

机器人仿生智能专刊序言

刘志杰¹ 程光权² 陈章³ 杨辰光⁴ 贺威⁵

自然界生物历经亿万年进化形成的“形态-行为-智能”协同优化机制,为机器人设计赋予了高效能、低能耗与强鲁棒性的创新范式.仿生机器人通过模拟生物体的形态特征、运动机理和智能决策模式,在环境适应性、运动灵活性和交互自主性方面展现出显著优势.近年来,随着人工智能、柔性材料、先进制造、新型传感等技术的持续突破与革新,机器人仿生智能领域得到了快速发展.仿生形态设计结合轻量化和多功能结构,提高了机器人在复杂环境中的适应性;仿生感知系统模拟生物神经感知网络,实现更精准的环境感知和信息处理;仿生控制算法和学习机制则赋予机器人更强的自主决策能力,使其能够在未知环境中完成复杂任务.当前,仿生机器人正朝着自主化、智能化方向发展,在医疗康复、极端环境探测、工业制造、国防安全等领域展现出广阔的应用前景.

为系统追踪仿生机器人机理、仿生结构设计、仿生感知与智能控制、仿生智能与学习、仿生机器人应用等领域最新的研究成果,《自动化学报》组织了“机器人仿生智能”专刊,经同行评议,本专刊录用论文 19 篇,涵盖仿生机理综述、跨介质/多模态机器人设计、仿生驱动与控制、仿生感知与学习、集群协同与特种应用等核心方向.

北京大学喻俊志教授团队系统综述水陆两栖跨介质仿生机器人研究进展.首先梳理典型水陆两栖生物形态与推进机制,阐明生物机理对机器人设计的双向促进作用;以推进策略为主线,将机器人划

分为单一推进与混合推进两类,介绍代表性样机并对比不同介质下的适应效能;总结感知、驱动、控制等关键技术,分析控制策略共性与差异;最后结合跨介质运动、具身智能、物理智能等前沿方向,探讨未来研究与应用前景,为跨介质仿生机器人发展提供系统性参考.

北京航空航天大学丁希仑教授团队综述陆空多模态机器人技术现状与发展趋势.总结国内外典型陆空多模态机器人,阐述构型特点、驱动方式与运动机理;重点分析复杂地形障碍感知与稳定移动、非结构化环境自主起飞、气流扰动下稳定飞行、地面效应与触地冲击缓冲着陆等关键技术;指出自主化、智能化面临的模型不确定性、多模态协同、环境自适应等挑战,展望轻量化、高续航、全自主作业的发展路径,为陆空跨界机器人研究提供框架.

湖南大学王耀南院士和张辉教授团队提出生物启发的飞滚多模态球形机器人路径规划方法.针对飞滚机器人室内自主导航环境建模复杂、规划效率低的难题,受生物高效位移机制启发,构建建筑结构层与障碍物层分层栅格地图,高效表征室内环境关键要素;设计改进 Jump A* 算法,分别在结构层规划地面滚动路径、障碍物层规划空中飞行路径,并在代价函数中引入能量损耗项,平衡移动距离与能耗;该方法可高效建模并完成多模态路径规划,为复杂室内场景自主导航提供可行方案.

北京理工大学方浩教授团队和清华大学刘华平教授团队联合提出结构仿生六杆张拉整体机器人折叠控制的形态智能方法.面向具身智能中形态智能简化控制的核心目标,针对六杆张拉整体完全折叠难题,基于“端点聚拢”构造折叠目标,通过对称性分析得到四种折叠模式与绳长变化量;利用图论回路空间识别冗余绳长,确定被控绳索;在静力学框架建立电机输入与绳长映射关系并给出可达性判据,得到简化控制策略,展现形态智能简化控制器设计的潜力.

北京大学刘珂研究员团队开展冗余人工肌肉驱动仿生机器人强化学习控制研究.针对人工肌肉驱动与协同不足的问题,设计多股人工肌肉并联驱动软体机器人,搭建以柔性十字电路板为主体、集成

1. 北京科技大学人工智能学院 北京 100083 2. 国防科技大学系统工程学院 长沙 410073 3. 清华大学自动化系 北京 100084 4. 香港理工大学电子计算学系 香港 999077 5. 北京信息科技大学自动化学院 北京 102206

1. School of Artificial Intelligence, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083 2. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073 3. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084 4. Department of Computing, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077 5. College of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 102206

引用格式 刘志杰,程光权,陈章,杨辰光,贺威. 机器人仿生智能专刊序言. 自动化学报, 2026, 52(5): 879-881

Citation Liu Zhi-Jie, Cheng Guang-Quan, Chen Zhang, Yang Chen-Guang, He Wei. Guest editorial of special issue on biomimetic intelligence in robotics. *Acta Automatica Sinica*, 2026, 52(5): 879-881

DOI 10.16383/j.aas.c202605 CSTR 32138.14.j.aas.c202605

六路液晶弹性体人工肌肉与驱动电路的样机, 测试其应变与响应特性; 针对形变-运动特点, 建立绳腱驱动简化模型, 合理设计状态空间、动作空间与奖励函数, 采用 SAC 算法并行训练, 得到平移与旋转肌肉协同策略; 离线驱动样机实现多向平移与旋转运动, 验证强化学习控制复杂人工肌肉系统的可行性.

清华大学梁斌教授团队提出仿人操控的无人摩托自适应定车控制方法. 针对无人摩托静止平衡控制难题, 受骑手定车技巧启发, 首次阐明定车平衡机理; 建立动力学模型并结合骑手实验, 从模型与数据双维度解析操控原理; 提出平衡点自适应鲁棒定车控制方法, 利用扰动观测器估计受扰平衡点, 采用非线性模型预测控制实现扰动下平衡控制.

北京航空航天大学段海滨教授团队提出基于鹰群环伺行为的无人机集群人机关联跟踪控制. 针对纯方位测量下集群协同跟踪动态目标的强非线性、高维度、估计-控制耦合难题, 构建分布式协同估计-控制闭环系统; 借鉴鹰群多视角感知特性, 提出方位统计融合估计方法, 融合贝叶斯统计与分布式滤波, 降低估计维度并保证可观性; 依据动态封锁机制设计环伺关联跟踪控制器, 维持最优观测态势.

国防科技大学卢惠民教授团队提出以数据手套为媒介的人手-机械手抓握技能传递方法. 针对传统示教不直观、数据难复用、触觉动觉难传递的问题, 研制可同步采集触觉与动觉特征的数据手套; 提出包含多模态图结构极坐标表示、未知接触力静力平衡估计、期望关节角度与接触力动态重映射的技能传递方案; 实验表明, 该方案对可变形、不规则物体抓握成功率高, 接触力控制合理, 更接近人手直接抓握效果, 为灵巧操作技能迁移提供新路径.

中国科学院自动化研究所谭民研究员团队提出基于改进 CSRT 的仿生视触觉传感器动态标记点跟踪方法. 针对密集标记点检测精度与实时性难以兼顾、传统算法光照敏感问题, 融合斑点检测与动态 ROI 优化机制改进 CSRT; 以 GelStereo 为平台, 通过轻量级斑点检测实现初始定位, 依据运动轨迹自适应生成 ROI, 降低计算量, 为仿生高精度实时触觉感知提供可行的技术方案.

加拿大康考迪亚大学苏春翌教授与中国地质大学(武汉) 吴俊东教授团队联合开展仿生鱼尾机器人动力学建模与摆动控制研究. 针对气动驱动仿生鱼尾非线性迟滞与柔顺建模难问题, 建立弹簧-质量-阻尼三元动力学模型, 通过实验完成参数辨识, 精准描述复杂非线性行为; 提出前馈-反馈复合控制方法, 逆动力学生成前馈输入提升响应速度, PID 反馈抑制误差与扰动; 定频、变幅、随机轨迹与水下实验均表明该方法优于传统 PID, 跟踪精度与

适应能力突出.

华南理工大学刘屿教授与广州大学赵志甲教授团队联合提出仿鱼群行为的欠驱动水面机器人自组织编队重构控制策略. 受鱼群自组织启发, 设计分布式编队架构, 支持动态领导者选举与树状拓扑重构; 基于鱼群疏散行为提出狭窄通道编队重构算法, 结合通行优势排序与有限状态机实现高效平滑转换; 基于逃逸行为设计动态分裂-合并算法, 将重构转化为 MAPF 问题, 融合 Dubins 路径与改进遗传算法优化轨迹, 设计编队控制律, 实现欠驱动水面机器人自组织编队重构控制.

湖南大学王耀南院士团队开展多运动模式仿生软体爬行机器人设计与性能研究. 针对爬行机器人运动模式单一问题, 受章鱼触腕肌肉启发, 设计三腔气动关节, 实现模块化与三维差异化轨迹运动; 基于该关节研制多模式仿生爬行机器人, 通过不同气压激励实现蜥蜴式纵向爬行与螃蟹式横向爬行; 系统研究关节设计、结构实现、制造工艺与集成验证, 为气动关节与多模式软体爬行机器人开发提供新思路.

北京航空航天大学余翔教授团队提出基于超宽带信息智能决策的无人机自主精确定位方法. 面向卫星信号拒止环境无人机高精度定位难题, 采用超宽带全局测距校正视觉惯性里程计累积误差; 设计复合干扰滤波处理多源异质干扰, 构建超宽带信息评估模块量化定位可靠性, 为室内、地下、楼宇间等无卫星信号场景的无人机自主作业提供关键支撑.

安徽大学孙长银教授团队提出基于因果影响检测的多无人机海上协同导航策略优化方法. 面向海上动态未知环境协同导航协作复杂、全局信息难获取的挑战, 针对 CTDE 框架下 MARL 协作效率与探索能力不足问题, 提出 CID-MAPPO 算法; 以因果影响为准则, 引入协作内在奖励, 利用因果推断与条件互信息检测行为因果影响, 引导正向动作探索, 提升集群协作效率.

中国海洋大学汤超教授团队开展仿生多关节管道机器人结构设计与系统控制研究. 受多关节生物运动启发, 针对管道机器人结构松散、速度偏低问题, 设计多关节串联可变构型管道检测机器人, 提升环境适应性、运动速度与紧凑性; 给出整机尺寸与管道适应范围, 分析几何通过性, 实现水平、竖直、倾斜、弯管等多工况运动, 为变管径管道检测机器人设计提供重要借鉴.

江南大学张承玺教授团队提出变学习强度扑翼飞行器自学习控制方法. 针对扑翼飞行器非线性、模型不确定、嵌入式算力有限的难题, 设计可自定义变学习强度自学习控制; 通过学习历史控制信息,

仅用单一代数方程避免复杂设计, 提升轨迹跟踪精度与鲁棒性; 采用自定义函数调节学习强度, 优化动态响应与稳态性能; 该方法计算复杂度低、控制性能良好, 适用于片上计算资源有限的扑翼飞行器实时控制。

北京信息科技大学李连鹏教授团队提出基于 PIRL 的空间机械臂仿生智能抓取方法。面向微重力漂浮目标自主抓取样本难、泛化弱、扰动敏感问题, 提出渐进式模仿强化学习方法; 基于遥操作专家数据构建 MLP 初始模型, 通过行为克隆完成仿生训练; 嵌入高保真仿真环境, 采用改进 PPO-GS 算法在线微调, 融合动作空间与分阶段奖励, 解决分布偏移与样本效率瓶颈。

武汉理工大学罗晶教授团队提出基于“形态-感知-动作”仿生机理的机器人自适应力控抓取方法。针对精细抓力不足、易碎物易损坏问题, 构建视觉-触觉融合自适应力控框架; 视觉模块预测抓取位置, 触觉模块恢复深度、估算接触面积与法向力; 通过最大深度变化率与帧间均方差判定形变, 触发“渐进增力-形变检测-力回退”仿生反馈机制, 有效提升易碎与通用物体抓取成功率。

郑州大学彭金柱教授团队提出融合仿人决策的绳驱动软体机器人状态吸引控制方法。针对绳驱动软体机器人强非线性、大变形、多自由度耦合、参数不确定等控制难题, 构建仿生样机并建立运动学与动力学模型; 引入脉冲神经网络 SNN 模拟人类决策, 自适应更新启停策略与期望轨迹; 设计融合状态吸引函数 SAF 与仿人决策的鲁棒轨迹跟踪控制器, 约束误差收敛方向, 实现绳驱动软体机器人鲁棒状态吸引控制。

上述研究成果大多得到了国家自然科学基金、国家重点研发计划等国家级与省部级科研项目的资助, 丰富了机器人仿生智能领域的理论体系与技术框架。受时间与篇幅所限, 本专刊未能全面涵盖机器人仿生智能领域的所有前沿方向与创新探索, 希望这些成果能够为相关领域科研工作者提供参考与启发, 为仿生机器人技术的自主化、智能化发展, 以及在医疗康复、工业制造、国防安全等关键领域的应用落地起到积极的推动作用。

在此, 衷心感谢各位作者为本专刊贡献的研究成果与辛勤付出, 感谢各位评审专家为稿件质量把关提供的专业评审与宝贵建议, 同时由衷感谢《自动化学报》编委会与编辑部在专刊全流程工作中的悉心指导与鼎力支持。



刘志杰 北京科技大学人工智能学院教授。主要研究方向为微型扑翼机器人和智能控制。

E-mail: liuzhijie2012@gmail.com

(**LIU Zhi-Jie** Professor at the School of Artificial Intelligence, University of Science and Technology Beijing. His research interests include micro flapping-wing robots and intelligent control.)



程光权 国防科技大学系统工程学院研究员。主要研究方向为智能决策与任务规划。

E-mail: cgq299@nudt.edu.cn

(**CHENG Guang-Quan** Professor at the College of Systems Engineering, National University of Defense Technology. His research interests include intelligent decision-making and task planning.)



陈章 清华大学自动化系副研究员。主要研究方向为无人系统与智能特种机器人控制。

E-mail: cz_da@tsinghua.edu.cn

(**CHEN Zhang** Associate professor in the Department of Automation, Tsinghua University. His research interests include intelligent special robot and unmanned system control.)



杨辰光 香港理工大学教授。主要研究方向为智能控制, 遥操作, 人机交互控制。

E-mail: chengguagn@polyu.edu.hk

(**YANG Chen-Guang** Professor at The Hong Kong Polytechnic University. His research interests include intelligent control, teleoperation, and human-machine interaction.)



贺威 北京信息科技大学教授。主要研究方向为无人系统, 扑翼机器人, 智能控制。

E-mail: weihe@ieee.org

(**HE Wei** Professor at Beijing Information Science and Technology University. His research interests include unmanned systems, flapping-wing robots, and intelligent control.)