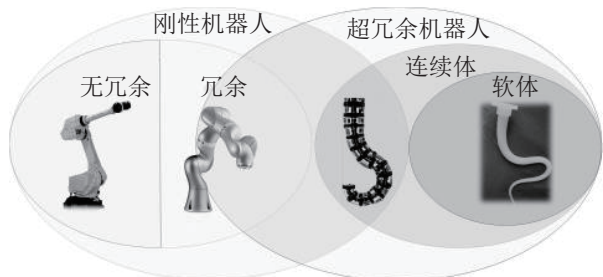


图 1 软体机器人的演变关系^[13]
Fig.1 The evolution of soft robot

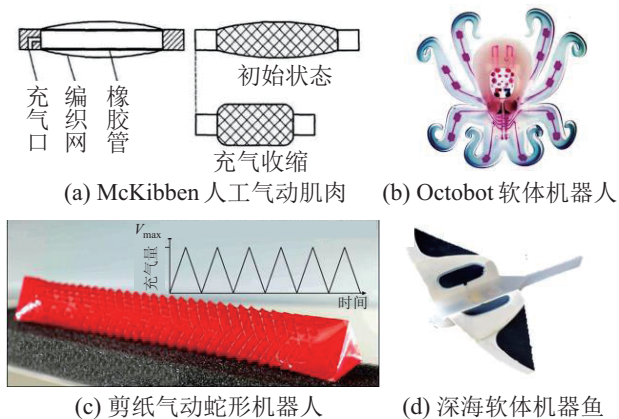


图 2 典型软体机器人研究成果

Fig.2 Typical research results of soft robot

软体机器人的历史最早可追溯至 20 世纪 50 年代, McKibben 研发了一种帮助小儿麻痹症病人锻炼手腕的带网格的气动人工肌肉 (PAM), 如图 2(a) 所示。该 PAM 主要由橡胶管和纤维编织网组成, 两端封闭, 通过往橡胶管腔内充入空气增大腔

内压力, 使橡胶管沿径向膨胀, 从而带动 PAM 驱动器沿轴向收缩产生轴向拉力^[14]。近年来, 随着新兴技术的发展, 软体机器人技术有了突破性进展。2016 年, 哈佛大学利用 3D 打印技术成功研发出世界上首个全软机器人 Octobot^[15], 如图 2(b) 所示, 该机器人通过化学反应提供动力, 电源和驱动模块等均采用软材料且利用 3D 打印技术制作完成。

Octobot 的研制成功为软体机器人的发展带来了划时代的突破。2018 年, Rafsanjani 等^[16] 基于传统剪纸技术, 研制出一种气动蛇形机器人, 如图 2(c) 所示。该机器人仅由一根硅橡胶管组成, 其外表缠绕一层由激光切割的可拉伸塑料薄片, 当对管内施加大气压力时, 机器人产生径向膨胀并轴向收缩使得外表的鳞片弹出, 固定在接触面以拉动机器人前进, 为软体机器人的发展提供了新思路、新方法。浙江大学李国瑞等^[17] 研发的深海软体机器人首次实现了软体机器人在万米深海自主游动, 如图 2(d) 所示。这种环境自适应的仿生软体机器人和智能系统, 将为深海探索科考、环境监测与资源勘探提供解决方案, 为复杂环境与任务下机器人及智能系统设计提供新思路。一些典型的软体机器人性能及参数如表 1 所示。

软体机器人发展迅猛, 在诸多领域均已崭露头角, 其核心技术在于结构设计、制备集成以及驱动控制。目前, 软体机器人的结构设计中大多采用仿生方法, 如仿人工肌肉^[18-19]、仿章鱼触手^[20-21] 以及仿深海鱼类^[17,22] 等; 制造方式主要采用多材料 3D 打印技术^[23-24]、失蜡铸造法^[22,25-26]、形状沉积制造法^[27-28] 等。不同于刚性机器人采用电机等刚性驱动元件的驱动方式, 软体机器人对驱动方式的要求极为严格, 现有的软体机器人驱动方式主要可

表 1 具有代表性的软体机器人性能参数表
Tab.1 Performance parameters for representative soft robots

名称	驱动方式	尺寸 /cm	质量 /g	运行速度 /(cm/s)	负载 /N
Octobot 机器人 ^[15]	化学驱动	≈5×5×2			
深海软体机器鱼 ^[17]	介电弹性体 (DE) 驱动	22×28	150	5.19 (3200 m 深度)	
四足软体机器人 ^[29]	气动	≈ 5.8×13.5		≈ 3	
软体机器鱼 ^[30]	液压	47×23×18	1600	≈ 21.7	
生长型软体机器人 ^[31]	气动	$d = 0.18 \sim 36$		1000	
磁控移动软体机器人 ^[32]	磁驱动	0.37×0.15×0.0185			
光驱动软体机器人 ^[33]	光驱动	$l = 0.17, d = 0.09$		≈ 0.03	
无系留大负载抓手 ^[34]	气动	—	1500	150 (抓握球拍挥动)	≈ 400
仿章鱼触手 ^[20]	气动	$l = 20$			≈ 27
软体神经假肢手 ^[35]	气动	19×9	292		> 2.3

分为基于流体压力的流体驱动、基于材料变形的智能材料驱动和其他特殊驱动。其中，流体驱动分为液压驱动^[36-37]与气体驱动^[38-39]，是现今软体机器人中采用最多的驱动方式。气体驱动具有气源广、无污染和驱动力大等优点，技术也最为成熟^[40]。但其内部与外部之间存在较大的气压差，轻微的损伤就容易导致驱动器的损坏。液压驱动具有功率密度大和反应速度快等优点，但其工作介质对环境的适应性较差且需要液压泵等辅助设备，系统较为复杂，在一定程度上受到限制。智能材料驱动主要分为电活性聚合物驱动^[41-42]（EAP）和形状记忆合金驱动^[43-44]（SMA）。按照驱动机理，EAP又可分为离子型和电场型。其中，以离子聚合物金属复合材料（IPMC）为主要代表的离子型驱动器具有施加电压小、产生变形大等优点，但其工作环境需要一定的湿润度，且制作成本较高；以DE为主要代表的电场型驱动器响应速度快、不受湿润度影响且输出力较大，但较高的工作电压增大了制作成本与安全隐患。SMA是一种基于热变形且具有形状记忆效应的智能材料，通过SMA热响应变形实现软体机器人的运转。SMA质量轻、功率密度高，但其效率低且难以实现精确的温度控制，过热或超限会导致驱动器永久损坏。其他特殊驱动方式主要为磁驱动^[45-46]、化学驱动^[47-48]、光驱动^[49-50]等。

虽然研究人员研制了应用于不同场合的软体机器人，但如何精确地控制软体机器人实现预定动作一直以来都是软体机器人所面临的关键技术难题之一^[51]。机器人的控制过程一般可分为3个步骤：首

先，建立机器人数学模型，描述控制量与期望目标之间的关系，为机器人控制建立理论基础；其次，选取合适的传感器及其布局进行数据反馈形成闭环控制以实现控制误差的补偿，达到精确控制的目的；最后，设计控制算法，结合传感器反馈以及建立的数学模型实现软体机器人控制目标。与刚性机器人相比，软体机器人控制的难点主要在于其理论上拥有无限自由度，本体采用的软材料以及不同的驱动技术与结构设计使得软体机器人具有大变形、高非线性的特性，因此需要机、电、自动化、材料以及计算机等多学科交叉分析研究^[52]，从而导致软体机器人在建模、反馈以及控制算法上面临诸多困难。为解决软体机器人的控制难题，研究人员对软体机器人的控制技术进行了深入研究。如，Hannan等^[53]利用常曲率方程（CC）推导出仿象鼻连续体机器人的一般运动学模型；上海交通大学王贺升团队^[54]利用视觉反馈采用自适应控制算法对软体机器人位置进行控制，从而解决软体机械臂穿越狭窄处发生卡缝的问题。但相对于众多学者对软体机器人结构、制造、驱动的丰富归纳与论述^[55-58]，有关软体机器人控制的成果并没有很多文章对其进行系统的归纳、总结。基于此，本文根据是否建立机器人数学模型、是否采用传感器反馈以及采用何种控制算法将现有软体机器人控制技术划分为基于模型控制与无模型控制、开环控制与闭环控制、经典控制与智能控制3个类别分别阐述软体机器人在建模、反馈以及控制算法方面的研究现状并进行归纳总结，如图3所示。最后，讨论了软体机器人控制

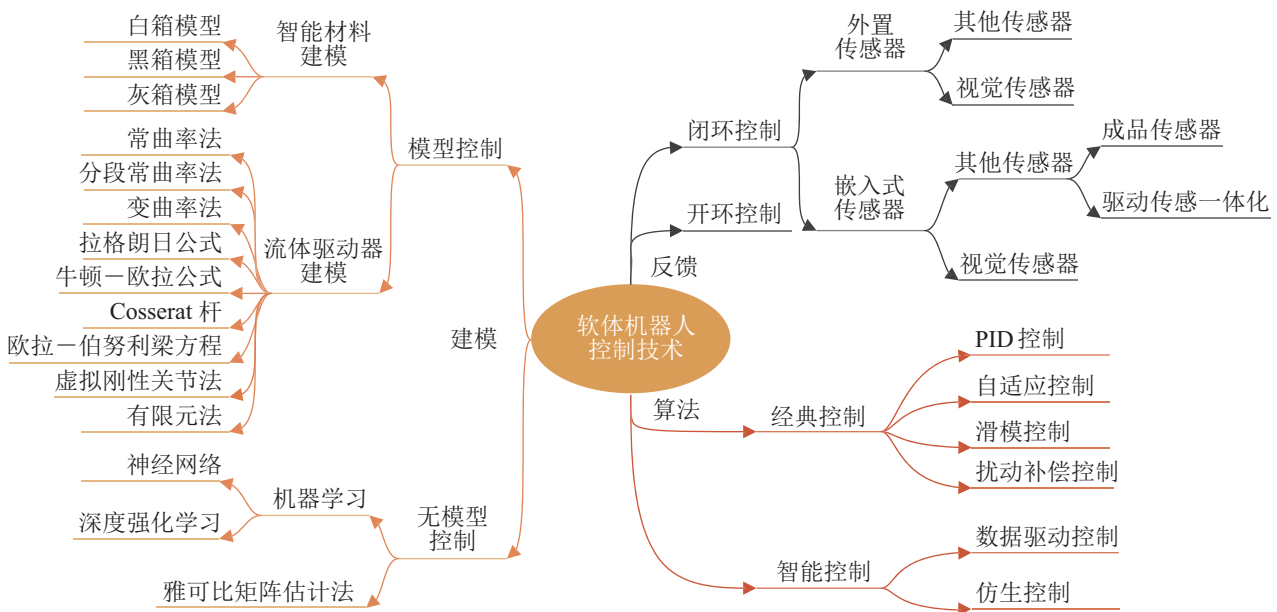


图3 软体机器人控制技术分类

Fig.3 Classification of soft robot control technologies

表 2 软体机器人主要的基于模型的控制策略与无模型控制策略
Tab.2 Mainly model-based and model-free control strategies for soft robots

方法	基于模型的控制									无模型控制		雅可比矩阵估计	
	流体弹性体驱动建模理论					智能材料驱动建模理论				机器学习			
	常曲率/分段常曲率法	变曲率法	虚拟刚性关节法	拉格朗日方法	Coss-erat 杆	欧拉-伯努利梁方程	有限元法	白箱模型	黑箱模型	灰箱模型	神经网络	深度强化学习	
基本原则	基于几何微分理论		基于能量守恒/力平衡				基于静力学分析	基于材料内部物理、化学机理	基于实验数据和迟滞算子模型	基于实验数据和等效模型	基于数据学习		参数估计
优点	通用性高、构造简单、计算便捷、便于控制	相较于分段常曲率模型精度高、更符合实际情况	结合刚性理论构造简单、计算方便	建模精度相对较高	建模精度相对分段常曲率较高	理论简单、便于构造、结合分段常曲率或其他理论建模精度相对较高	通用性高、建模精度高、关系可视化	准确表达内部物理、化学关系的力学关系	无需考虑内部复杂机理、通过实验易于获得数据、建模方法简单	相对白箱模型实用性强、相对黑箱模型建模精度高	通用性高、无需考虑摩擦、重力等扰动干扰、控制过程简单且精度相对较高	通用性高、对未知环境适应性更强、鲁棒性好	采用传统方法的参数估计、结构简单、便于设计
缺点	未考虑曲率变化的实际情况、建模控制精度低	计算时间长、不利于实时控制	构造方法不统一使得模型通用性较差	计算复杂、求解困难、非线性问题增加建模难度	计算量大、非线性问题增加建模难度、难以用于实际控制	非线性问题增加建模难度、计算量大	求解复杂、计算量大、实时控制效果差	建模复杂、难以用于实际控制	模型通用性不高	等效模型构造方法不统一、模型通用性不高	计算量大、存在过拟合问题	计算量大、难以选取合适的优化算法与激活函数	未考虑动力学变化、不适合动态控制
适用范围	适用于已知结构化环境下的软体机器人控制									适用于未知非结构化环境下的软体机器人控制			

技术研究中的难点和热点, 并对其未来的控制技术
应用及发展趋势进行展望与总结。

1 基于模型的控制与无模型控制 (Model-based control and model-free control)

一直以来, 在控制领域中存在 2 种极端的争议: 一种认为在控制中重要的是鲁棒的控制理论, 而无需复杂的机器人数学模型; 另一种则认为在控制中重要的是鲁棒、精确的机器人数学模型, 而无需复杂的控制器, 而解决问题的关键是在数学上寻找精炼的鲁棒模型。不同于传统刚性机器人丰富的建模理论, 软体机器人的本身十分复杂, 存在非线性问题, 而且理论上具有无限自由度, 难以直接采用传

统的机器人建模理论^[59]。现有的软体机器人建模方法多是基于刚性机器人理论改进而成, 尚未形成统一的理论框架。本节根据是否通过建立数学模型以及采用何种建模方法实现对软体机器人控制的角度, 从基于模型的控制与无模型控制 2 个方面对软体机器人的控制现状进行综述分析, 并对 2 种控制方式的优劣进行对比总结, 如表 2 所示。

1.1 基于模型的控制

由于软体机器人大多采用驱动本体一体化设计, 因此对软体机器人的建模控制即是对其驱动器的建模控制。根据驱动方式的不同可将软体机器人的建模方式分为基于流体弹性体驱动器的建模和智能材料驱动器建模 2 类。

1.1.1 基于流体弹性体驱动技术的模型控制

现阶段, 基于流体弹性体驱动器建模的软体机器人多从宏观角度描述其整体的弯曲变形以建立机器人运动学与动力学模型, 常用的流体驱动器建模方法主要有常曲率方程^[60-61] (CC)、分段常曲率方程^[62-63] (PCC)、变曲率方程^[64] (VC)、拉格朗日方法^[65-66]、牛顿-欧拉方法^[67]、梁理论^[68-70]、虚拟刚性关节法^[71-72]、有限元法^[73-74]等。

相较于传统的刚性机器人利用关节角度与杆长等参数采用 D-H (Denavit-Hartenberg) 法和指数积法 (PoE) 建立机器人运动学模型^[75], 软体机器人由于变形连续, 且无连杆与关节相连, 因此并不适宜直接采用传统机器人的运动学建模方式。通过对软体机器人变形的研究, 针对其变形时产生弯曲且部分曲率恒定的现象, 研究人员在 D-H 法的基础上提出了一种近似常曲率法, 而对于多段软体机器人, 对各个常曲率段进行多次齐次变换组合即可得到分段常曲率理论。在该理论假设下, 软体机器人可以根据不同曲率划分为多个常曲率段, 每个常曲率段可由该段的长度、曲率和偏转角 3 个参数描述该段在位形空间下的位姿, 如图 4 所示 (k 、 L 、 φ 分别代表常曲率段的曲率、弧长和偏转角, $\{S_i\}$ 为参考坐标系; T_0 、 T_1 、 T_2 分别为各分段之间的齐次变换矩阵)。并且通过 D-H 变换构建驱动器/关节空间 (驱动器/关节的参数, 如力、力矩、长度和压力等) 与位形空间 (曲率段参数: 长度、曲率和偏转角) 的映射关系以及位形空间与任务空间 (曲线坐标: 位置和角度) 的映射关系 (如图 5 所示, 其中 q 为驱动器或关节空间的变量, k 、 L 、 φ 为位形空间的曲率段参数, x 为任务空间的变量, f_{specific} 为驱动器空间向位形空间的正映射, $f_{\text{independent}}$ 则为位形空间向任务空间的正映射, $f_{\text{independent}}^{-1}$ 、 f_{specific}^{-1} 分别为对应的逆映射), 实现软体机器人的运动学描述。其中位形空间与任务空间之间的映射可根据 D-H 变换得到, 而驱动器空间或关节空间与位形空间之间的映射则取决于软体机器人的本体结构^[76]。

目前, 分段常曲率理论是现有流体驱动型软体机器人最广泛采用的运动学建模方法^[77], 在各类型的软体人建模控制中均取得了优异的表现。如, Katzschmann 等^[78] 采用分段常曲率模型对模块化软体机械臂以及末端抓手进行运动学建模, 并以算法形式写进软体机械臂控制程序中, 使得末端抓手对物体的抓取更加准确。della Santina 等^[79] 根据多段结构平面软体机械臂的分段常曲率模型, 通过曲率变化, 实现机械臂的运动学控制。Polygerinos 等^[80]

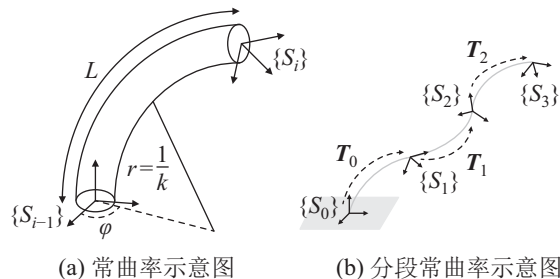


图 4 常曲率与分段常曲率示意图

Fig.4 Constant curvature and piecewise constant curvature diagram

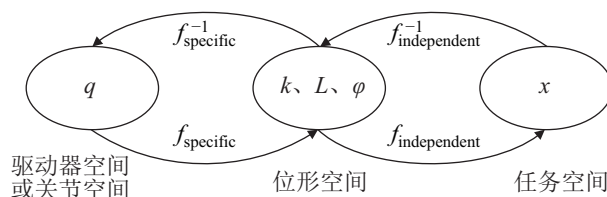


图 5 3 个空间之间的转换示意图^[55]

Fig.5 Schematic diagram of transformation among three spaces

通过分段常曲率理论推导出纤维增强型软体气动驱动器的气压变化与驱动器弯曲角度之间的关系, 并采用有限元软件仿真模拟验证了模型的精确度。虽然分段常曲率模型适用于大部分软体机器人的建模控制, 但它始终是在各弯曲段保持恒定曲率的理想情况下建立的。由于实际机器人各分段曲率是变化的, 因此采用分段常曲率理论构造的运动学模型精度较低, 难以达到令人满意的位置控制效果^[81]。

为解决软体机器人非恒定曲率的问题, 研究人员在分段常曲率模型的基础上提出一种变曲率的运动学建模方法。该方法将连续的软体机器人主体划分为若干个虚拟圆弧段, 并假设这些圆弧段具有各自不同的恒定曲率, 然后通过分段常曲率方法对这些圆弧段进行建模并将其串联起来, 使得模型更加符合几何上的变曲率的特征。Mahl 等^[64] 利用变曲率方法对仿生机臂进行离散化划分, 并通过详细的数学推导与理论分析分别建立了通用软体机器人运动学模型与特殊机器人运动学模型。然而由于机器人主体被划分为多个相对较小的恒曲率圆弧段, 因而计算过程复杂, 并不适合实时控制要求较高的机器人。与刚性机器人不同, 当软体机器人受到外部负载作用或与外部环境交互时, 其柔性材料特性使得软体机器人接触点或承载段因受力而发生变形, 导致软体机器人位姿发生变化, 增大了软体机器人运动学模型误差^[82]。因此采用单一的运动学模型, 以位置信号为控制对象的模型控制方法并不能有效规避软体机器人因受力原因导致的位姿误差。

针对软体机器人运动学与动力学之间的强耦合特性, 机器人建模过程中还需分析软体机器人的动力学, 将由施加载荷和扭矩引起的运动学参数变化纳入考虑范围, 以建立更加复杂精确的系统性模型。软体机器人一般采用拉格朗日方法和牛顿-欧拉方法将其离散化为多个虚拟模块, 通过分析计算得到每个模块的动能、势能以及外部输入能量, 然后通过拉格朗日或牛顿-欧拉方法计算每个模块在广义坐标系下的运动方程, 得到软体机器人的动力学模型^[65-67]。Marchese 等^[66]采用模块化组合方式开发了可双向弯曲的圆柱形软体机械臂, 并将重力势能作为影响因素纳入建模流程, 利用拉格朗日方法首次实现了对流体弹性体机械臂的动力学建模。Thieffry 等^[67]结合拉格朗日方法与牛顿-欧拉方法, 提出一种线性化的软体机器人动力学建模方法, 并利用 Matlab 进行仿真, 验证模型的有效性。但在线性化过程中, 该模型忽略了重力和摩擦力等重要因素, 因此在实际应用中的效果尚未可知。

除此之外, 经典的梁理论也被应用于软体机器人的动力学建模以求解软体机器人的运动学参数与负载力之间的耦合问题。Cosserat 杆理论是应用于软体机器人建模较为成熟的梁理论之一, 连续 Cosserat 杆方法是一种无限自由度的建模方法, 将软体机器人划分为无限多个微小截面, 通过计算各截面的弯曲、扭转、剪切和拉伸 4 种应变得到软体机器人的运动变化。Trivedi 等^[68]利用 Cosserat 杆理论推导出软体机械臂“OctArm V”的精确几何模型。即使在重力等外部载荷的影响下, 该模型依然保持很高的精度。Renda 等^[83]则基于 Cosserat 杆理论建立了一种精确的绳驱动连续体软体机器人手臂动力学模型, 并在模型中考虑了复杂的耦合行为。此外, 还对软体机器人在水下所受到的阻力与压力进行详细的分析, 将动力学模型扩展到水下环境。尽管基于 Cosserat 杆理论建立的软体机器人数学模型十分精确, 但由此产生大量的微分方程增加了计算成本, 难以用于实际的控制。

为了降低 Cosserat 杆建模的计算成本, Renda 等^[69]基于离散的 Cosserat 理论, 提出了一种新的软体机器人动力学分段常应变模型, 该模型除了可描述杆的弯曲曲率和轴向变形外, 还引入了剪切和扭转变形。而对于不能在有限部分进行离散分析的软体机器人, 采用离散 Cosserat 方法与连续 Cosserat 方法相融合的策略搭建模型框架, 并将该模型应用于软体爬行机器人。在此基础上, Renda^[84]将离散 Cosserat 理论应用到软体机械臂的建模控制中, 进

一步扩展了离散 Cosserat 理论的应用范围。

欧拉-伯努利梁理论也是一类常应用于软体机器人的建模理论。Mbakop 等^[70]基于欧拉-伯努利梁理论与 PH (Pythagorean Hodograph) 参数曲线的特点, 并结合软结构的宏观和微观特性提出了一种适用于软体机器人 2 维和 3 维形状重建的逆动力学建模方法。该模型将欧拉-伯努利梁理论与 PH 进行耦合, 在无外部载荷情况下, 可确定用于形状重建的有限虚拟控制点的位置与执行器期望输入之间的关系。实验结果表明, 该方法适用于不同类型的软连续体机器人在 2 维和 3 维空间中的复杂形状物体模型重建。Olson 等^[85]将自应力和外部负载引进建模过程, 以 McKibben 驱动器机械臂为例, 基于欧拉-伯努利梁理论建立了一种通用的软体机械臂模型。该模型可以预测由驱动器引起的内应力和外部载荷 (如重力、摩擦力、尖端载荷), 也可对机械臂负载空间进行评估。

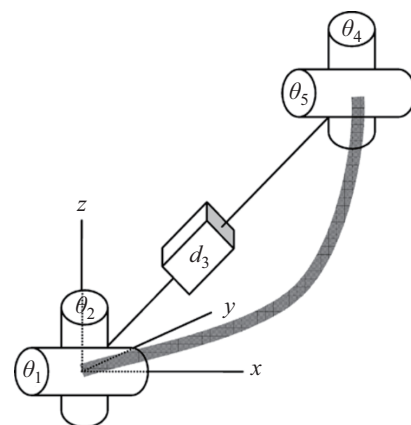


图 6 虚拟刚性连接模型^[71]

Fig.6 Virtual rigid connection model

为了更好地利用刚性机器人建模理论, 建立更精确的软体机器人数学模型, Jones 等^[71]提出采用虚拟刚性关节方法对软体机器人进行动力学建模, 其原理如图 6 所示。该模型将软体机械臂虚拟成刚性连接杆结构, 其两端由 2 个旋转关节的相交轴构成, 中部由一个移动关节组成, 通过 D-H 齐次变换矩阵对 2 个旋转关节的相交轴进行耦合, 将任务空间 (坐标、方向) 与驱动器空间 (气压或肌腱长度) 关联起来。这种方法得到的雅可比矩阵较为简单、便于实时控制。Wang 等^[72]则利用一种离散的虚拟刚性连接构造方法结合分段常曲率模型, 实现了多段章鱼手臂在 3 维空间中方向、曲率和段长的精确控制, 进一步丰富了虚拟刚性连接的建模方法与应用。但对于多段式的软体机械臂采用何种虚拟刚性连接方法仍是一个值得讨论的问题。

以上方法均是基于软体机器人特性,对现有刚性机器人理论进行改进所得到的理论建模方法。除此之外,基于数值计算的有限元分析法(FEA)也是软体机器人建模中较为常用的方法。Xue^[73]利用有限元软件Abaqus建立了纤维增强型气动软体手指的有限元模型,根据有限元分析获得了输入压力、几何参数与执行器弯曲角度、输出力之间的明确关系,并且通过分析更好地了解了各个参数对执行器性能的影响。与大多数理论分析模型不同,有限元模型提供了系统非线性响应更为真实的分析结果,可以很容易地适应不同的几何形状,实现软体机器人变形和应力关系的可视化,从而更好地了解软驱动器在实际应用中局部应变对整体驱动性能的影响。此外,有限元模型可以为零件内部的相互作用提供更深入的有限元分析结果^[74,80],实验对比表明,有限元分析可以很好地模拟软体气动执行器的弹性变形。然而,有限元模型的计算量大,不能达到理想的实时控制效果。随着计算机硬件的发展,计算力不足的现象有所改善,但仍然较难达到机器人实时控制的要求。

近年来,其他一些改进的分段常曲率模型^[86-87]和混合建模方式^[88-92]也被应用于软体机器人建模控制中。如,della Santina等^[86]详细分析了分段常曲率模型中各参数的性质对模型构造的限制,提出了一种改进的分段常曲率参数化方法,解决因参数问题导致的不连续和奇异点问题;Runge等^[87]提出了一种结合有限元与分段常曲率模型的软体机器人建模框架,借助Matlab、Abaqus和Python等工具,可应用于一系列不同结构的软体机器人,他们还利用气动软体机械臂验证了该建模框架的可行性;Zhang等^[88]提出了一种基于双层板理论的软体机器人运动学建模方法,建立的模型描述了软体机器人整体变形与外部环境之间的关系。尽管混合建模的方式耦合了各模型的优点,考虑的参数较为全面、模型的适应性更强,进一步丰富了软体机器人的建模方法,但如何有效地利用各种建模理论仍然具有一定的挑战,且混合模型的通用性也是一个值得考虑的问题。

1.1.2 基于智能材料驱动技术的模型控制

除了流体弹性体驱动器外,通过材料机电特性产生变形的智能材料驱动器也是软体机器人驱动技术的研究热点之一。利用材料本身特性建立驱动材料数学模型,继而通过此模型对软体机器人实现控制也是软体机器人建模控制中广受关注的领域。现有智能材料数学模型的构造方法可统分为白箱模

型、黑箱模型和灰箱模型3类^[93]。白箱模型通过材料内在的物理和化学机理利用微分和偏微分方程建立智能材料的多物理场模型来描述材料的变形行为,是极为复杂的智能材料建模方法,无法直接将该模型应用于软体机器人的建模控制中^[94],实际控制中极少采用此类建模方法。黑箱模型则不考虑复杂的内部机理变化,只根据系统的输入输出关系构建数学模型,即通过宏观的实验参数(施加给该材料的电压或电量等)对实验结果(材料产生的位移以及力矩等)采用数据拟合得到数学模型,该方法通过设置合理的实验程序,一般较容易获得材料的数学模型。灰箱模型是结合白箱模型与黑箱模型的优点提出的一种智能材料建模方式,即将某些物理定律和经验公式相结合^[95],一定程度上考虑了系统内部变化来描述材料的变形行为。最常使用的灰箱模型方法为等效模型法,即根据材料的物理特征建立相应的等效模型,模型参数则通过实验数据拟合得到。由于材料性质的不同,建模过程中各智能材料采用的具体建模方法也略有不同。

EAP(电活性聚合物)质量轻、应变大、环境适应性好,被广泛应用于制造软体机器人驱动器。很多学者对EAP的建模优化进行了研究,一些学者将EAP建模分为原子级、分子级、中间级和宏观级4个级别^[96]或根据EAP材料的迟滞特性和蠕变特性建立EAP迟滞非线性模型和蠕变模型^[97]。IPMC(离子聚合物金属复合材料)是一种典型的离子型EAP材料,由于其驱动电压小、产生变形大等优点成为应用于软体机器人驱动器制造的主要EAP材料之一。为了解决IPMC驱动控制的问题,众多学者致力于在实验和理论上研究IPMC内在的致动机理并建立数学模型描述IPMC的弯曲变形。Khawwaf等^[98]使用最小二乘法拟合实验数据建立水下环境中的IPMC数学模型,并将模型的变化表示为IPMC部分浸入水中时的不确定扰动。根据识别出的模型设计一个鲁棒控制器,该控制器能够在IPMC部分移出水面导致受力产生变化时仍然保持跟踪精度。且在有不确定扰动的试验中大大提高IPMC驱动器的跟踪精度。Yi等^[99]基于实验数据处理结果建立了IPMC输入电压与机器鱼加速度之间的传递函数模型,并在该模型基础上开发了一种机器鱼避障控制算法,有效实现了机器鱼的避障控制。以上均为利用实验数据拟合建立的黑箱模型,由于IPMC材料的迟滞特性和蠕变特性,简单地利用数据拟合并不能获得精确的IPMC数学模型。因此研究人员在建立黑箱模型时常引入迟滞算子和蠕

变算子, 从而对实验数据进行处理并建立 IPMC 的迟滞模型和蠕变模型。常用的迟滞模型有 Preisach 模型、Prandtl-Ishlinskii (PI) 模型和 Krasnosel'skii-Pokrovskii (KP) 模型等。Chen 等^[100]引入 PI 算子对实验数据进行建模处理, 建立了一种 IPMC 驱动器的 2 阶动力学模型, 并实现了对低频期望信号的高精度输出跟踪控制。Feng 等^[101]将输入信号的速度与加速度纳入建模考虑, 引入 Preisach 算子并建立了 IPMC 驱动器的动态 Preisach 模型, 该模型可以精确地描述迟滞现象的速率相关特性。Li 等^[102]通过对压电蠕变模型的改进, 建立了适合的 IPMC 蠕变模型, 并采用自适应逆控制算法实现了良好的控制效果。尽管黑箱模型易于建立, 但该策略是建立在已有实验数据的基础之上, 严重依赖实验数据, 不同的实验结果可能得到不同的参数模型, 因此该模型的通用性不高。

目前常用的 IPMC 灰箱等效模型有等效悬臂梁模型^[103-104]和等效电路模型^[105-106]2 种。梁模型将 IPMC 内部应力场假设为施加在悬臂梁上的均匀载荷, 然后根据实验数据中挠度和力的关系, 通过数据拟合出等效悬臂梁的各种基本参数, 进而建立 IPMC 驱动器的输出位移和力的关系, 这种模型可以有效地表征 IPMC 的致动作用, 其原理如图 7 所示。Chen 等^[103]提出了第 1 个基于 IPMC 驱动的机器鱼模型, 该模型将 IPMC 等效成一个悬臂梁模型, 并融合复杂的流体动力学使其能够同时捕捉鱼鳍在推进中的作用及其对 IPMC 梁的加载效应, 并通过实验数据确定模型参数。该模型被用来预测机器鱼的巡航速度以控制施加给 IPMC 的电压, 从而控制机器鱼实现左转、右转以及向前游动等动作。

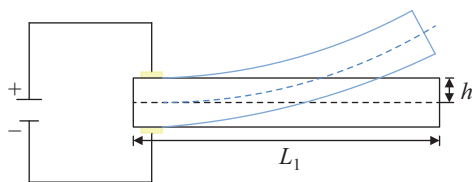
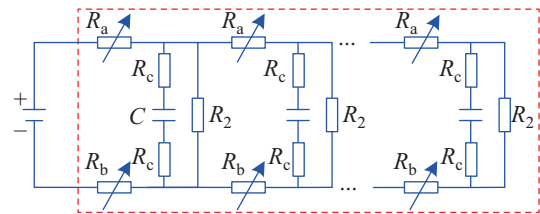


图 7 IPMC 悬臂梁等效模型^[103]

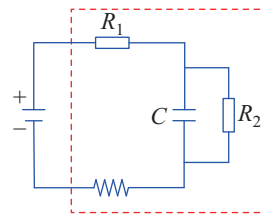
Fig.7 Equivalent model of IPMC cantilever beam

IPMC 的致动过程可以划分成 2 个阶段: (1) 电能转换, 采用非线性等效电路模型将输入电压转换成 IPMC 的电流; (2) 机电转换, 通过机电耦合系数 (压电系数) 将电流响应转换成 IPMC 的机械应变和力输出。因此研究 IPMC 的电学特性对其驱动性能至关重要。但等效电路模型仅仅描述中间过程, 主要用于分析 IPMC 输入电压与电流的关系, 对于机械结构致动过程中应变力的分析缺少直观性。因

此常采用与等效梁模型相结合的方式建立 IPMC 驱动器数学模型。如, Nam 等^[105]提出一种自感知的 IPMC 执行器的精确物理模型, 并将其应用于位置控制。该模型分析了非对称溶液中存在分布表面阻力时聚合物膜内的离子动力学。并在此基础上, 提出了一种改进的电阻-电容 (RC) 等效电路 (图 8(a)), 建立 IPMC 的等效悬臂梁几何模型, 从而根据电压信号随 IPMC 长度的变化准确地获得驱动器弯曲曲率。Wu 等^[106]在驱动器建模过程中考虑柔性梁的特性和 IPMC 的电气特性, 将 IPMC 描述为一个电阻-电感-电容 (RLC) 等效电路, 建立输入电压与电流的关系, 如图 8(b) 所示。然后结合等效悬臂梁模型建立电气特性与力学特性的关系, 并通过模型设计了线性高斯控制策略, 实现对 IPMC 驱动器的力控制。但值得注意的是, 不同的等效电路会使得建立的数学模型相差很多, 因此等效电路模型的方法通用性不高。



(a) RC 等效电路



(b) RLC 等效电路

图 8 IPMC 等效电路图

Fig.8 IPMC equivalent circuit diagram

DE 是一种电场型 EAP 材料, 在外加电场下可以产生大变形, 具有高弹性能量密度、高机电转化率、超短反应时间、轻质量和极佳柔性等特点, 也是软体机器人领域应用最为广泛的驱动器材料之一。如何建立精确的 DE 材料驱动控制模型也是研究人员广泛关注的热点之一。Cao 等^[107]采用数据驱动的方式建立了一种仿尺蠖的爬行机器人动力学模型。该方法利用激光传感器测量 DE 长度变化获得实验数据, 通过实验数据确立模型参数, 将机器人构建成一个 2 阶阻尼系统。虽然该黑箱模型与被控对象之间存在一定的不匹配, 但该模型对不同类型的电压信号均表现出良好的性能, 并在不同材料表面和斜坡表面进行爬行运动实验, 验证了该模型

控制方案具有良好的跟踪性能和鲁棒性。

上述模型与被控现象间的不匹配问题大都归结于 DE 自身的非线性迟滞特性和蠕变特性, 因此现在最常用的方法除了引入迟滞算子和蠕变算子以建立 DE 材料的迟滞模型和蠕变模型之外, 还通过构建等效弹簧阻尼系统并结合实验数据来解决 DE 本身的蠕变和迟滞问题, 其实质是一种灰箱模型。如图 9 所示, 谷国迎等^[108]提出的 DE 驱动器模型可分为 2 部分, A 部分用一个非线性弹簧描述电压与位移的平衡状态, B 部分用一组非线性弹簧和线性阻尼器捕获与平衡状态相关的非线性偏差, 即因蠕变和迟滞特性导致的电压与位移不匹配现象。该模型的非线性弹簧和线性阻尼器的数目根据实验数据确定, 实验结果证明了该模型能够准确预测不同模式循环电压作用下介电弹性体驱动器 (DEA) 的机电响应。Pang 等^[109]利用圆柱形 DE 设计了一种爬行机器人, 并构造了该圆柱形 DE 驱动器的等效弹簧阻尼模型, 通过实验结果辨识确定弹簧和阻尼器数量以及相关模型系数, 并进一步通过线性化处理建立了简单的 DE 驱动器动力学模型并以状态空间方程的形式给出。最后, 利用模型建立的控制器实现了对爬行机器人的定位与移动控制。但简单地采用线性化的方式简化驱动器模型使得模型控制精度较低。与 IPMC 等效电路模型相同的是, 构造不同的弹簧阻尼等效模型得到的数学模型也不尽相同, 使得模型通用性降低。

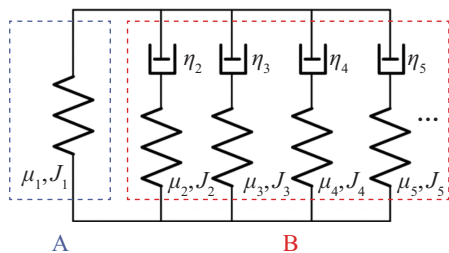


图 9 弹簧阻尼等效模型^[108]

Fig.9 Equivalent model of spring damping

其他 EAP 材料构建数学模型的方式与 IPMC 和 DE 材料一致。其中灰箱模型多采用等效电路和等效悬臂梁等方法。如 Amiri Moghadam 等^[110]基于 RC 等效电路结合悬臂梁模型并利用 Hamilton 原理推导出 EAP 机器人面向控制的动力学模型, 经过拉普拉斯变换得到机器人传递函数, 通过仿真对机器人进行控制验证。Benouhiba 等^[111]基于悬臂梁模型建立了单段 EAP 机器人的工作电压与输出位移之间的数学模型, 并将其扩展到多段机器人, 通过实验验证了该模型对复杂构形机器人的有效性。

Wang 等^[112]推导了一种级联的 RC 等效电路来描述离子凝胶驱动器的电气行为, 并通过梁模型建立了输入电压与弯曲位移之间的关系, 并与实验结果进行对比验证了模型的精度效果。

不同于 EAP 等电致动材料, SMA 是一种特殊的热致动金属材料, 可以在升温后产生变形并随温度下降逐渐恢复其原始形状, 被广泛应用于大变形、大输出力的软体机器人驱动模块制造。现有的 SMA 建模方法多是基于实验数据的黑箱模型和采用热力学方程结合梁弯曲理论建立的灰箱模型。Xiang 等^[113]在建模过程中引入迟滞算子, 提出一种改进的 PI SMA 模型, 该模型用于 SMA 仿生关节控制, 取得了更高的控制精度。Du 等^[114]利用 SMA 弹簧的热平衡方程与梁弯曲理论建立了 SMA 平面弯曲致动器的动力学模型, 并根据实验数据获得模型的必要参数, 通过实验和仿真验证了模型的有效性。同时根据建立的模型准确预测了致动器的弯曲角度, 有效提高了驱动器的控制精度。相较于 EAP 材料, SMA 的建模控制发展历史悠久, 文 [115] 更为详细地表述了 SMA 建模方法, 本文将不再赘述。

1.2 无模型控制

考虑到软体机器人本身的柔顺性与非线性的特性, 其自身重力以及外部扰动对机器人运动以及形态的影响不可忽略, 且难以建立相应的扰动模型, 尤其是在非结构环境下其运动形态更是难以估计, 从而导致基于模型的控制方法难以有效应对、控制系统不稳定^[116]。为此, 软体机器人常采用无模型控制方法进行解决。无模型控制不依赖于先验知识, 而是根据系统输入输出结果, 通过迭代、学习的方式估计机器人系统状态以实现系统的控制, 这为软体机器人的控制提供了更广泛的解决方案。

虽然无模型控制已广泛应用于刚性机器人中, 但对软体机器人控制而言仍然是一个新的研究领域^[117-118]。其中, 雅可比矩阵估计法和机器学习是常用的软体机器人无模型控制方法。如图 10(a) 所示, Yip 等^[119]首次提出一种高鲁棒性、精确、通用的软体机械手无模型控制方法, 该方法首先离线获取雅可比矩阵的初始估计值, 然后随着机器人在工作空间的移动, 不断在线估计机器人雅可比矩阵, 通过优化理论获得最优控制策略。该策略能够控制机器人在受限环境中进行操作, 有效扩展了机械手的可达空间。但该方法没有考虑机器人动力学, 因此仅适用于静态控制。类似的, 文 [120] 采用自适应卡尔曼滤波器来估计机器人的雅可比矩

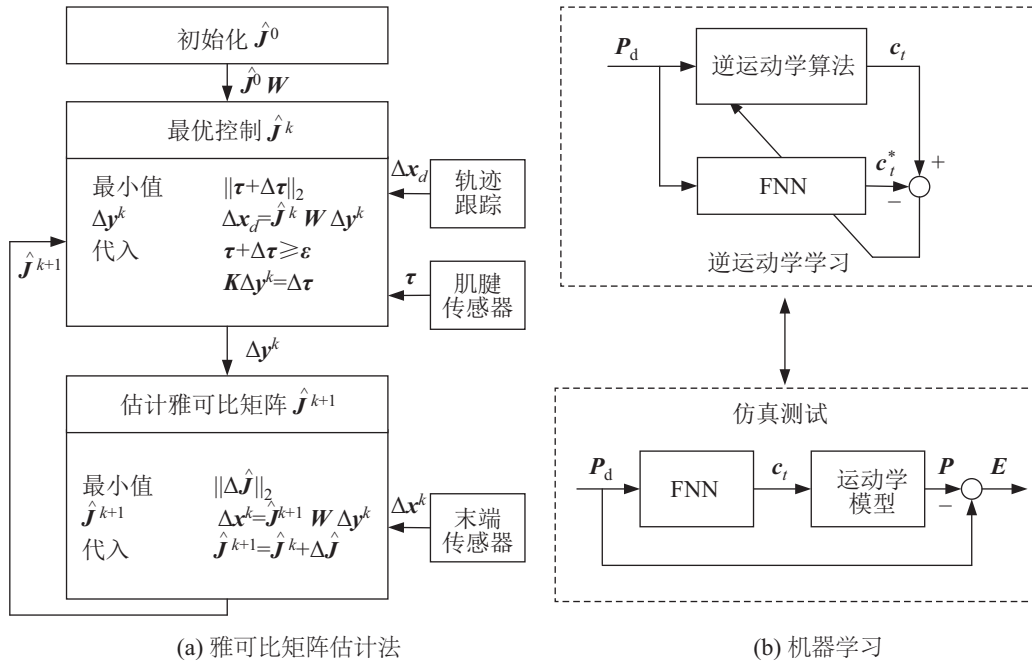


图 10 无模型控制框图

Fig.10 Model-free control block diagram

阵。在滤波器中使用可变协方差矩阵实时捕捉运动过程中雅可比矩阵的变化,从而提高跟踪性能。与对雅可比矩阵进行估计的方法相比,基于机器学习技术的无模型控制策略应用更为广泛。Vikas 等^[121]将控制机器人与环境监护的因素离散化为状态,学习机器人在这些状态之间的转换结果,并评估所需的控制周期状态,优化与运动任务对应的代价函数。该方法无需考虑驱动器空间的摩擦等因素,而直接在机器人任务空间中进行控制优化。

作为机器学习中的“明星”分支,神经网络算法由于其几乎可以拟合任何非线性曲线的特性,而被广泛地应用于软体机器人无模型控制中。其中,神经网络算法^[122-124]和深度强化学习算法^[118,125-126]应用最为广泛。如图 10(b)所示,Giorelli^[122]首次采用神经网络拟合 3 维空间的软驱动器逆运动学模型。经过学习训练后,前馈神经网络能够在无模型情况下建立机械手指尖位置与驱动器出力之间的关系。但该方法没有考虑真实软体机器人的不确定性,仅仅通过仿真实验验证了策略的有效性。

近年来,利用神经网络实现对软体机器人的形态控制也是软体机器人无模型控制的一个方向。Scimeca 等^[124]则使用空间排列的电容触觉传感器阵列来感知触手状连续体软结构,并通过视觉跟踪获得触觉响应与连续体结构 3 维形状之间的关系。根据获得的触手姿势数据训练预测姿势的神经网络,以利用位置估计来重建软连续体的形态。训

练完成之后,该方法能够在无外部传感单元的情况下自动重建环境的可达形态。虽然使用神经网络使得控制过程简单,但存在函数过拟合等问题,需要良好的激活函数机制来保证控制策略的稳定性,且必须进行训练和数据收集,以建立有效的工作流程。因为不同的原型机可能会有不同的输入与输出映射,使得训练每个机器人的过程也不同,且如果机器人受到外部载荷的影响,也会出现同样的问题^[125]。

相比普通神经网络算法,更为智能的强化学习算法可直接从经验中学习最优策略,排除了在状态之间转换时需要基于一个单独的控制策略来选择最佳动作的需求。且使用强化学习技术获得的控制策略对外部干扰也更具鲁棒性。Satheeshbabu 等^[118]提出了一种基于 Q 学习的软机械臂开环位置控制方法。该机械臂由气体驱动,通过单向弯曲和双向扭转变形的组合获得 3 维的工作空间,采用基于经验回放的深度强化学习对没有外部负载的系统进行仿真训练,将学习到的强化学习策略在不同负载下进行评估,验证了控制策略的有效性和鲁棒性,以及系统在目标不可达工作空间下达到最佳位形的能力。虽然深度强化学习在软体机器人无模型控制中有着巨大的潜力,但如何选择合适的激励函数与优化算法仍然是一个值得探讨的问题。与此同时,采用基于模型与无模型的混合控制,也是在软体机器人控制领域中的一个新兴策略,许多研究人员也对

表3 软体机器人开环控制策略与闭环控制策略特性
Tab.3 Characteristics of open-loop and closed-loop control strategies for soft robot

开环控制		闭环控制			
		外置传感器		嵌入式传感器	
		其他传感器反馈	视觉反馈	其他传感器反馈	视觉反馈
优点	结构简单、便于设计	结构设计简单、便于数据采集	信息反馈更直观、可测量范围广	成品传感器：设计简单、传感器模型成熟、反馈精度高；驱动传感一体化传感器：形状适应性强、柔顺性好	信息反馈更直观、可测量范围广
缺点	依赖数学模型精度、控制误差较大	传感数据易受外部干扰、与外部交互时易损坏	视觉标定复杂、外置摄像头应用范围受限	成品传感器：形状适应性差、柔顺变形有限；驱动传感一体化传感器：制造复杂、造价昂贵、可重复性差、传感器建模困难	视觉标定复杂、内置摄像头限制机器人柔顺性
应用范围	适用于简单的运动控制以及控制精度需求不高的软体机器人			适用于对精度要求高的软体机器人	

其进行了深入的研究和探讨，如文 [127-129] 等。

2 开环控制与闭环控制 (Open-loop control and closed-loop control)

机器人控制中“反馈”是一个重要环节，它是指将检测到的系统输出值返回到系统的输入端并以某种方式改变系统的输入，进而达到影响系统进程的功能。本节根据软体机器人控制中是否采用反馈环节将其分为开环控制与闭环控制两部分并进行对比分析。2种控制策略特性如表3所示。

2.1 开环控制

通常情况下，软体机器人的控制问题就是找到合适的输入序列，通过控制压力、流体体积、电压、温度等使得软体机器人达到期望的形态、速度和位置 [130]。在软体机器人的开环控制中，没有任何反馈数据参与到控制器的决策中。所有需要的控制量以及控制命令均事先确定好，将预定程序烧录到控制器中严格执行，并不关注软体机器人最终的执行情况，开环控制原理图如图11所示。

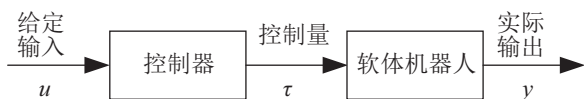
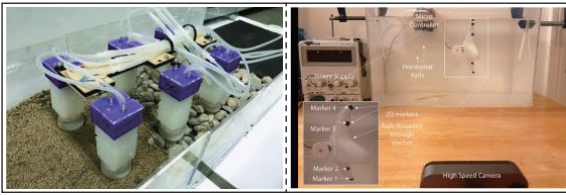


图11 软体机器人开环控制框图

Fig.11 Open loop control block diagram of soft robot

开环控制的控制量可以通过反复试验或者使用建立的软体机器人数学模型预测得到，也可以通过人工经验的方式手动添加。Li等 [131] 通过建立的虚拟刚体模型获得DE驱动器输入电压与弯曲变形之间的关系，并得到合适的控制输入，使得该机器人

原型通过开发的多重高压控制系统产生3个顺序开环控制信号，实现了在平坦地面上连续稳定的滚动运动。Bern等 [132] 从实际试验和有限元仿真中获得实验数据，并训练神经网络预测软体机器人的数学模型。通过神经网络的输出确定合适的控制量，然后基于梯度优化找到最优的开环控制输入，实现软体机器人的位置跟踪控制。由于开环控制器结构简单、便于设计，因此被广泛应用于软体机器人的控制中。但由于开环控制没有反馈，因此对于是否达到预期形态以及何时到达预期目标并不清楚，尤其是在非结构受限环境下，未知扰动以及未知环境交互引起的不可估计变形，使得开环控制难以达到理想的动作效果，甚至造成控制系统不稳定。虽然也有研究人员应用开环控制实现了复杂环境下的控制动作，如图12(a)所示，Liu等 [133] 研制了一种六足软体机器人SoRX，通过有限元分析预测机器人性能和运动形态以获得增压和减压顺序，确定适宜的控制序列，使其能够在具有挑战性的地形上实现开环控制，并通过跑步、台阶攀爬、穿越崎岖地形、陡峭地形和不稳定地形5个实验验证了开环控制的有效性。Du等 [134] 利用可微分模拟器获得水下软体机器人的动力学模型，并通过优化与实际实验的误差梯度，建立软体机器人姿态与开环控制之间的关系，实现了软体机器人在水动力作用下的开环控制，如图12(b)所示。但是，以上情况均是在实验室环境下完成，通过反复试验来获得较为精准的开环控制器，并没有考虑实际环境中的未知扰动情况。因此，开环控制并不适宜未知环境下的交互工作或需高精度控制的场所。



(a) SoRX 六足软体机器人 (b) 水下软体机器人

图 12 复杂环境下开环控制的软体机器人

Fig.12 Soft robot with open loop control in complex environment

2.2 闭环控制

相比开环控制, 软体机器人闭环控制可以通过传感器反馈实时调节期望输出与实际输出之间的误差, 使得软体机器人更能精确地达到预期形态或位置。另一方面, 反馈环节的存在也使得控制过程中对机器人模型的精度要求降低, 其控制原理如图 13 所示。

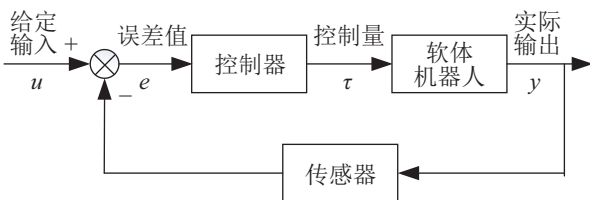


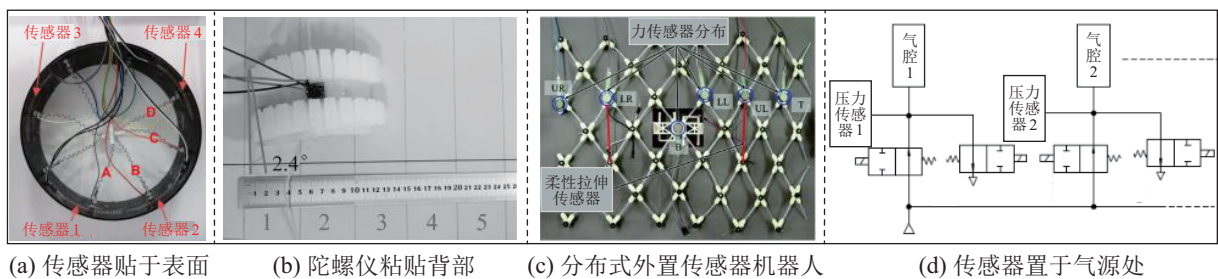
图 13 软体机器人闭环控制框图

Fig.13 Closed-loop control block diagram of soft robot

由于软体机器人固有的柔顺性以及大变形、高非线性的特点, 不同的传感器布局方式会对软体机器人信号采集精度、形态变化等产生较大影响, 从而影响软体机器人的闭环控制精度。因此, 根据传感器放置方式的不同将软体机器人闭环控制分为外置传感器反馈和嵌入式传感器反馈两大类^[135], 并分别阐述其在软体机器人控制中的应用。外置传感器反馈是指将传感器通过粘贴、镶嵌等方式置于软体机器人外表面以实时反馈软体机器人的形态和位置信号。如图 14(a) 所示, Fei 等^[136] 将 4 个曲率传感器贴在由 SMA 驱动的机器人薄壳表面, 曲率传感器的电阻随曲率的增大而减小, 从而根据电阻变

化得到机器人的变形信息, 实现 SMA 的加热时间的闭环控制, 控制机器人的滚转和前向运动。Pang 等^[137] 将三轴电子罗盘传感器嵌入至尺蠖机器人背部, 如图 14(b) 所示, 根据传感器反馈的信息控制电磁阀充放气以实现机器人沿着预定估计路线行走和转动。Kandhari 等^[138] 采用分布式的传感器布置方法将传感器嵌入在软体机器人不同位置实现软体机器人的闭环移动控制, 如图 14(c) 所示。除此之外将传感器置于气源附近, 直接通过压力反馈的方式控制软体机器人也是一种传感器外置方法, 如图 14(d) 所示。Lu 等^[139] 将压力传感器置于电磁换向阀与软体机器人气腔中间连接处, 通过反馈气腔内部压力的数据控制微型泵, 实现软体机器人气腔的加压、保压、泄压等压力需求。但这种放置在压力源附近而非软体机器人本体的传感器放置反馈方式本质是一种半闭环控制, 气压与实际软体机器人变形之间的关系仍没通过反馈解决。以上采用传感器外置的方式虽然方法简单, 易于数据采集, 但简单的外置方法使得外部干扰对传感器数据的影响也随之扩大, 尤其是在复杂非结构环境下, 外置传感器往往不能够保证准确的数据反馈。

嵌入式传感反馈通常是在软体机器人制造过程中将传感器嵌入到机器人内部与软体机器人形成一个整体。如图 15(a) 所示, 谷国迎等^[35] 将制作的水凝胶—弹性体混合结构的柔性压力传感器嵌入至各软体手指, 并集成电触觉系统, 研制了一款操作感知一体化的软体神经假肢手。该假肢手具备触觉、压力等外部信息的感知功能, 可实现假肢手与神经系统的双向闭环控制, 使得截肢受试者可以恢复分级触觉感知能力, 实现对不同尺寸抓握对象的识别与分辨。Li 等^[140] 在软体气动抓手指尖部嵌入了力传感器和接近传感器用以反馈抓取力与抓取位置信息, 如图 15(b) 所示。接近传感器使其在抓取物体时定位更准确, 力传感器保证其在抓取过程中力度大小适宜, 避免因力度过大而破坏抓取物, 实现“抓得准、夹得稳”的抓取理念。但采用的传感器



(a) 传感器贴于表面 (b) 陀螺仪粘贴背部 (c) 分布式外置传感器机器人 (d) 传感器置于气源处

图 14 传感器外置反馈的软体机器人

Fig.14 Soft robot with external sensors

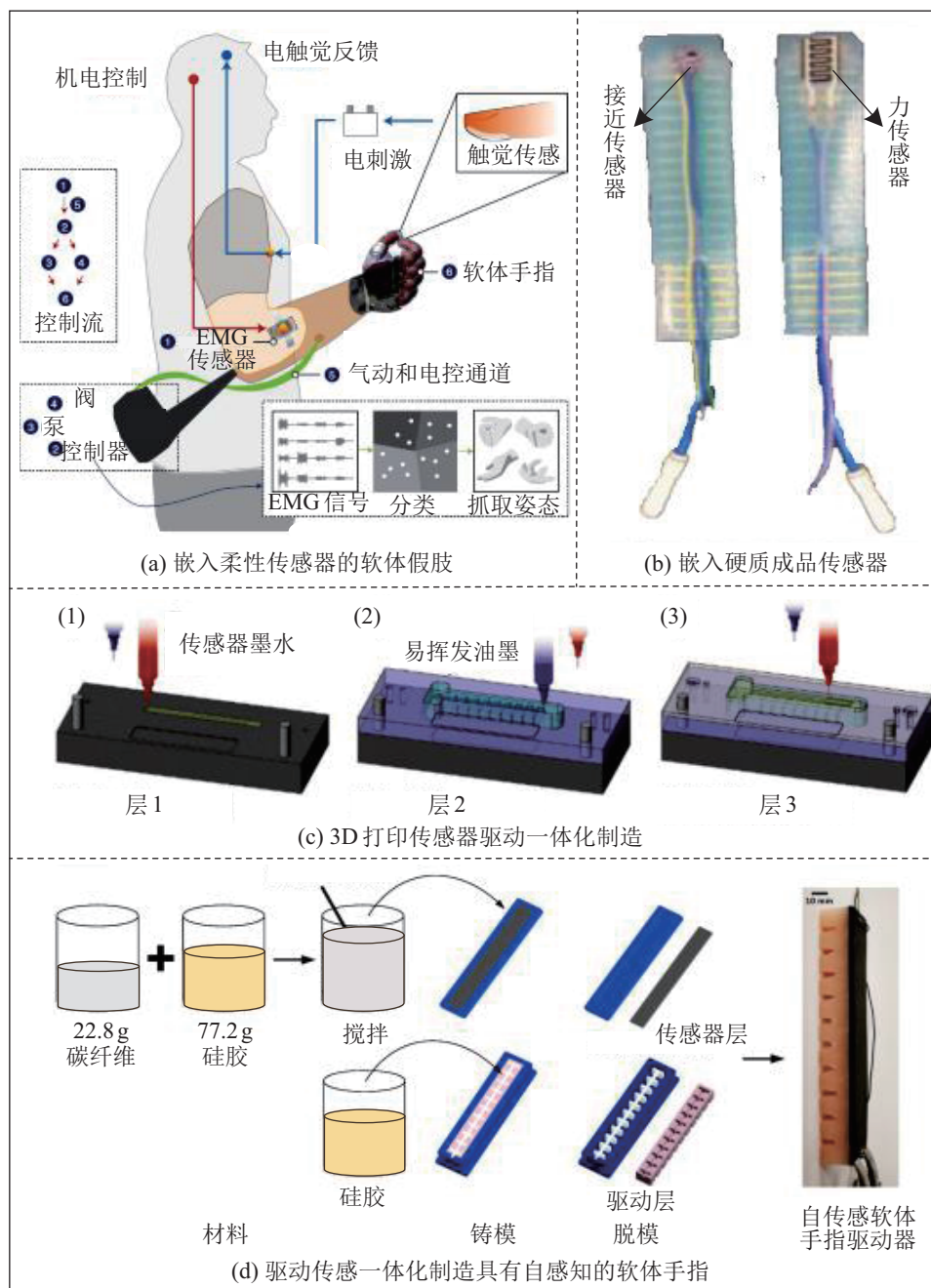


图 15 嵌入式传感器反馈的软体机器人

Fig.15 Soft robot with embedded sensors feedback

不可伸缩、变形，因此对软体结构的适应性较差、易于损坏。这种直接将成品传感器在制造过程中嵌入到软体机器人中的方法简便，且成品传感器建模成熟、精度高，但嵌入的传感器必须承受非常大的变形而不改变执行器的柔顺性，且能够适应不同软体机器人的形状，这使得成品传感器在软体机器人反馈应用中受到诸多限制。近年来，在机器人闭环控制中将柔性传感器与软体机器人进行一体化制作受到越来越广泛的关注。如图 15(c) 所示，Truby 等^[141]采用 3D 打印技术将离子凝胶传感器与软体

抓手进行一体化制造，该传感器能够响应每个自由度的本体感受和触觉感知，通过自由位移和阻塞位移实验建立手指的感觉反馈关系，实现软体抓手的闭环抓取控制。Pan 等^[142]采用柔性碳纤维压阻复合材料制作软体手指限制层，如图 15(d) 所示，利用材料固有的传感功能实现软体手指的闭环位置控制。这种驱动传感一体化的设计使得传感器的形状易于适应各种各样的软体机器人结构，而且可以有效地减少或消除由外部黏附传感器或成品嵌入式传感器引起的不良干扰，使控制器更加稳定。但其制

造过程复杂、造价昂贵, 严重影响了传感器的可重复性, 且如何建立反馈数据之间的精确关系也存在困难。

除此之外, 使用视觉反馈实现软体机器人位置与形态控制也是软体机器人广泛采用的闭环控制方式。通过对图像的处理使得软体机器人对自身形态、位置以及周围环境有更为直观的感知。Zhang 等^[143]利用 4 台摄像机观测软体机器人标记点的状态(图 16(a)), 根据反馈信息对软体机器人位置进行二次修正, 并提出了一种通过切换控制方法来解决软体机器人图像特征丢失问题。Gong 等^[144]通过摄像机获取软体机器臂在水下环境中的位姿信息, 利用视觉反馈将当前机械臂的位置与模型数据的误差反馈给控制器以实现水下软体机械臂的目标跟踪与定位抓取。众所周知, 软体机器人视觉控制的跟踪性能与投影模型的精度密切相关, 摄像机标定工作是获得精确的摄像机投影模型的关键, 然而这是一项耗费人力且繁琐的工作, 尤其是非结构化环境使得离线的摄像机标定和校准变得更为困难^[145]。

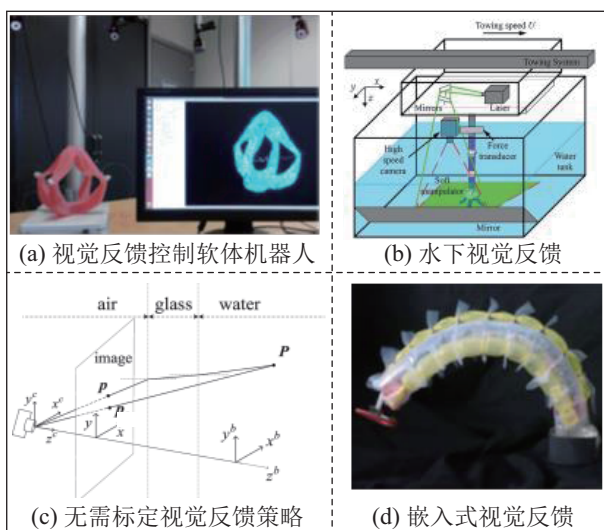


图 16 视觉反馈软体机器人

Fig.16 Soft robot based on visual feedback

针对非标定问题, 学者们大都采用在线估计来更新未知的相机参数, 并利用适当的算法实现运动视觉伺服控制^[146-147]。如 Wang^[147]首次尝试了软体机器人在水下环境下的无标定视觉跟踪控制, 提出了一种自适应的控制算法, 可以在线校正光线通过不同介质时而引起的图像畸变, 以补偿折射效应(图 16(c))。该自适应算法可以同时估计未知摄像机参数, 避免了复杂的离线水下摄像机标定。视觉反馈虽然给软体机器人控制带来了便利, 但外置摄像头使得其在狭窄、遮挡、光线昏暗等环境下的使用

受到诸多限制, 也有研究人员将摄像头嵌入至软体机器人内部, 也有研究人员将摄像头嵌入至软体机器人内部, 如图 16(d) 所示^[148], 但摄像头的不可拉伸性又与软体机器人的柔顺性产生了冲突。尽管如此, 视觉对软体机器人形态、位置以及外部环境有着最直观的反馈, 视觉伺服控制在软体机器人的环境交互控制中发挥着不可替代的作用, 是软体机器人实现智能交互控制的发展方向之一。

3 经典控制与智能控制 (Classical control and intelligent control)

控制算法是机器人控制技术的核心之一, 通过特定的数学关系表达产生决策信号以控制机器人达到所需目标。采用不同的控制算法, 可以实现不同的控制作用, 得到不同的控制性能。与建模技术相似, 由于软体机器人的超高冗余、大变形以及非线性特性, 现有的软体机器人控制算法仍然是沿用传统的刚性机器人算法, 或在其基础上根据软体机器人特性进行改进。因此本文根据传统机器人控制算法分类, 将现有的软体机器人控制算法分为经典控制与智能控制 2 类并分别介绍其研究现状。2 种控制策略特性如表 4 所示。

3.1 经典控制

现阶段软体机器人广泛采用的经典控制算法有 PID 控制^[149-151]、自适应控制^[152-153]、滑模控制^[154-156]、扰动补偿控制^[157-159]等。其中, PID 控制仅利用期望值与实际值的偏差调节系统变化, 使机器人达到控制目标(图 17), 具有原理简单、易于实现、适用面广、控制参数相互独立、参数调整方便等优点, 是现有软体机器人中应用最广的控制算法。如, Lindenroth 等^[149]将 PID 控制应用于一种基于流体弹性体驱动器的并联机器人力控制中, 并结合力传感器使得软体机器人在静态触点下的力控制稳态精度达到 0.47 ± 0.24 N。Copaci 等^[150]通过串联线性补偿器设计了一种双线性 PID 控制器用于 SMA 驱动的拟人颈部软体机器人位置控制, 该控制器能够控制机器人实现倾斜以及定向运动, 其中其倾斜位置误差最大为 2° 。而在针对 IPMC 驱动器的位置控制和力控制中, PID 控制也取得了良好的表现。Gonzalez 等^[151]利用 PID 控制器成功实现了 IPMC 驱动的拟人手指的位置控制, 能够在 0.25 mm 的位移范围内实现零稳态误差。虽然 PID 控制被广泛应用于不同结构以及不同驱动类型的软体机器人控制中, 并取得了优异的表现, 但其实质仍是一种线性控制器, 对于软体机器人这种高非线性

表4 软体机器人经典控制与智能控制策略特性
Tab.4 Characteristics of classical and intelligent control strategies for soft robot

	经典控制				智能控制	
	PID控制	自适应控制	滑模控制	扰动补偿控制	数据驱动控制	仿生控制
优点	结构简单、易于实现、适用广泛	构造简单、鲁棒性强、系统模型精度需求低	响应速度快、易于实现、鲁棒性强	主动抑制扰动、便于构造、鲁棒性强	不依赖模型、容错性强、未知扰动抑制能力强	贴近生物原理、控制柔顺性好
缺点	本质为线性控制器，其非线性控制精度低	参数估计困难、实时性差导致控制精度有限	易出现震颤现象、参数估计实时性差	传统扰动观测器依赖模型精度、扩张状态观测器则对高阶系统的参数调节困难	计算量大、在线训练控制困难	深度仿生困难
应用范围	结构化环境下、控制精度需求较低的软体机器人				非结构化环境下或控制精度需求高的软体机器人	

性、复杂多变的机器人系统往往难以达到满意的实际应用控制精度。

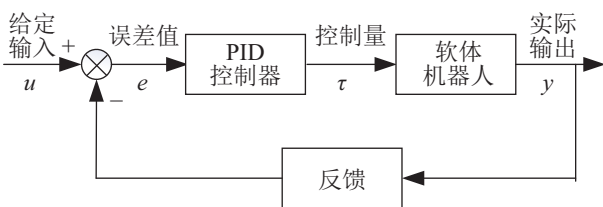


图17 PID控制框图

Fig.17 The PID control block diagram

针对软体机器人难以得到精确的系统模型，且存在迟滞、时变以及外界扰动等问题，研究人员引入了更为先进的自适应控制算法以提高控制的灵活性与鲁棒性、降低系统对模型的精度要求、减少建模工作量。如，Azizkhani等^[152]针对软体机械臂的动态控制，提出了一种被动自适应控制策略，以快速、平稳的方式补偿机械臂动态控制中的不确定扰动，使得机械臂在高速运转下更为稳定，并证明了控制系统的稳定性。最后，在不同的操作场景中进行了测试，并与PD控制器比较以证明自适应被动控制的卓越性能。Xu等^[153]则利用自适应视觉伺服控制算法实现了软体机械臂在水下环境的运动控制。此外，滑模控制算法由于其响应速度快、易于实现且能够克服系统的不确定性，对干扰和未建模状态具有很强的鲁棒性，对非线性系统具有良好的控制效果^[154]，而广泛应用于各类软体机器人控制。例如，Cao等^[155]针对气动康复抓手建模过程中的不确定性，提出了一种自适应滑模控制器，使得软体抓手的跟踪误差在有限的时间内收敛为零，并利用李雅普诺夫定理验证了系统的稳定性。通过仿真实验对比验证了控制算法的精度。Cortez-Vega

等^[156]则设计了一种1阶滑模控制器来控制SMA驱动的多关节内窥镜机械臂以解决其在外部扰动和内部不确定性下的轨迹跟踪问题，并在视觉反馈配合下其跟踪误差仅为0.17 cm。同样的，针对IPMC驱动器的迟滞、蠕变特性，以及水下环境的不确定性，Khawwaf等^[160]提出了一种基于积分的非线性超平面滑模控制器来控制水下IPMC驱动器，该算法将IPMC的滞后和蠕变项作为扰动或不确定性处理，在不连续部分融合了自适应算法，以克服模型不确定性和外部干扰，并比较了水下IPMC驱动器在该算法与传统算法下的轨迹跟踪性能与误差收敛结果。虽然滑模控制算法能够有效克服软体机器人运动过程中的不确定性，但控制状态轨迹到达滑动模态面后难以严格沿着滑动模态面向平衡点滑动，从而产生抖振现象，这极大限制了软体机器人在实际工作中的应用。

为了进一步提升软体机器人的控制性能，降低其本身不确定性对控制系统的影响，一些学者引入扰动观测器(DOB)对软体机器人的不确定性进行观测估计，并根据估计值结合其他控制算法进行前馈补偿。如，Cao等^[107]基于数据驱动建立DE软体爬行机器人模型，并在控制器中引入扰动观测器补偿系统的未知变量以及与环境交互带来的模型不确定性，融合PI控制进行实验，该策略在不同材料和斜坡的表面上展示出良好的跟踪性能和鲁棒性。但传统扰动观测器的本质是将外部干扰及模型参数变化造成的实际模型与理想模型输出的差异等效为扰动变量，在控制中引入等量的补偿，实现对扰动的完全抑制，其扰动补偿的精度很大程度上取决于机器人建立的数学模型精度，因此对软体机器人这种难以建立模型的复杂系统，其控制效果

并不理想。扩张状态观测器 (ESO) 是另外一种常用的扰动观测器, 其核心本质是将系统模型未知状态以及外界扰动扩张成一个系统状态, 并作为总扰动进行估计。Zhao 等^[157] 利用扩张状态观测器估计气动人工肌肉机构的非线性总扰动, 并融合自适应控制算法提高运动机构的响应速度和控制精度。Yuan 等^[158] 针对气动人工肌肉系统提出了一种非线性自抗扰控制策略, 采用扩张状态观测器估计包括系统不确定动态和外界干扰在内的总扰动并进行补偿, 实现了快速准确的定位跟踪控制。相较于传统的扰动补偿控制, 扩张状态观测器不依赖系统模型精度、结构简单、易于构造, 且仅需要根据系统的输入与输出信号就能实现系统不确定扰动估计与补偿。但对于高阶系统, 其参数整定较为困难。尽管经典的控制策略, 如自适应控制、滑模控制、扰动补偿控制等能够补偿软体机器人系统参数的不确定性, 但相应的系统模型必须事先确定, 并且控制器参数的自适应能力较低, 尤其是其使用的未知项有限, 面对复杂程度更高、运行精度需求更高的软体机器人, 传统的经典控制策略则难以应对。

3.2 智能控制

随着软体机器人应用范围的扩展, 为了更好地满足软体机器人日益增长的精度需求, 适应更为复杂的应用环境, 研究人员提出了一系列针对软体机器人的智能控制方法, 如数据驱动控制^[159,161-163]、仿生控制^[164-165] 等。作为数据驱动控制的代表, 神经网络控制不仅可以通过拟合系统状态实现无模型控制, 也可利用受控系统的在线或离线输入输出数据直接设计系统控制器, 或作为优化参数以提升经典控制策略的性能 (见图 18), 是软体机器人最广泛采用的智能控制策略。如, Piqué 等^[159] 针对软体机器人的动力学控制, 设计了一种基于连续学习的神经网络控制器, 通过持续更新神经网络控制器的参数使得控制器不断适应软体机器人由材料或非结构环境的外部扰动导致的动力学变化。Robinson

等^[161] 基于滑模控制和神经网络算法设计了一种软体机械臂的控制策略, 利用神经网络处理未知扰动并对滑模控制器参数进行实时更新以更好地应对软体机械臂运动中的非线性以及未知扰动问题, 并与滑模控制器以及 PID 控制器进行对比, 验证了所提算法的优势。其他的一些基于数据驱动的控制策略如结合 Koopman 理论^[162]、扰动观测器^[163] 等也是软体机器人常用的智能控制策略, 并取得了良好的表现。除此之外, 采用受生物启发的控制策略实现软体机器人控制也是现今广泛采用的软体机器人智能控制策略之一。如, Zhu 等^[164] 提出一种基于中枢模式发生器 (CPG) 的软体吞咽机器人控制策略, 通过 CPG 控制流入充气室的空气压力, 使得机器人产生规律的食管蠕动波, 实现吞咽功能。Chen 等^[165] 则利用 CPG 策略实现了一种软体机器鳗鱼的水下游动控制等。相比经典控制, 智能控制拥有更高容错性、非线性处理能力, 更加满足非结构化环境下的复杂应用需求。

4 问题与挑战 (Problems and challenges)

虽然经过几十年的发展, 研制了各种形态及功能的软体机器人, 但是软体机器人技术仍处于起步阶段, 如何精确地控制软体机器人实现预期目标仍然充满挑战。

4.1 关于建模

软体机器人拥有独特的柔顺性、理论上具有无限自由度的特点, 尚未形成统一的适用于软体机器人的建模理论。现阶段由流体弹性体驱动的软体机器人建模仍然是在传统刚性机器人建模理论基础上建立近似的软体机器人模型。虽然分段常曲率建模是建立在恒定曲率假设的基础之上, 但由于其方法简单、计算方便, 仍然是软体机器人广泛使用的建模方法。针对动力学控制问题, 拉格朗日方法、牛顿-欧拉方法以及基于梁理论的力学建模方式虽然也在软体机器人建模控制中发挥着重要作用, 但

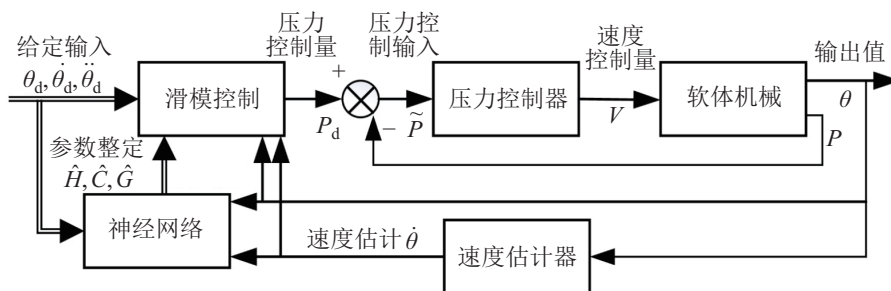


图 18 自适应神经网络控制框图

Fig.18 The control block diagram of the adaptive neural network

复杂的运动学与动力学耦合关系使得建模方法更为复杂、困难。有限元建模虽然能够准确地描述其非线性变化关系,但高昂的计算成本使其难以直接应用到实际的控制任务中。

针对智能材料的驱动器建模控制,基于数据处理的黑箱模型和结合实验数据以及等效模型的灰箱模型是最为常用的智能材料驱动器建模方式。黑箱模型不需要分析智能材料内部机理,只依赖实验数据,因此建模简单、易于理解,灰箱模型结合内部机理与实验数据,通过等效模型的方式构造软体机器人驱动模型,其建模精度更高。总而言之,2种建模方式通用性不高,只能针对具体问题具体分析,且黑箱模型的数据收集与处理以及灰箱模型的等效模型构造也是一个复杂的不确定问题。无论是基于传统刚性建模理论,或基于数据拟合,亦或是结合等效模型等方式建立的软体机器人数学模型,都不能精确表示其真实的数学模型。尤其是在非结构化环境下,现有的理论很难描述机器人与外部交互而导致的形态变化,基于模型的控制难以达到满意的控制效果且会产生不稳定现象。因此建立统一有效的软体机器人模型理论是亟待解决的问题。

相对而言,无模型控制是软体机器人控制领域的一个新方向,无模型控制无需定义软体机器人关节空间与位形空间的具体参数,只需根据采集到的样本数据通过学习和迭代的方式建立任意复杂的模型,为开发软体机器人控制器提供了一个相对简单的方法。无模型控制方法在高度非线性、受重力影响以及几乎不可能建模的非结构环境中具有巨大的优势^[13]。但过拟合和收敛问题以及训练时间和计算成本等原因限制了无模型控制的实际应用。总之,基于模型的控制更适合已知环境下的软体机器人控制,无模型控制更适用于非结构、未知扰动下的软体机器人控制,如何充分发挥模型控制与无模型控制的优点,融合材料、机械、数学、计算机等各学科优势的协同建模方法仍然有待进一步探索。

4.2 关于反馈

对于软体机器人系统而言,精确的运动控制仍然是一项极具挑战性的任务^[166]。开环控制结构简单、便于设计,系统既不需要对输出量进行测量,也不需要将它反馈到输入端与给定输入量进行比较。但由于其控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系,因此并不清楚软体机器人是否达到期望的位置与形态。虽然开环控制量可以通过精确的建模获得,但软体机器人本身的建模就是一项极具挑战的工作。尤其是在非结构化受限环境

下,开环控制更是难以达到理想的控制效果。因此开环控制常用于实验室环境下对原型机的验证控制,以及精度要求不高的应用场所。

相比之下,闭环控制与被控对象之间既有顺向作用,又有反向联系,它将被控对象输出量送回到输入端,与给定输入量比较,产生偏差信号,将偏差信号作用于控制器上,使系统的输出量趋向其期望值。软体机器人的反馈主要采用外置式传感器反馈和嵌入式传感器反馈2种方式,外置传感器虽然便于数据采集,但外部的干扰对数据的影响无法估计和避免,在非结构化环境下与外部环境交互时易被破坏。嵌入式的成品传感器需要承受大变形而不破坏传感器功能,对其柔顺性提出了更高的要求,且其形状固定,在软体机器人的使用中受到诸多限制。驱动传感一体化设计为实现软体机器人闭环控制提供了新的方向,但是采用不同的制造方法和材料,最后得到的反馈信息是不同的,因此如何建立统一的制造方法以及准确的反馈信息模型是一个值得思考的问题。对于视觉反馈,视觉标定的复杂性使得软体机器人前期工作开展困难、工作量繁重,虽然也有学者提出了无标定的解决办法,但对于无标定的算法仍需要进一步研究。总之,采用反馈的软体机器人闭环控制更适合应用于实际的工作环境,但如何将视觉以及其他传感器结合进行多传感信息融合反馈,为软体机器人控制提供更为精确的控制信息仍有待进一步讨论。

4.3 关于控制算法

控制算法是软体机器人控制技术的核心,其性能优劣直接决定了机器人运行性能的好坏。经典的PID控制算法虽然被广泛应用于软体机器人控制中,在基本的样机测试与简单的应用测试中发挥了重要作用,但其线性控制器的本质极大地限制了软体机器人在更高精度需求下的应用。针对软体机器人高非线性、迟滞且模型难以精确表达等问题,研究人员引入了自适应控制、滑模控制以及扰动补偿控制等一系列经典控制算法以降低对系统模型的精度要求,同时能够补偿未建模和不确定动态,抑制外界未知扰动,提高控制精度和鲁棒性,使得软体机器人的应用得到进一步提升,但相应的其控制器参数难以针对系统变化进行更新,且能够应对的未知信息有限,难以满足软体机器人在更高精度需求环境下的应用。

与此相比,基于数据驱动的智能控制策略,尤其是神经网络控制,其控制器的设计不依赖受控系统的模型信息,仅利用系统的输入输出,并且在

一定的假设下,控制器使系统具有收敛性、稳定性以及鲁棒性,且能够及时根据系统变化调整控制参数,更加适用于软体机器人控制。但其计算量大,使得在有限的硬件基础上采用在线实时控制存在很大挑战。仿生智能控制为软体机器人的控制带了新的思路,但更高层次的仿生控制技术仍有待进一步探索。总的来说,经典的控制策略更适用于运行环境明确、参数变化较少且控制精度需求不高的软体机器人应用控制,而智能控制策略则更适用于控制精度需求高、系统复杂多变尤其是非结构化环境下的软体机器人控制。

5 总结与展望 (Summary and prospects)

软体机器人采用软材料以及软驱动器制作而成,理论上具有无限自由度,相比于刚性机器人,其柔顺性更好、环境适应性更强、人机交互更为友好,在医疗康复、工业分拣以及勘探救援领域有着广泛的应用。经过几十年的发展,软体机器人的应用范围不断扩大,但总的来讲,软体机器人仍处于起步阶段,面临着诸多挑战。本文从是否基于模型、是否基于反馈以及采用何种控制算法3个角度,分别从基于模型的控制、无模型控制、开环控制、闭环控制、经典控制和智能控制6个方面叙述了软体机器人的控制技术研究发展现状,最后总结分析了软体机器人控制技术存在的问题与挑战。结合以上综述与问题,对未来软体机器人控制的研究方向提出以下几点展望:

(1) 结合模型控制与无模型控制,充分融合材料、机械、数学、计算机各学科优势进行协同建模研究,使未来的软体机器人既能够实现已知环境下的控制,也能保证未知非结构化环境下的控制精度,继而弥补模型理论缺陷、解决无模型训练拟合问题。

(2) 通过驱动传感一体化设计,并结合视觉传感器采用多传感信息融合反馈,实现软体机器人闭环控制。驱动传感一体化不仅能够有效反馈数据信息,而且能够适应不同的机器人形状,是未来软体机器人实现闭环控制的关键。

(3) 基于数据驱动,探究如何基于小样本数据训练实现软体机器人在线控制,并融合仿生控制进一步提升软体控制过程的柔顺性,以增强软体机器人智能化水平是未来软体机器人控制策略的一个发展方向。

总之,软体机器人涉及材料、机械、电气、控制等多学科,解决软体机器人的控制问题也不能采

用单一的控制模式。随着柔性电子技术、一体化集成工艺、微型电路系统的发展,驱-感-控一体化的软体机器人将成为未来的主要发展方向。该类机器人可通过自身感知功能感受外界环境的变化并通过智能控制系统改变机器人构形及驱动方式,实现软体机器人多功能、多领域的广泛应用。

参考文献 (References)

- [1] PEDERSEN M R, NALPANTIDIS L, ANDERSEN R S, et al. Robot skills for manufacturing: From concept to industrial deployment[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, 37: 282-291.
- [2] HAWLEY L, SULEIMAN W. Control framework for cooperative object transportation by two humanoid robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2019, 115: 1-16.
- [3] ZHONG J, ZHU Y, ZHAO C, et al. Position tracking of a pneumatic-muscle-driven rehabilitation robot by a single neuron tuned PID controller[J]. *Complexity*, 2020. DOI: 10.1155/2020/1438391.
- [4] SHIN B, HA J, LEE M, et al. Hygrobot: A self-locomotive ratcheted actuator powered by environmental humidity[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(14). DOI: 10.1126/scirobotics.aar2629.
- [5] 尹顺禹, 许艺, 岑诺, 等. 软体智能机器人的系统设计与力学建模[J]. *力学进展*, 2020, 50(1): 195-220.
- [6] YIN S Y, XU Y, CEN N, et al. System design and mechanical modeling of soft smart robots[J]. *Advances in Mechanics*, 2020, 50(1): 195-220.
- [7] GAO Z, ZHANG D, HU X L, et al. Design, analysis, and stiffness optimization of a three degree of freedom parallel manipulator[J]. *Robotica*, 2010, 28(3): 349-357.
- [8] CHAUDHURY A N, GHOSAL A. Optimum design of multi-degree-of-freedom closed-loop mechanisms and parallel manipulators for a prescribed workspace using Monte Carlo method[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, 118: 115-138.
- [9] CRESPI A, IJSPEERT A J. AmphiBot II: An amphibious snake robot that crawls and swims using a central pattern generator[C]//9th International Conference on Climbing and Walking Robots. Brussels, Belgium: EPFL, 2006: 19-27.
- [10] HIROSE S, YAMADA H. Snake-like robots: Machine design of biologically inspired robots[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2009, 16(1): 88-98.
- [11] LEE C, KIM M, KIM Y J, et al. Soft robot review[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2017, 15: 3-15.
- [12] GU G Y, ZHU J, ZHU L M, et al. A survey on dielectric elastomer actuators for soft robots[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2017, 12(1). DOI: 10.1088/1748-3190/12/1/011003.
- [13] LASCHI C, MAZZOLAI B, CIANCHETTI M. Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities[J]. *Science Robotics*, 2016, 1(1). DOI: 10.1126/scirobotics.aah3690.
- [14] THURUTHEL T G, ANSARI Y, FALOTICO E, et al. Control strategies for soft robotic manipulators: A survey[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(2): 149-163.
- [15] NICKEL V L, PERRY J, GARRETT A L. Development of useful function in the severely paralyzed hand[J]. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 1963, 45(5): 933-952.

- [15] WEHNER M, TRUBY R L, FITZGERALD D J, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots[J]. *Nature*, 2016, 536: 451-455.
- [16] RAFSANJANI A, ZHANG Y R, LIU B Y, et al. Kirigami skins make a simple soft actuator crawl[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(15). DOI: 10.1126/scirobotics.aar7555.
- [17] LI G R, CHEN X P, ZHOU F H, et al. Self-powered soft robot in the Mariana Trench[J]. *Nature*, 2021, 591: 66-71.
- [18] LIU Y G, YANG Y, PENG Y, et al. A light soft manipulator with continuously controllable stiffness actuated by a thin McKibben pneumatic artificial muscle[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(4): 1944-1952.
- [19] TIAN Y A, WANG K, YI J, et al. Introduction to modeling of the McKibben pneumatic artificial muscle with end constraints [C]//*IEEE International Conference on Information and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2016: 1624-1629.
- [20] XIE Z X, DOMEL A G, AN N, et al. Octopus arm-inspired tapered soft actuators with suckers for improved grasping[J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(5): 639-648.
- [21] FRAS J, NOH Y, MACIAS M, et al. Bio-inspired octopus robot based on novel soft fluidic actuator[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 1583-1588.
- [22] ZHANG Z, YANG T, ZHANG T H, et al. Global vision-based formation control of soft robotic fish swarm[J]. *Soft Robotics*, 2021, 8(3): 310-318.
- [23] WALLIN T J, PIKUL J, SHEPHERD R F. 3D printing of soft robotic systems[J]. *Nature Reviews Materials*, 2018, 3: 84-100.
- [24] 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.
- [25] SHAO Q W, ZHANG N B, SHEN Z Q, et al. A pneumatic soft gripper with configurable workspace and self-sensing[C]//*17th International Conference on Ubiquitous Robots*. Piscataway, USA: IEEE, 2020: 36-43.
- [26] YIRMIBESOGLU O D, MORROW J, WALKER S, et al. Direct 3D printing of silicone elastomer soft robots and their performance comparison with molded counterparts[C]//*IEEE International Conference on Soft Robotics*. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 295-302.
- [27] GAFFORD J, DING Y, HARRIS A, et al. Shape deposition manufacturing of a soft, atraumatic, and deployable surgical grasper[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2015, 7(2). DOI: 10.1115/1.4029493.
- [28] 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: 171-181.
- [29] SHEPHERD R F, ILIEVSKI F, CHOI W, et al. Multigait soft robot[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(51): 20400-20403.
- [30] KATZSCHMANN R K, DELPRETO J, MACCUDY R, et al. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(16). DOI: 10.1126/scirobotics.aar3449.
- [31] HAWKES E W, BLUMENSCHEN L H, GREER J D, et al. A soft robot that navigates its environment through growth [J]. *Science Robotics*, 2017, 2(8). DOI: 10.1126/scirobotics.aan3028.
- [32] HU W Q, LUM G Z, MASTRANGELI M, et al. Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion[J]. *Nature*, 2018, 554: 81-85.
- [33] ZHAO Y S, XUAN C, QIAN X S, et al. Soft phototactic swimmer based on self-sustained hydrogel oscillator[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(33). DOI: 10.1126/scirobotics.aax7112.
- [34] LI H L, YAO J T, WEI C J, et al. An untethered soft robotic gripper with high payload-to-weight ratio[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 158. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104226.
- [35] GU G Y, ZHANG N B, XU H P, et al. A soft neuroprosthetic hand providing simultaneous myoelectric control and tactile feedback[J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2023, 7: 589-598.
- [36] LI S H, VOGT D M, RUS D, et al. Fluid-driven origami-inspired artificial muscles[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(50): 13132-13137.
- [37] POLYGERINOS P, GALLOWAY K C, SAVAGE E, et al. Soft robotic glove for hand rehabilitation and task specific training[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 2913-2919.
- [38] CAASENBROOD B, POGROMSKY A, NIJMEIJER H. A computational design framework for pressure-driven soft robots through nonlinear topology optimization[C]//*3rd IEEE International Conference on Soft Robotics*. Piscataway, USA: IEEE, 2020: 633-638.
- [39] AN N, LI M E, ZHOU J X. Modeling and understanding locomotion of pneumatic soft robots[J]. *Soft Materials*, 2018, 16(3): 151-159.
- [40] WALKER J, ZIDEK T, HARBEL C, et al. Soft robotics: A review of recent developments of pneumatic soft actuators[J]. *Actuators*, 2020, 9(1). DOI: 10.3390/act9010003.
- [41] TANG C, LI B, FANG H B, et al. A speedy, amphibian, robotic cube: Resonance actuation by a dielectric elastomer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 270: 1-7.
- [42] LI H K, FAN M, YUE Y H, et al. Motion control of capsule-like underwater robot utilizing the swing properties of ionic polymer metal composite actuators[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2020, 17: 281-289.
- [43] WANG W, RODRIGUE H, AHN S H. Smart soft composite actuator with shape retention capability using embedded fusible alloy structures[J]. *Composites, Part B: Engineering*, 2015, 78: 507-514.
- [44] SHE Y, LI C, CLEARY J, et al. Design and fabrication of a soft robotic hand with embedded actuators and sensors[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2015, 7(2). DOI: 10.1115/1.4029497.
- [45] PETERSSON A, DAVIS S, GRAY J O, et al. Design of a magnetorheological robot gripper for handling of delicate food products with varying shapes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 98(3): 332-338.
- [46] JI Z Y, YAN C Y, YU B, et al. Multimaterials 3D printing for free assembly manufacturing of magnetic driving soft actuator[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2017, 4(22). DOI: 10.1002/admi.201700629.
- [47] AUBIN C A, CHOUDHURY S, JERCH R, et al. Electrolytic vascular systems for energy dense robots[J]. *Nature*, 2019, 571: 51-57.

- [48] ONAL C D, CHEN X, WHITESIDES G M, et al. Soft mobile robots with on board chemical pressure generation [M]//Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol.100. Berlin, Germany: Springer, 2017: 525-540.
- [49] DENG H, ZHANG C, SU J W, et al. Bioinspired multi-responsive soft actuators controlled by laser tailored graphene structures[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2018, 6(34): 5415-5423.
- [50] DEL POZO M, LIU L, DA CUNHA M P, et al. Direct ink writing of a light-responsive underwater liquid crystal actuator with atypical temperature-dependent shape changes[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(50). DOI: 10.1002/adfm.202005560.
- [51] 梁定坤, 陈轶珩, 孙宁, 等. 气动人工肌肉驱动的机器人控制方法研究现状概述[J]. *控制与决策*, 2021, 36(1): 27-41.
LIANG D K, CHEN Y H, SUN N, et al. Overview of control methods for pneumatic artificial muscle-actuated robots [J]. *Control and Decision*, 2021, 36(1): 27-41.
- [52] 邢志广, 林俊, 赵建文. 人工肌肉驱动器研究进展综述 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(9): 1-11.
XING Z G, LIN J, ZHAO J W. Overview of the artificial muscle actuators[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(9): 1-11.
- [53] 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.
- [54] WANG H S, YANG B H, LIU Y T, et al. Visual servoing of soft robot manipulator in constrained environments with an adaptive controller[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(1): 41-50.
- [55] 王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(13): 1-13.
WANG T M, HAO Y F, YANG X B, et al. Soft robotics: Structure, actuation, sensing and control[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(13): 1-13.
- [56] 王海涛, 彭熙凤, 林本末. 软体机器人研究进展[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(2): 94-106.
WANG H T, PENG X F, LIN B M. Research development of soft robots[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(2): 94-106.
- [57] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. *Nature*, 2015, 521: 467-475.
- [58] 张忠强, 邹娇, 丁建宁, 等. 软体机器人驱动研究现状 [J]. *机器人*, 2018, 40(5): 648-659.
ZHANG Z Q, ZOU J, DING J N, et al. Research status of the soft robot driving[J]. *Robot*, 2018, 40(5): 648-659.
- [59] LI L, ZHAO Y J, TIAN Y Z, et al. Shape modeling of a parallel soft panel continuum robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 367-372.
- [60] GRAVAGNE I A, RAHN C D, WALKER I D. Large deflection dynamics and control for planar continuum robots[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2003, 8(2): 299-307.
- [61] BAO J L, CHEN W H, XU J. Kinematics modeling of a twisted and coiled polymer-based elastomer soft robot[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 136792-136800.
- [62] MENG F C, XU F Y, WU M L, et al. Modeling and experiment of three-cavity soft manipulator[C]//5th IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 1018-1022.
- [63] KATZSCHMANN R K, DELLA SANTINA C, TOSHIMITSU Y, et al. Dynamic motion control of multi-segment soft robots using piecewise constant curvature matched with an augmented rigid body model[C]//2nd IEEE International Conference on Soft Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 454-461.
- [64] 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.
- [65] COEVOET E, MORALES-BIEZE T, LARGILLIERE F, et al. Software toolkit for modeling, simulation, and control of soft robots[J]. *Advanced Robotics*, 2017, 31(22): 1208-1224.
- [66] MARCHESE A D, TEDRAKE R, RUS D. Dynamics and trajectory optimization for a soft spatial fluidic elastomer manipulator[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2016, 35(8): 1000-1019.
- [67] THIEFFRY M, KRUSZEWSKI A, GOURY O, et al. Dynamic control of soft robots[C/OL]//IFAC World Congress. Toulouse, France: HAL, 2017. <https://hal.science/hal-01558844>.
- [68] TRIVEDI D, LOTFI A, RAHN C D. Geometrically exact models for soft robotic manipulators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(4): 773-780.
- [69] RENDA F, CACUCCILO V, DIAS J, et al. Discrete Cosserat approach for soft robot dynamics: A new piece-wise constant strain model with torsion and shears[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2016: 5495-5502.
- [70] MBAKOP S, TAGNE G, FROUIN M H, et al. Inverse dynamics model-based shape control of soft continuum finger robot using parametric curve[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(4): 8053-8060.
- [71] JONES B A, WALKER I D. Kinematics for multisection continuum robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(1): 43-55.
- [72] WANG C S, FRAZELLE C G, WAGNER J R, et al. Dynamic control of multisection three-dimensional continuum manipulators based on virtual discrete-jointed robot models[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, 26(2): 777-788.
- [73] XUE X Q, ZHAN Z H, CAI Y W, et al. Design and finite element analysis of fiber-reinforced soft pneumatic actuator[M]//Lecture Notes in Computer Science, Vol.11740. Berlin, Germany: Springer, 2019: 641-651.
- [74] DE PAYREBRUNE K M, O'REILLY O M. An experimentally validated rod model for soft continuum robots[J]. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, 16(1): 317-318.
- [75] CHEN Y, WANG L, GALLOWAY K, et al. Modal-based kinematics and contact detection of soft robots[J]. *Soft Robotics*, 2021, 8(3): 298-309.
- [76] WEBSTER R J, JONES B A. Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2010, 29(13): 1661-1683.

- [77] SCHEGG P, DURIEZ C. Review on generic methods for mechanical modeling, simulation and control of soft robots[J]. *P-LoS One*, 2022, 17(1). DOI: 10.1371/journal.pone.0251059.
- [78] 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.
- [79] DELLA SANTINA C, KATZSCHMANN R K, BIECHI A, et al. Dynamic control of soft robots interacting with the environment[C]//*IEEE International Conference on Soft Robotics*. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 46-53.
- [80] POLYGERINOS P, WANG Z, OVERVELDE J T B, et al. Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(3): 778-789.
- [81] RENDA F, LASCHI C. A general mechanical model for tendon-driven continuum manipulators[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 3813-3818.
- [82] XU F, WANG H S. Soft robotics: Morphology and morphology inspired motion strategy[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2021, 8(9): 1500-1522.
- [83] RENDA F, GIORELLI M, CALISTI M, et al. Dynamic model of a multibending soft robot arm driven by cables[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(5): 1109-1122.
- [84] RENDA F, BOYER F, DIAS J, et al. Discrete Cosserat approach for multisection soft manipulator dynamics[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(6): 1518-1533.
- [85] OLSON G, HATTON R L, ADAMS J A, et al. An Euler-Bernoulli beam model for soft robot arms bent through self-stress and external loads[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 207: 113-131.
- [86] DELLA SANTINA C, BICCHI A, RUS D. On an improved state parametrization for soft robots with piecewise constant curvature and its use in model based control[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 1001-1008.
- [87] RUNGE G, WIESE M, GÜNTHER L, et al. A framework for the kinematic modeling of soft material robots combining finite element analysis and piecewise constant curvature kinematics[C]//*3rd International Conference on Control, Automation and Robotics*. Piscataway, USA: IEEE, 2017: 7-14.
- [88] ZHANG Y R, WANG D, ZHOU X F, et al. A kinematic model for soft robot based on double laminate plate theory[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 600-605.
- [89] WANDKE K, Z Y. MOOSE-based finite element hyperelastic modeling for soft robot simulations[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 139627-139635.
- [90] BRANCADORO M, MANTI M, TOGNARELLI S, et al. Fiber jamming transition as a stiffening mechanism for soft robotics[J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(6): 663-674.
- [91] XIE Z X, YUAN F Y, LIU Z M, et al. A proprioceptive soft tentacle gripper based on crosswise stretchable sensors [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(4): 1841-1850.
- [92] GIORELLI M, RENDA F, CALISTI M, et al. A two dimensional inverse kinetics model of a cable driven manipulator inspired by the octopus arm[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 3819-3824.
- [93] CHEN Z, TAN X B. A control-oriented and physics-based model for ionic polymer-metal composite actuators[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2008, 13(5): 519-529.
- [94] KHAWWAF J, ZHENG J C, AL-CIHANIMI A, et al. Modeling and tracking control of an IPMC actuator for underwater applications[C]//*International Conference on Advanced Mechatronic Systems*. Piscataway, USA: IEEE, 2016: 550-554.
- [95] BONOMO C, FORTUNA L, GIANNONE P, et al. A nonlinear model for ionic polymer metal composites as actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 16(1). DOI: 10.1088/0964-1726/16/1/001.
- [96] BAR-COHEN Y. Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles: Reality, potential, and challenges[M]. Bellingham, USA: SPIE, 2004.
- [97] 李梦梦, 李原, 王庆林. EAP 柔性智能驱动材料的建模、控制及应用研究进展[J]. *机器人*, 2018, 40(5): 660-672. LI M M, LI Y, WANG Q L. Research progress on modeling, control and application of EAP flexible intelligent driving materials[J]. *Robot*, 2018, 40(5): 660-672.
- [98] KHAWWAF J, ZHENG J C, LU R Q, et al. Robust tracking control of an IPMC actuator using nonsingular terminal sliding mode[J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(9). DOI: 10.1088/1361-665X/aa7d69.
- [99] YI X F, CHAKARVARTHY A, CHEN Z. Cooperative collision avoidance control of servo/IPMC driven robotic fish with back-relaxation effect[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 1816-1823.
- [100] CHEN X K. Robust control for ionic polymer-metal composite actuators[C]//*IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 491-496.
- [101] FENG Y, KUMKONGKAEW W, DU J, et al. Hysteresis modeling for IPMC actuators with rate-dependent Preisach model [C]//*11th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 1549-1554.
- [102] LI Z, HAO L N. Adaptive inverse control based on the creep property of IPMC[C]//*Chinese Control and Decision Conference*. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 702-706.
- [103] CHEN Z, SHATARA S, TAN X B. Modeling of biomimetic robotic fish propelled by an ionic polymer-metal composite caudal fin[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(3): 448-459.
- [104] CHEN Z, HOU P Q, YE Z H. Modeling of robotic fish propelled by a servo/IPMC hybrid tail[C]//*IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 8146-8151.
- [105] NAM D N C, AHN K K. Modeling and control of a self-sensing polymer metal composite actuator[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(2). DOI: 10.1088/0964-1726/23/2/025025.
- [106] WU Y X, LAMOLINE F, WINKIN J, et al. Modeling and control of an IPMC actuated flexible beam under the port-Hamiltonian framework[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, 52(2): 108-113.
- [107] CAO J W, LIANG W Y, WANG Y Z, et al. Control of a soft inchworm robot with environment adaptation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(5): 3809-3818.

- [108] GU G Y, GUPTA U, ZHU J, et al. Modeling of viscoelastic electromechanical behavior in a soft dielectric elastomer actuator[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(5): 1263-1271.
- [109] PANG J N, SHAO Y B, CHI H Z, et al. Modeling and control of a soft circular crawling robot[C]//45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 5243-5248.
- [110] AMIRI MOGHADAM A A, TORABI K, KAYNAK A, et al. Control-oriented modeling of a polymeric soft robot[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(2): 82-97.
- [111] BENOUIHIBA A, RABENOROSOA K, ROUGEOT P, et al. A multisegment electro-active polymer based milli-continuum soft robots[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2018: 7500-7506.
- [112] WANG Z P, HE B, LIU X H, et al. Development and modeling of a new ionogel based actuator[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2017, 28(15): 2036-2050.
- [113] XIANG C Q, YANG H, SUN Z Y, et al. The design, hysteresis modeling and control of a novel SMA-fishing-line actuator[J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(3). DOI: 10.1088/1361-665X/aa5b03.
- [114] DU Y, LIU B, XU M, et al. Dynamic characteristics of planar bending actuator embedded with shape memory alloy[J]. *Mechatronics*, 2015, 25: 18-26.
- [115] COPACI D S, BLANCO D, MARTIN-CLEMENTE A, et al. Flexible shape memory alloy actuators for soft robotics: Modelling and control[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, 17(1). DOI: 10.1177/1729881419886747.
- [116] KHAN A H, SHAO Z L, LI S, et al. Which is the best PID variant for pneumatic soft robots? an experimental study[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, 7(2): 451-460.
- [117] VIKAS V, GROVER P, TRIMMER B. Model-free control framework for multi-limb soft robots[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1111-1116.
- [118] SATHEESHBABU S, UPPALAPATI N K, CHOWDHARY G, et al. Open loop position control of soft continuum arm using deep reinforcement learning[C]//International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 5133-5139.
- [119] YIP M C, CAMARILLO D B. Model-less feedback control of continuum manipulators in constrained environments[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(4): 880-889.
- [120] LI M H, KANG R J, BRANSON D T, et al. Model-free control for continuum robots based on an adaptive Kalman filter [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(1): 286-297.
- [121] VIKAS V, COHEN E, GRASSI R, et al. Design and locomotion control of a soft robot using friction manipulation and motor-tendon actuation[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(4): 949-959.
- [122] GIORELLI M, RENDA F, FERRI G, et al. A feed-forward neural network learning the inverse kinetics of a soft cable-driven manipulator moving in three-dimensional space [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 5033-5039.
- [123] EDER M, HISCH F, HAUSER H. Morphological computation-based control of a modular, pneumatically driven, soft robotic arm[J]. *Advanced Robotics*, 2018, 32(7): 375-385.
- [124] SCIMECA L, HUGHES J, MAIOLINO P, et al. Model-free soft-structure reconstruction for proprioception using tactile arrays[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(3): 2479-2484.
- [125] LIU W J, JING Z L, D'ELEUTERIO G, et al. Shape memory alloy driven soft robot design and position control using continuous reinforcement learning[C]//2nd International Conference on Intelligent Autonomous Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 124-130.
- [126] LI L, LI J N, QIN L, et al. Deep reinforcement learning in soft viscoelastic actuator of dielectric elastomer[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(2): 2094-2100.
- [127] TANG Z Q, HEUNG H L, TONG K Y, et al. A novel iterative learning model predictive control method for soft bending actuators[C]//International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 4004-4010.
- [128] KHAWWAF J, ZHENG J C, WANG H, et al. Practical model-free robust control design for an underwater IPMC actuator [C]// Chinese Control Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 3214-3219.
- [129] QI P, LIU C, ATAKA A, et al. Kinematic control of continuum manipulators using a fuzzy-model-based approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(8): 5022-5035.
- [130] POLYGERINOS P, CORRELL N, MORIN S A, et al. Soft robotics: Review of fluid-driven intrinsically soft devices; manufacturing, sensing, control, and applications in human-robot interaction[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2017, 19(12). DOI: 10.1002/adem.201700016.
- [131] LI W B, ZHANG W M, ZOU H X, et al. A fast rolling soft robot driven by dielectric elastomer[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(4): 1630-1640.
- [132] BERN J M, SCHNIDER Y, BANZET P, et al. Soft robot control with a learned differentiable model[C]//3rd IEEE International Conference on Soft Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2020: 417-423.
- [133] LIU Z C, LU Z Y, KARYDIS K. SoRX: A soft pneumatic hexapedal robot to traverse rough, steep, and unstable terrain [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2020: 420-426.
- [134] DU T, HUGHES J, WAH S, et al. Underwater soft robot modeling and control with differentiable simulation[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(3): 4994-5001.
- [135] ABBAS A, ZHAO J G. Twisted and coiled sensor for shape estimation of soft robots[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2017: 482-487.
- [136] FEI Y Q, XU H W. Modeling and motion control of a soft robot [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(2): 1737-1742.
- [137] PANG W, WANG J B, FEI Y Q. The structure, design, and closed-loop motion control of a differential drive soft robot[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(1): 71-80.

- [138] KANDHARI A, STOVER M C, JAYACHANDRAN P R, et al. Distributed sensing for soft worm robot reduces slip for locomotion in confined environments[M]//Lecture Notes in Computer Science, Vol.10928. Berlin, Germany: Springer, 2018: 236-248.
- [139] LU X M, XU W L, LI X N. PneuNet based control system for soft robotic tongue[C]//IEEE 14th International Workshop on Advanced Motion Control. Piscataway, USA: IEEE, 2016: 353-357.
- [140] LI Y Q, CHEN Y H, LI Y T. Pre-charged pneumatic soft gripper with closed-loop control[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(2): 1402-1408.
- [141] TRUBY R L, KATZSCHMANN R K, LEWIS J A, et al. Soft robotic fingers with embedded ionogel sensors and discrete actuation modes for somatosensitive manipulation[C]//2nd IEEE International Conference on Soft Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 322-329.
- [142] PAN M, YUAN C G, ANPALAGAN H, et al. Soft controllable carbon fibre-based piezoresistive self-sensing actuators[J]. Actuators, 2020, 9(3). DOI: 10.3390/act9030079.
- [143] ZHANG Z K, BIEZE T M, DEQUIDT J, et al. Visual servoing control of soft robots based on finite element model [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2017: 2895-2901.
- [144] GONG Z Y, FANG X, CHEN X Y, et al. A soft manipulator for efficient delicate grasping in shallow water: Modeling, control, and real-world experiments[J]. International Journal of Robotics Research, 2021, 40(1): 449-469.
- [145] XU F, WANG H S, CHEN W D, et al. Visual servoing of a cable-driven soft robot manipulator with shape feature[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(3): 4281-4288.
- [146] LIU W J, JING Z L, PAN H, et al. Distance-directed target searching for a deep visual servo sma driven soft robot using reinforcement learning[J]. Journal of Bionic Engineering, 2020, 17: 1126-1138.
- [147] XU F, WANG H S, WANG J C, et al. Underwater dynamic visual servoing for a soft robot arm with online distortion correction[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(3): 979-989.
- [148] GREER J D, MORIMOTO T K, OKAMURA A M, et al. Series pneumatic artificial muscles (sPAMs) and application to a soft continuum robot[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2017: 5503-5510.
- [149] LINDENROTH L, STOYANOV D, RHODE K, et al. Towards intrinsic force sensing and control in parallel soft robots[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28(1): 80-91.
- [150] COPACI D, MUNOZ J, GONZALEZ I, et al. SMA-driven soft robotic neck: Design, control and validation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 199492-199502.
- [151] GONZALEZ C, LUMIA R. An IPMC microgripper with integrated actuator and sensing for constant finger-tip displacement[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(5). DOI: 10.1088/0964-1726/24/5/055011.
- [152] AZIZKHANI M, GUNDERMAN A L, GODAGE I S, et al. Dynamic control of soft robotic arm: An experimental study [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(4): 1897-1904.
- [153] XU F, WANG H S, CHEN W D, et al. Adaptive visual servoing control for an underwater soft robot[J]. Assembly Automation, 2018, 38(5): 669-677.
- [154] LI Q Z, YANG G Q, YU F J, et al. Adaptive fractional order non-singular terminal sliding mode controller for underwater soft crawling robots with parameter uncertainties and unknown disturbances[J]. Ocean Engineering, 2023, 271. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113728.
- [155] CAO G Z, LIU Y H, JIANG Y C, et al. Observer-based continuous adaptive sliding mode control for soft actuators[J]. Nonlinear Dynamics, 2021, 105: 371-386.
- [156] CORTEZ-VEGA R, CHAIREZ I, LUVIANO-JUAREZ A, et al. Multi-link endoscopic manipulator robot actuated by shape memory alloys spring actuators controlled by a sliding mode [J/OL]. ISA Transactions, 2020. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.10.053.
- [157] ZHAO L, CHENG H Y, ZHANG J H, et al. Adaptive control for a motion mechanism with pneumatic artificial muscles subject to dead-zones[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 148. DOI: 10.1016/j.ymsp.2020.107155.
- [158] YUAN Y, YU Y, GUO L. Nonlinear active disturbance rejection control for the pneumatic muscle actuators with discrete-time measurements[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2044-2053.
- [159] PIQUÉ F, KALIDINDI H T, FRUZZETTI L, et al. Controlling soft robotic arms using continual learning[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 5469-5476.
- [160] KHAWWAF J, ZHENG J C, CHAI R, et al. Adaptive micro-tracking control for an underwater IPMC actuator using new hyperplane-based sliding mode[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(5): 2108-2117.
- [161] ROBINSON R M, KOTHERA C S, SANNER R M, et al. Nonlinear control of robotic manipulators driven by pneumatic artificial muscles[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(1): 55-68.
- [162] BRUDER D, FU X, GILLESPIE R B, et al. Data-driven control of soft robots using Koopman operator theory[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 37(3): 948-961.
- [163] DELLA SANTINA C, TRUBY R L, RUS D. Data-driven disturbance observers for estimating external forces on soft robots [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 5717-5724.
- [164] ZHU M Z, XU W L, CHENG L K. Esophageal peristaltic control of a soft-bodied swallowing robot by the central pattern generator[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(1): 91-98.
- [165] CHEN Y H, WANG T, WU C F, et al. Design, control, and experiments of a fluidic soft robotic eel[J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(6). DOI: 10.1088/1361-665X/abf5ef.
- [166] FELT W, CHIN K Y, REMY C D. Smart braid feedback for the closed-loop control of soft robotic systems[J]. Soft Robotics, 2017, 4(3): 261-273.

作者简介:

梅 栋 (1995-), 男, 博士生。研究领域: 软体机器人控制技术。

王延杰 (1985-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。研究领域: 先进仿生系统与机器人技术, 智能材料与结构。