



融合仿人决策的绳驱动软体机器人状态吸引控制

彭金柱 王子浩 杨耀雨 范朋辉 刘亚强

State-attracted Control of Cable-driven Soft Robot With Human-inspired Decision-making Integration

PENG Jin-Zhu, WANG Zi-Hao, YANG Yao-Yu, FAN Peng-Hui, LIU Ya-Qiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16383/j.aas.c250683>

您可能感兴趣的其他文章

满足不同交互任务的人机共融系统设计

System Design for Human-robot Coexisting Environment Satisfying Multiple Interaction Tasks

自动化学报. 2022, 48(9): 2265-2276 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c190753>

基于自学习中枢模式发生器的仿人机器人适应性行走控制

Adaptive Locomotion Control of Humanoid Robot Based on Self-Learning CPG

自动化学报. 2021, 47(9): 2170-2181 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c190087>

考虑输出约束的冗余驱动绳索并联机器人预设性能控制

Prescribed Performance Control of Redundantly-actuated Cable Driving Parallel Robots Subjected to Output Constraint

自动化学报. 2022, 48(7): 1704-1717 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c210949>

基于数据驱动的冗余机器人末端执行器位姿控制方案

Position and Orientation Control Scheme for End-effector of Redundant Manipulators Based on Data-driven Technology

自动化学报. 2024, 50(3): 518-526 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c230273>

基于捕获点理论的混合驱动水下刀锋腿机器人稳定性判据

A Stability Criterion for Hybrid-driven Underwater Bladed Legged Robot Based on Capture Point Theory

自动化学报. 2024, 50(8): 1565-1576 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c220889>

基于高仿生形态布局的仿鸽扑翼飞行机器人系统设计

System Design of Dove-like Flapping-wing Flying Robot Based on Highly Bionic Morphological Layout

自动化学报. 2024, 50(2): 308-319 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c220836>

融合仿人决策的绳驱动软体机器人状态吸引控制

彭金柱¹ 王子浩¹ 杨耀雨¹ 范朋辉¹ 刘亚强¹

摘要 绳驱动软体机器人通过柔性本体与绳传动相结合, 在结构轻量化、运动柔顺性及人机交互安全性等方面具有显著优势, 在协作操作与安全交互场景中展现出重要应用潜力. 然而, 软体材料固有的强非线性与大变形特性, 以及绳驱动结构引入的多自由度耦合和参数不确定性, 使绳驱动软体机器人在复杂环境下的稳定控制与抗扰性能面临较大挑战. 针对上述问题, 构建一种仿生绳驱动软体机器人原型系统, 建立相应的运动学与动力学模型; 提出一种融合仿人决策的状态吸引控制方法, 该方法引入脉冲神经网络以模拟人类决策行为, 实现对绳驱动软体机器人启停策略与期望轨迹的自适应更新; 设计一种融合状态吸引函数与仿人决策的鲁棒轨迹跟踪控制策略, 用以约束跟踪误差在模型不确定性与外部扰动条件下的收敛方向, 并基于 Lyapunov 理论证明闭环系统的稳定性. 仿真与实物实验结果表明, 所提方法在鲁棒性、人机交互安全性及动态响应性能等方面具有良好表现, 验证了其在实际人机交互场景中的可行性与有效性.

关键词 绳驱动软体机器人; 人机交互; 仿人决策; 状态吸引控制

引用格式 彭金柱, 王子浩, 杨耀雨, 范朋辉, 刘亚强. 融合仿人决策的绳驱动软体机器人状态吸引控制. 自动化学报, 2026, 52(5): 1-13

DOI 10.16383/j.aas.c250683 **CSTR** 32138.14.j.aas.c250683

State-attracted Control of Cable-driven Soft Robot With Human-inspired Decision-making Integration

PENG Jin-Zhu¹ WANG Zi-Hao¹ YANG Yao-Yu¹ FAN Peng-Hui¹ LIU Ya-Qiang¹

Abstract Cable-driven soft robot (CDSRA) combines a compliant body with cable transmission, offering notable advantages in lightweight design, motion compliance, and human-robot interaction safety, thus showing great potential in collaborative manipulation and interaction scenarios. However, the strong nonlinearity and large deformation of soft materials, together with the multi-degree-of-freedom coupling and parameter uncertainties introduced by cable-driven structures, pose challenges to stable control and disturbance rejection in complex environments. To address these issues, this paper develops a bionic cable-driven soft robot prototype, establishes its kinematic and dynamic models, and proposes a state-attracted control method for CDSRA incorporating human-inspired decision (HID). In this method, a spiking neural network is introduced to emulate human decision-making, enabling adaptive updates of the start-stop strategy and desired trajectories. Moreover, a robust trajectory-tracking control strategy integrating a state-attracted function with HID is designed to constrain the direction of tracking-error convergence under model uncertainties and external disturbances, while closed-loop stability is proved via Lyapunov theory. Simulation and experimental results demonstrate that the proposed method achieves favorable performance in robustness, human-robot interaction safety, and dynamic response, validating its feasibility and effectiveness in practical human-robot interaction scenarios.

Keywords cable-driven soft robot; human-robot interaction; human-inspired decision; state-attracted control

Citation Peng Jin-Zhu, Wang Zi-Hao, Yang Yao-Yu, Fan Peng-Hui, Liu Ya-Qiang. State-attracted control of cable-driven soft robot with human-inspired decision-making integration. *Acta Automatica Sinica*, 2026, 52(5): 1-13

收稿日期 2025-11-30 录用日期 2026-03-04

Manuscript received November 30, 2025; accepted March 4, 2026

国家自然科学基金(62203398,62273311), 河南省杰出青年科学基金(242300421051), 河南省杰出外籍专家项目(GZ2025001)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62203398,62273311), Henan Provincial Science Foundation for Distinguished Young Scholars (242300421051), and Outstanding Foreign Scientist Project in Henan Province (GZ2025001)

本文责任编辑 贺威

Recommended by Associate Editor HE Wei

1. 郑州大学电气与信息工程学院 郑州 450001

1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001

随着新一代机器人技术在智能制造、医疗康复及人机协作等领域的快速发展, 机器人系统对安全性、柔顺性与环境适应能力提出更高要求. 传统刚性机械臂虽然在高精度、高负载作业中表现突出, 但其结构刚性强、柔顺性不足, 在复杂环境或人机共融场景下易引发安全隐患, 难以满足未来机器人向柔性化、智能化、类人化发展的需求. 在此背景下, 软体机器人因其连续可变形结构和良好的环境适应能力, 在人机交互、柔性操作及安全协作等方

面展现出显著优势^[1-4], 逐渐成为机器人领域的重要研究方向。

绳驱动软体机器人通过将柔性本体与绳索传动方式相结合, 在实现结构轻量化和高柔顺性的同时, 兼具较大的工作空间和较强的驱动力输出, 具有结构简单、易于模块化设计等优势, 在安全人机交互和柔性操作等场景中展现出良好的应用潜力^[5-7]。然而, 软体材料固有的强非线性和大变形特性, 以及绳传动引入的多自由度耦合效应和参数不确定性, 使系统呈现出显著的非线性和不确定性特征, 导致绳驱动软体机器人动力学建模与控制设计面临较大的挑战^[8-9], 尤其在外部扰动和参数不确定性作用下, 系统状态的稳定收敛与可靠控制难以保障。

在软体机器人建模方面, 由于其通常具有分布参数、多自由度耦合等特性, 经典刚体动力学建模方法难以直接适用, 且模型精度高度依赖复杂的边界条件与参数设定。为在建模精度与复杂度之间取得平衡, 常曲率假设被广泛应用于连续体软体机器人的建模研究中。该方法通过将连续柔性结构等效为若干具有恒定曲率的弯曲段, 在保证物理合理性的同时显著简化运动学与动力学分析过程, 已在多种软体机器人系统中得到验证。基于常曲率建模框架, 已有研究开展了部分探索, Huang 等^[10]利用常曲率方法完成软体机器人的运动学建模; 耿鹏等^[11]基于常曲率假设构建柔性机械臂的运动学与动力学模型, 为软体机械臂的建模与控制研究提供了重要参考; Caasenbrood 等^[12]则在分段常曲率框架中融入降阶计算策略, 建立面向控制的高效动力学模型; Alkayas 等^[13]通过正交基分解构建软体动力学降阶模型, 实现运动学行为精准描述并显著降低计算复杂度; Kazemipour 等^[14]进一步结合拉格朗日动力学提出自适应动态滑模控制方法, 提升了软体机器人在复杂环境中的适应能力。上述研究表明, 基于常曲率假设并结合拉格朗日动力学框架对绳驱动软体机器人进行建模, 为后续控制策略的设计与分析提供了有效的理论支撑。

在驱动方式方面, 软体机器人可采用电缆驱动、液压驱动、气动驱动以及磁驱动等多种形式。电缆驱动利用电缆作为力传递介质, 将驱动力引入柔性结构, 其技术体系较为成熟, 但顺应性相对有限^[15-16]; 液压驱动具有较大的输出力矩和较高的控制精度, 但液体的惯性和密度可能引入额外的误差以及存在泄漏问题^[17-18]; 气动驱动因结构轻便、响应速度快而被广泛应用, 但执行器腔体通常需要支撑材料, 增加系统复杂度并限制了微型化发展^[19-20]; 磁驱动可实现亚毫米级软体机器人构建, 但对磁场生成设备

的依赖较强, 存在体积大、能耗高等问题^[21-22]。相比之下, 绳驱动方式结构简单, 具备广阔的工作空间和高度的灵活性, 能够满足软体机器人在大多数场景下的工作要求。Qi 等^[23]受章鱼触手结构与运动机理启发, 提出一种新型多节绳驱动软体机械臂, 在运动灵活性和可达工作空间方面表现出显著优势; Zhou 等^[24]设计一种绳驱动软体机械手, 实现了较高水平的灵巧抓取与操作能力; Yang 等^[25]将绳驱动软体结构引入医疗介入内窥镜系统, 实现了高精度操控与可变刚度调节, 体现其在胃肠道内窥镜手术中的重要应用。综上所述, 绳驱动方式在仿生结构合理性与工程实现可行性方面均展现出显著优势。

在复杂交互环境中, 外部扰动和模型不确定性对软体机器人轨迹跟踪性能和系统稳定性提出更高要求。现有研究多聚焦于提升软体机械臂在特定任务下的控制精度与鲁棒性, 如 Garriga-Casanovas 等^[26]利用正逆运动学解析和条件约束方程实现六自由度机器人的轨迹控制, 但此方法仅考虑运动姿态, 没有考虑机器人受力情况; Thuruthel 等^[27]提出一种基于模型的强化学习方法, 用于软体机械臂的高精度轨迹跟踪, 但在持续外部扰动作用下, 其稳定性和收敛性能仍存在一定局限。因此, 引入能够在不确定条件下约束系统状态演化方向的控制机制具有重要研究意义。近年来, 状态吸引控制作为一种有效的非线性控制策略, 通过构造吸引域或吸引向量场, 引导系统状态向期望目标区域收敛, 在欠驱动系统和不确定系统控制中展现出良好的鲁棒性和稳定性^[28]。状态吸引函数 (state-attracted function, SAF) 通过构造具有全局收敛特性的状态吸引面, 引导跟踪误差沿期望方向演化, 在存在外部扰动时仍能有效抑制超调并保证系统稳定性, 从而使机器人的实际轨迹收敛至期望路径。Yang 等^[29]提出一种基于向量场的状态吸引控制方法, 显著降低了系统对干扰的敏感性。然而, 现有状态吸引控制方法多依赖固定控制律或较精确的模型信息, 难以充分利用人类在复杂环境中表现出的经验性决策和自适应调节能力, 从而在多任务、多约束条件下的灵活性和智能水平仍然受限。

仿人决策机制通过模拟人类在复杂环境中感知、判断、动作选择的决策过程, 为机器人系统在不确定条件下实现灵活、自适应控制提供一种有效途径。与依赖精确模型或固定控制律的传统方法不同, 人类在执行操作任务时往往能够综合环境信息、任务目标和安全约束, 基于经验对当前状态进行快速评估, 并动态调整运动策略, 从而在复杂、动态甚至信息不完备的环境中保持较高的任务完成率和安全

性. 这种以经验驱动、目标导向和约束感知为特征的决策机制, 为提升机器人系统在复杂交互场景下的自主性和适应性提供了重要支撑. 近年来, 仿人决策相关研究逐渐从高层任务规划拓展至运动控制与轨迹生成层面, 通过引入学习模型对人类决策行为进行建模, 使机器人能够在多约束条件下实现类人的策略选择^[30-32]. 然而, 现有研究多侧重于将仿人决策作为独立的高层规划模块, 与底层控制系统之间的耦合相对松散, 难以在保证系统稳定性的同时实现决策与控制的协同优化. 特别是在软体机器人系统中, 受强非线性、参数不确定性及外部扰动等因素影响, 单纯依赖模型驱动或规则驱动的控制策略往往难以及时响应环境变化, 限制了系统在复杂人机交互场景下的应用效果.

综上所述, 本文围绕融合仿人决策的绳驱动软体机器人状态吸引控制问题展开研究. 受动物生物学特性启发, 首先, 设计并实现了一种仿生绳驱动软体机器人原型, 并建立其运动学与动力学模型, 分析柔性结构与绳驱动耦合作用下系统所呈现的非线性与不确定性特征; 其次, 通过采集人类决策数据训练脉冲神经网络 (spiking neural network, SNN), 构建仿人决策模型, 实现复杂环境下的避障决策与期望轨迹的在线更新; 再者, 引入状态吸引函数, 设计融合仿人决策的状态吸引控制方法, 对轨迹跟踪误差的演化方向进行约束, 并在理论层面对闭环系统的稳定性进行分析; 最后, 通过仿真与实物实验验证所提出控制策略在稳定性、鲁棒性及控制性能方面的有效性. 本文的主要贡献概括如下:

- 1) 设计并实现一种仿生绳驱动的软体机器人原型, 通过舵机驱动绳索拉伸柔性结构实现执行器的弯曲与偏转, 末端集成吸盘结构以模拟象鼻与壁虎脚趾的功能, 并建立完整的运动学与动力学模型;
- 2) 构建一种基于脉冲神经网络的仿人决策模型, 通过学习人类决策行为, 使绳驱动软体机器人能够在复杂环境中实现自主避障决策, 并对其期望运动轨迹进行在线自适应更新;
- 3) 基于状态吸引面设计一种状态吸引函数控制律, 在保证跟踪误差快速、平稳收敛的同时, 有效抑制系统振荡, 提升了绳驱动软体机器人在人机交互场景下的鲁棒性与安全性.

本文结构安排如下: 第 1 节介绍仿生绳驱动软体机器人的结构设计与控制系统架构, 并建立其运动学与动力学模型; 第 2 节基于脉冲神经网络构建仿人决策模型; 第 3 节基于状态吸引面设计状态吸引函数控制律, 对跟踪误差的收敛性进行约束, 并在理论层面开展稳定性分析; 第 4 节和第 5 节分别

通过仿真与实物实验验证所提出方法的有效性; 第 6 节对全文工作进行总结与展望.

1 绳驱动软体机器人设计及建模

本节介绍绳驱动软体机器人 (cable-driven soft robot, CDSRA) 的结构设计与建模方法. 首先设计了 CDSRA 硬件结构与控制系统架构, 在此基础上分析驱动空间、关节空间与工作空间之间的映射关系; 进而建立 CDSRA 的运动学、动力学模型以及相机的运动学模型, 为后续控制策略设计与实验验证奠定基础.

1.1 硬件结构与控制系统架构设计

为满足柔性操作与安全人机交互场景下对高柔顺性、较大工作空间以及一定负载能力的综合需求, 本文设计了一种仿生 CDSRA 结构, 如图 1 所示. 该结构通过绳驱动方式实现柔性本体的连续变形, 在保证系统轻量化的同时, 兼顾运动灵活性与末端操作能力. 在仿生设计方面, 机器人整体结构在功能层面借鉴了生物体柔性肢体的运动特性. 大象鼻子具有高度的灵活性并能够实现较大的承载能力; 壁虎脚趾表面的微结构可通过非黏附式物理机制实现对物体表面的有效附着, 从而辅助其完成攀爬等复杂运动行为. 受上述生物学特性启发, 本文在软体执行器末端集成吸盘结构, 以增强末端与环境的交互与抓附能力.

如图 2 所示, CDSRA 控制系统由上位机 PC 与下位控制单元组成, 两者之间通过 UART 串行通信实现数据交互. PC 端利用 Intel 深度相机采集环境图像并获取末端执行器的位姿信息, 随后将相关数据发送至下位控制单元; 下位控制单元根据接收到的控制指令驱动飞特舵机, 带动双层伺服盘转动以实现绳索驱动, 同时将系统运行状态实时反馈至 PC 端, 从而构成闭环控制系统.

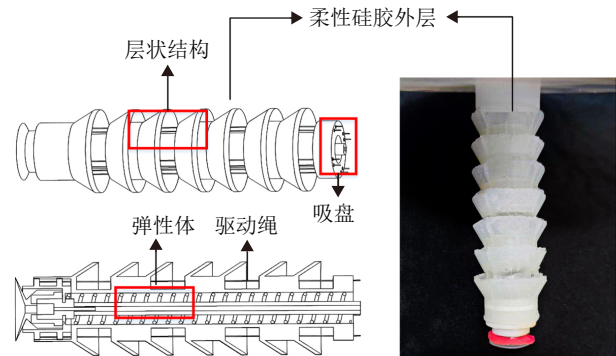


图 1 CDSRA 的硬件结构

Fig.1 Hardware structure of CDSRA

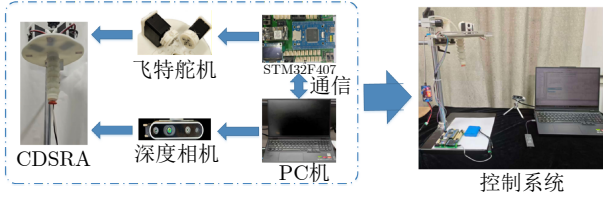


图 2 CDSRA 控制系统架构

Fig. 2 Control system architecture of CDSRA

1.2 运动学建模

如图 3 所示, 建立 CDSRA 的坐标系, 以 CDSRA 与基准之间的中心点作为基准坐标系的原点 O , 选取驱动绳 1 和驱动绳 2 的方向分别作为 x 轴和 y 轴, z 轴垂直于 xOy 平面, 从而构建基准坐标系. R_d 表示伺服盘半径, R 为驱动绳与 CDSRA 中心轴之间的垂直距离, L 为驱动绳的初始长度, r 为弯曲半径. 为描述软体执行器的弯曲状态, 引入弯曲角 θ 表征其弯曲程度, 引入偏转角 ϕ 表示弯曲平面与正 x 轴之间的夹角. 进一步, 定义旋转角驱动空间 (ρ_1, ρ_2) 以及由弯曲角与偏转角构成的关节空间 (θ, ϕ) .

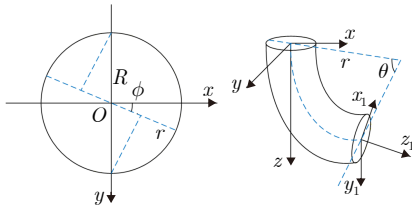


图 3 CDSRA 的坐标系和位姿参数

Fig. 3 Coordinate system and pose parameters of CDSRA

由于 CDSRA 由柔性材料构成, 其在运动过程中横截面形变较小, 绳索张力变化相对平缓, 且重力矩的最大值仅约占驱动扭矩的 9.4%. 因此, 在运动学建模过程中, 可在保证建模精度的前提下, 对系统作如下假设:

假设 1. CDSRA 的主体可简化为圆柱体结构.

假设 2. CDSRA 在弯曲过程中始终保持恒曲率圆弧.

假设 3. 重力对 CDSRA 控制主体弯曲行为的影响可以忽略.

在上述假设条件下, 参考 Yang 等^[29] 的建模思路, 可以推导得到从关节空间到驱动空间的正运动学映射关系为

$$\rho_1 = \frac{\theta R \cos \phi}{R_d}, \quad \rho_2 = \frac{\theta R \sin \phi}{R_d} \quad (1)$$

根据恒曲率模型, 可建立关节空间到工作空间

的正运动学关系, 其末端位姿可表示为

$$\begin{cases} x = \frac{L \cos \phi (1 - \cos \theta)}{\theta} \\ y = \frac{L \sin \phi (1 - \cos \theta)}{\theta} \\ z = \frac{L \sin \theta}{\theta} \end{cases} \quad (2)$$

为实现由工作空间位姿反求关节变量, 进一步可由式 (2) 推导得到偏转角 ϕ 为

$$\phi = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right), & x > 0, y \neq 0 \\ \text{sgn}(y) \cdot \pi + \arctan\left(\frac{y}{x}\right), & x < 0, y \neq 0 \\ \frac{\pi}{2} \text{ 或 } -\frac{\pi}{2}, & x = 0 \\ 0 \text{ 或 } \pi, & y = 0 \end{cases} \quad (3)$$

在获得偏转角的基础上, 可进一步求得弯曲角 θ 为

$$\theta = \begin{cases} \arcsin\left(\frac{2z\sqrt{x^2+y^2}}{x^2+y^2+z^2}\right), & \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - \arcsin\left(\frac{2z\sqrt{x^2+y^2}}{x^2+y^2+z^2}\right), & \theta > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4)$$

1.3 动力学建模

为分析 CDSRA 在绳驱动作用下的动态响应特性, 本文采用拉格朗日方法对其动力学行为进行建模. 该方法通过构造拉格朗日函数, 在不显式求解系统约束条件的情况下即可建立系统动力学模型, 形式如下:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial(E-U)}{\partial \dot{C}} \right) - \frac{\partial(E-U)}{\partial C} = \tau \quad (5)$$

其中, E 和 U 分别表示系统的总动能和总势能, C 为广义坐标, τ 为对应的广义扭矩.

如图 4 所示, 为便于动力学分析, 将 CDSRA 的弯曲运动等效为连杆 SO 与 SO_1 的组合运动. 其中, SO 始终与 z 轴方向保持一致, 其长度为 l_0 ; 连

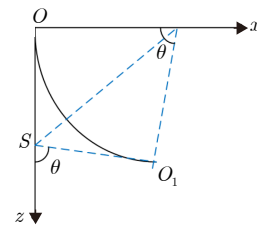


图 4 CDSRA 的动力学建模分析

Fig. 4 Dynamic modeling analysis of CDSRA

杆 SO_1 的长度为 l_1 . 随着弯曲角 θ 的变化, 连杆长度发生相应变化, 从而引起内部压力变化并储存弹性势能. 由几何关系可得 $l_0 = l_1 = (L \tan(\theta/2))/\theta$. 考虑到 θ 的变化对 l_0 和 l_1 的影响较小, 基于小角近似理论, 可进一步简化为 $l_0 = l_1 = L/2$. 因此, 在后续分析中可将连杆连接件的长度视为常数.

在上述等效模型基础上, 分别对弯曲角 θ 和偏转角 ϕ 的动力学特性进行建模. 针对弯曲运动过程, CDSRA 会积累动能, 其主要来源包括: 连杆 SO_1 绕 SO 转动产生的动能 $E_{\theta 1}$ 、 SO 自身长度变化产生的动能 $E_{\theta 2}$ 、 SO 牵引 SO_1 沿 z 轴运动产生的动能 $E_{\theta 3}$ 以及 SO_1 纵向伸缩产生的动能 $E_{\theta 4}$. 因此, 弯曲角对应的总动能可表示为

$$E_{\theta} = E_{\theta 1} + E_{\theta 2} + E_{\theta 3} + E_{\theta 4} = \frac{1}{48} mL^2 (\dot{\theta})^2 \quad (6)$$

其中, m 为驱动绳的总质量. 各分量具体表达式为

$$\begin{cases} E_{\theta 1} = \frac{1}{n} J_1 (\dot{\theta})^2 + \frac{1}{12} m l_1^2 (\dot{\theta})^2 \\ E_{\theta 2} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left(\frac{m}{2n} \right) (\dot{i}_{l_0})^2 + \frac{1}{12} m (\dot{i}_{l_0})^2 \\ E_{\theta 3} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left(\frac{m}{2n} \right) (\dot{i}_{l_0})^2 + \frac{1}{4} m (\dot{i}_{l_0})^2 \\ E_{\theta 4} = \frac{1}{12} m (\dot{i}_{l_1})^2 \end{cases} \quad (7)$$

其中, SO 被划分为 n 个等效段, 通过逐段计算并累加其动能得到 $E_{\theta 2}$; J_1 表示连杆 SO_1 的转动惯量.

弯曲过程中系统的势能主要包括连杆 SO 的重力势能 $U_{\theta 1}$ 、 SO 长度变化引起的 SO_1 重力势能 $U_{\theta 2}$ 以及 SO_1 绕参考点旋转产生的势能 $U_{\theta 3}$. 综合上述因素, 弯曲角对应的总势能可表示为

$$U = U_{\theta 1} + U_{\theta 2} + U_{\theta 3} = \frac{1}{8} mgL (\cos \theta - 1) \quad (8)$$

$$\begin{cases} U_{\theta 1} = \frac{1}{4} mg \left(l_{SO} - \frac{1}{2} L \right) \\ U_{\theta 2} = \frac{1}{2} mg \left(l_{l_0} - \frac{1}{2} L \right) \\ U_{\theta 3} = \frac{1}{4} mg \left(l_{SO_1} \cos \theta - \frac{1}{2} L \right) \end{cases} \quad (9)$$

其中 g 为重力加速度常数.

将上述动能与势能表达式代入拉格朗日方程, 并在平衡点附近进行合理线性化 ($\sin \theta \approx \theta$), 可得弯曲角 θ 的动力学模型为

$$\frac{1}{24} mL^2 \ddot{\theta} - \frac{1}{8} mgL \theta = \tau_{\theta} \quad (10)$$

其中, τ_{θ} 表示弯曲角的输入扭矩.

在弯曲角 θ 保持不变的条件下, 重力势能在 ϕ 方向上的变化可以忽略, 即 $U \approx 0$. 此时, 偏转角对应的总动能可表示为

$$E_{\phi} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \frac{m}{n} \left\{ r \left[1 - \cos \left(\frac{i-1}{n} \theta \right) \right] \dot{\phi} \right\}^2 = \frac{mr^2 \dot{\phi}^2}{2} \left[\frac{3}{2} + \frac{1}{2} \frac{\sin(2\theta)}{2\theta} - \frac{2 \sin \theta}{\theta} \right] \quad (11)$$

其中, τ_{ϕ} 为偏转角 ϕ 的输入扭矩.

需要指出的是, 上述动力学模型未考虑外界干扰和建模不确定性的影响. 为更贴近实际应用场景, 在模型中进一步引入不确定项和扰动项, 弯曲角和偏转角的动力学方程可分别表示为

$$\ddot{\theta} = \frac{3g\theta}{L} + \frac{24}{mL^2} \tau_{\theta} + \varepsilon_{\theta} + \sigma_{\theta} \quad (12)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{\tau_{\phi}}{mr^2 \left[\frac{3}{2} + \frac{1}{2} \frac{\sin(2\theta)}{2\theta} - \frac{2 \sin \theta}{\theta} \right]} + \varepsilon_{\phi} + \sigma_{\phi} \quad (13)$$

其中, ε_{θ} 和 ε_{ϕ} 表示建模不确定项, σ_{θ} 和 σ_{ϕ} 表示外界扰动项.

由式 (12) 和 (13) 可以看出, 弯曲角与偏转角之间存在显著的非线性耦合关系, 这在一定程度上增加了系统控制设计的复杂性. 为便于后续理论分析并提高方法在实际应用中的可行性, 结合 CDSRA 的硬件结构特性, 本文作如下假设:

假设 4. 不确定项 ε_{θ} 和 ε_{ϕ} 为未知但有界函数, 扰动项 σ_{θ} 和 σ_{ϕ} 为未知且连续的有界函数.

1.4 相机运动学建模

在安全人机交互场景中, 为实时避免机器人末端执行器与人手发生意外接触, 视觉传感器需要对 CDSRA 末端执行器及人手的空间位置信息进行持续监测. 然而, 由于人手坐标系与末端执行器坐标系之间并不一致, 难以直接进行空间关系判断, 因此有必要对相机系统进行运动学建模, 以实现不同坐标系之间的统一描述与转换.

在 CDSRA 系统中, 末端执行器的位置由视觉传感器实时获取, 其空间关系可通过一系列坐标变换进行描述. 因此, 定义 M_c^m 为从相机坐标系到标定板坐标系的变换矩阵, M_m^e 为从标定板坐标系到末端执行器坐标系的变换矩阵, M_e^b 为从末端执行器坐标系到基准坐标系的变换矩阵. 根据坐标变换关系可得

$$M_m^e = (M_e^b)^{-1} \cdot M_c^b \cdot (M_c^m)^{-1} \quad (14)$$

其中, M_c^m 可通过相机对标定板的检测获得; M_e^b 可

由末端执行器的运动学模型计算得到; 由于标定板相对于末端执行器的位置固定, M_m^e 在系统运行过程中保持不变。

当 CDSRA 的末端执行器分别运动至两个不同位姿时, 可进一步得到如下关系:

$$M_{e2}^b \cdot (M_{e1}^b)^{-1} \cdot M_{c1}^b = M_{c2}^b \cdot (M_{c2}^m)^{-1} \cdot M_{c1}^m \quad (15)$$

基于上述关系, 采用 Tsai-Lenz 方法^[33] 可求解相机坐标系到基准坐标系的变换矩阵 M_c^b , 从而完成相机坐标系与末端执行器坐标系之间的标定。

在视觉定位过程中, 相机通过实时检测末端执行器吸盘区域的红色特征来确定执行器在相机坐标系中的位姿。同时, 可进一步获得人手在末端执行器坐标系下的坐标, 其变换关系为

$$X_h = M_m^e X_c \quad (16)$$

其中, X_c 表示人手在相机坐标系中的坐标。

2 基于脉冲神经网络的仿人决策模型

在人机交互场景中, 动态避障是保障系统安全运行的关键问题。传统基于最小安全距离或固定阈值的方法在交互者快速运动或环境变化时, 难以准确反映潜在风险, 系统的安全性与环境适应能力受到限制。为此, 本文提出一种基于脉冲神经网络的仿人决策模型, 该模型不依赖预设安全阈值或固定规则, 而是通过大量真实人类交互数据进行训练, 学习人类在动态交互场景中的决策模式, 实现对 CDSRA 启停状态的判别及期望轨迹的在线更新, 从而进一步提升系统在人机交互过程中的安全性与环境适应能力。

2.1 人类决策数据采集与处理

实验在尺寸为 2.0 m × 1.5 m 的人机交互实验台上进行, 受试者搬运物体至随机生成的目标位置, 并在接近障碍物或与机器人发生潜在冲突前作出避障决策。当标记点成功到达目标位置时, 将其视为完成任务, 即数据有效。实验共邀请 10 名受试者参与, 并平均分为 5 组, 每组收集 2000 组数据, 其中 1000 组用于人机交互场景, 另外 1000 组用于避障场景。

为获取高精度空间信息, 实验采用 4 台 VICON 相机对受试者运动进行实时追踪, 并在受试者手臂上布置 3 个标记点, 用于采集人手的三维空间坐标。由于多相机系统中各相机坐标系存在差异, 需对原始数据进行统一坐标转换与预处理, 以确保数据的一致性和可用性。

实验中所采集的数据包括: 人手与 CDSRA 末

端执行器之间的距离 D_d 、传递者手部位置 D_1 、接收者手部位置 D_2 、人手与机械臂之间距离的变化速度 D_v 以及手部相对位姿方向信息。人手与 CDSRA 末端执行器的距离定义为:

$$D_d = \sqrt{(D_{2x} - D_{1x})^2 + (D_{2y} - D_{1y})^2 + (D_{2z} - D_{1z})^2} - r \quad (17)$$

其中, $D_1 = [D_{1x}, D_{1y}, D_{1z}]^T$, $D_2 = [D_{2x}, D_{2y}, D_{2z}]^T$; r 表示末端执行器的等效半径。

为引入动态信息, 人手与机械臂之间距离的变化速度 D_v 为

$$D_v = \frac{D - D_{LD}}{\Delta_t} \quad (18)$$

其中, D_{LD} 为上一时刻的距离值, Δ_t 为采样时间间隔。

此外, 为描述人手相对位置的空间方向信息, 将相对位移向量归一化, 定义单位方向向量 D_e 为

$$D_e = \frac{|D_{2x} - D_{1x}, D_{2y} - D_{1y}, D_{2z} - D_{1z}|^T}{\sqrt{(D_{2x} - D_{1x})^2 + (D_{2y} - D_{1y})^2 + (D_{2z} - D_{1z})^2}} \quad (19)$$

其中, D_{1x}, D_{1y}, D_{1z} 分别为传递者手部在 x, y, z 坐标轴上的空间坐标; D_{2x}, D_{2y}, D_{2z} 分别为接收者手部在 x, y, z 轴上的空间坐标。

在获得完整的人机交互决策数据集后, 按照 7 : 1 : 2 的比例将数据划分为训练集、验证集和测试集。基于该数据集, 构建以泄漏积分-触发 (leaky integrate-and-fire, LIF) 神经元为基本单元的 SNN 模型, 其网络结构包括一个 LIF 神经元层和两个全连接层, 输入维度为 5, 输出维度为 2, 对应“启动”和“停止”两种决策状态。网络训练过程中, 初始学习率设为 0.02, 批次大小为 32, LIF 神经元漏率为 80%, 采用自适应矩估计优化算法, 损失函数选用交叉熵损失。通过对已有数据集进行特征驱动训练, 在提高训练效率的同时有效降低了系统能耗, 训练过程中未出现明显的过拟合现象。图 5 给出仿人决策 (human-inspired decision, HID) 模型在测试集上的混淆矩阵。通过混淆矩阵, 计算出 HID 模型的性能指标^[34], 其准确率为 99.1%, 特异性为 97.8%, F1 得分为 98.9%, 单个样本平均分类耗时为 6×10^{-5} s, 表明所构建的仿人决策模型在实时性和判别性能方面均具有良好表现。

2.2 HID 模型的自适应机制

尽管前述实验结果表明, 所构建的 HID 模型能够以较高精度和较低能耗实现仿人决策, 但在实际人机交互过程中, 当系统长期处于安全环境或交互风险较低的状态时, 持续保持高频率的决策更新并

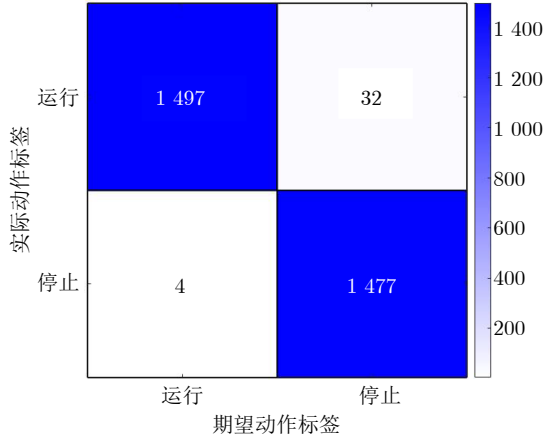


图 5 HID 模型的混淆矩阵

Fig. 5 Confusion matrix of the HID model

非必要, 反而会带来额外的计算与通信损耗. 因此, 为在保证交互安全性的前提下进一步提升系统运行效率, 本文引入一种 HID 模型的自适应机制, 用于动态调节决策频率以及计算与通信资源的分配. 该自适应机制可表示为:

$$\Delta_{tA} = 0.001 + k_1 \arctan(k_2 O_d) \quad (20)$$

其中, k_1 和 k_2 为正常数; Δ_{tA} 表示 HID 模型中相邻两次检测之间的时间步长, 且满足 $\Delta_{tA} \in [0.001, k_1\pi/2]$; O_d 为传递者和接收者之间的距离.

通过调节参数 k_1 和 k_2 , 模型可根据交互风险程度自适应调整决策步长, 在低风险状态下降低决策频率, 从而有效减少计算与通信成本, 而在高风险状态下则保持较高的响应速度. 需要指出的是, HID 模型通过对 CDSRA 的运行与停止状态进行切换来保障安全交互, 这一决策过程将直接影响系统的期望轨迹更新方式. 因此, 期望轨迹应根据 HID 模型的输出模式进行相应调整, 其表达式为

$$X_r = \begin{cases} X_r(t_e), & K_{out} = \text{运行模式} \\ X_r(t_s), & K_{out} = \text{停止模式} \end{cases} \quad (21)$$

其中, $t_s = t - t_{sum}$, t_{sum} 表示 HID 模型处于运行模式的累计时刻; t_e 为 HID 模型由停止模式切换至运行模式时的决策时刻; K_{out} 表示 HID 模型的输出状态, 即运行模式或停止模式.

3 绳驱动软体机器人状态吸引控制设计

本节围绕绳驱动软体机器人的状态吸引控制问题展开研究, 给出状态吸引面的整体设计思路, 并在此基础上构建相应的状态吸引函数控制律. 该控制策略以提升 CDSRA 的鲁棒性及人机交互过程中的运行安全性为目标, 根据跟踪误差大小自适应调

节系统的控制响应特性. 当跟踪误差较大时, 在保证误差逐步收敛的同时限制控制力矩幅值, 从而避免末端执行器产生剧烈运动, 提高交互安全性; 当跟踪误差较小时, 控制律增强系统的收敛速度, 使误差能够快速趋近于零, 以提升系统的动态响应性能和轨迹跟踪精度.

3.1 状态吸引面构造

基于状态吸引函数 (state-attracted function, SAF) 的状态吸引控制方法, 主要通过构造状态吸引面, 引导系统的跟踪误差沿预定方向收敛至原点附近的一个小邻域内, 从而有效削弱外部扰动对系统状态轨迹的影响. 因此, 针对 CDSRA 系统中存在的跟踪误差收敛问题, 本文将状态吸引面定义为

$$\Phi(x_n) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(x_n) = \sum_{i=1}^n P_i(x_n) Q_i(x_n) I_i \quad (22)$$

其中, $P_i(x_n)$ 为速度函数, 控制状态吸引面的强度; $Q_i(x_n)$ 为方向函数, 控制状态吸引面的方向; I_i 表示对应维度的单位基向量.

为了保证所构造状态吸引面 $\Phi(x)$ 具有良好的全局收敛性和有界性, 需要对速度函数 $P(x)$ 和方向函数 $Q(x)$ 做出以下两个定义:

定义 1. 对于任意状态变量 x , 速度函数 $P(x)$ 满足

$$P(x) \in [\varepsilon_P, K_P)$$

且关于 x 单调递减并有界. 其中, ε_P 为接近零的正常数, K_P 为 $P(x)$ 的上界.

定义 2. 对于任意状态变量 x , 方向函数 $Q(x)$ 满足

$$Q(x) \in [-K_Q, K_Q)$$

且关于 x 单调递减并有界. 其中, $Q(0) = 0$, K_Q 为方向函数的界.

3.2 SAF 控制律设计

根据定义 1, 速度函数设计为:

$$P(x) = k_a \left(\frac{|x|}{1+x^2} + \varepsilon_x \right) \quad (23)$$

其中, k_a 为正常数, 用于调节状态吸引面的吸引强度; ε_x 为接近零的正常数. 由此可知, $P(x) \in [k_a\varepsilon_x, k_a + \varepsilon_x)$ 满足有界性及单调性的要求.

根据定义 2, 方向函数设计为:

$$Q(x) = -\arctan(k_b x) \quad (24)$$

其中, k_b 为正常数, 用于调节状态吸引面的收敛速

度. 显然, $Q(x) \in (-\pi/2, \pi/2)$, 且关于 x 单调递减并有界.

将上述速度函数和方向函数代入式 (22), 状态吸引面可表示为

$$\Phi(x) = P(x)Q(x) = -k_a \left(\frac{|x|}{1+x^2} + \varepsilon_x \right) \arctan(k_b x) \quad (25)$$

由于 $P(x)$ 和 $Q(x)$ 均为有界函数, 可进一步得到 $|\Phi(x)| \leq k_a(1+2\varepsilon_x)/4$, 从而说明 $\Phi(x)$ 本身是有界的.

为分析状态吸引面的光滑性, 对 $\Phi(x)$ 关于 x 求导, 得到

$$\frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} = \frac{\partial P(x)}{\partial x} Q(x) + P(x) \frac{\partial Q(x)}{\partial x} \quad (26)$$

其中, 速度函数和方向函数对 x 的导数分别为

$$\frac{\partial P(x)}{\partial x} = -\frac{k_a(1-x^2)\text{sgn}(x)}{(1+x^2)^2} \quad (27)$$

$$\frac{\partial Q(x)}{\partial x} = \frac{k_b}{1+(k_b x)^2} \quad (28)$$

当 $x \rightarrow 0$ 时, 有 $\frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} \rightarrow k_a k_b \varepsilon_x$, 表明 $\Phi(x)$ 在 $x=0$ 处连续可微. 此外, 由上述表达式可知, $\frac{\partial P(x)}{\partial x} \in (-1, 1)$, $\frac{\partial Q(x)}{\partial x} \in (0, k_b)$, 从而可得

$$\left| \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} \right| \leq \frac{\pi}{2} + k_a k_b \left(\varepsilon_x + \frac{1}{2} \right) \quad (29)$$

综上分析, 基于式 (23) ~ (25) 可证明所构造的状态吸引函数 $\Phi(x)$ 对 x 是有界且连续可微的. 因此, 针对系统中存在的跟踪误差收敛问题, 最终将 SAF 设计为

$$\Phi(x) = -k_a \left(\frac{|x|}{1+x^2} + \varepsilon_x \right) \arctan(k_b x) \quad (30)$$

因此, 弯曲角 θ 和偏转角 ϕ 的状态吸引函数可分别表示为

$$\Phi(\theta) = -k_{a\theta} \left(\frac{|\theta|}{1+\theta^2} + \varepsilon_m \right) \arctan(k_{b\theta} \theta) \quad (31)$$

$$\Phi(\phi) = -k_{a\phi} \left(\frac{|\phi|}{1+\phi^2} + \varepsilon_m \right) \arctan(k_{b\phi} \phi) \quad (32)$$

其中, $k_{a\theta}$ 、 $k_{b\theta}$ 、 $k_{a\phi}$ 和 $k_{b\phi}$ 均为正常数, ε_m 为接近零的正常数.

定义弯曲角和偏转角的状态吸引误差:

$$e_{a\theta} = \dot{\theta} - \Phi(\theta), \quad e_{a\phi} = \dot{\phi} - \Phi(\phi) \quad (33)$$

基于上述吸引误差定义, 可进一步构造弯曲角和偏转角的 SAF 控制律, 分别为

$$\tau_\theta = -\frac{\lambda_1 m L^2}{24} e_{a\theta} + \frac{72g\theta}{mL^3} \quad (34)$$

$$\tau_\phi = -\lambda_2 m r^2 \left[\frac{3}{2} + \frac{1}{2} \frac{\sin(2\theta)}{2\theta} - \frac{2\sin\theta}{\theta} \right] e_{a\phi} \quad (35)$$

其中, λ_1 和 λ_2 为正常数, 用作控制增益, 以调节系统收敛速度并保证闭环系统的稳定性.

3.3 稳定性分析

为证明闭环系统 (12) 和 (13) 在所设计 SAF 控制律作用下的稳定性, 给出如下定理:

定理 1. 考虑具有有界初始条件的系统 (12) 和 (13), 在假设 1 ~ 4 成立的条件下, 若弯曲角和偏转角的控制输入 τ_θ 和 τ_ϕ 由式 (34) 和 (35) 给出, 则闭环系统 (12) ~ (13) 在扰动存在的情况下是渐近稳定的, 且跟踪误差 e_θ 和 e_ϕ 最终收敛至原点附近的一个小邻域.

证明. 证明过程分为两步: 首先证明吸引误差 $e_{a\theta}$ 和 $e_{a\phi}$ 的有界性, 然后证明跟踪误差 e_θ 和 e_ϕ 的有界性.

步骤 1. 吸引误差 $e_{a\theta}$ 的有界性分析

选取 Lyapunov 函数

$$V_{e_{a\theta}} = \frac{1}{2} e_{a\theta}^2 \quad (36)$$

由式 (29) 可知, $\frac{\partial \Phi_\theta}{\partial e_\theta}$ 是有界的. 对 $V_{e_{a\theta}}$ 求导, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_{e_{a\theta}} &= e_{a\theta} \left(\ddot{\theta} - \ddot{\theta}_d - \frac{\partial \Phi_\theta}{\partial e_\theta} \dot{e}_\theta \right) \leq \\ &-(\lambda_1 + \Lambda_\theta) (e_{a\theta}^2 + e_{a\theta}) R_\theta(t) \end{aligned} \quad (37)$$

其中

$$R_\theta(t) = \varepsilon_\theta + \sigma_\theta - \ddot{\theta}_d - \frac{\partial \Phi_\theta}{\partial e_\theta} \dot{\Phi}_\theta \quad (38)$$

且 Λ_θ 为 $\frac{\partial \Phi_\theta}{\partial e_\theta}$ 的最小值. 根据假设 1, $R_\theta(t)$ 是有界的. 值得注意的是, 多项式 $24\lambda_1/(mL^2)$ 随 λ_1 增大而增大, 因此可通过合理选取 λ_1 , 使得 $\lambda_1 + \Lambda_\theta > 0$ 成立.

根据 Young's 不等式, 有

$$e_{a\theta} \frac{R_\theta(t)}{T_\theta} \leq \frac{1}{2} e_{a\theta}^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{R_\theta(t)}{T_\theta} \right)^2 \quad (39)$$

其中 $T_\theta = \lambda_1 + \Lambda_\theta$.

进一步选取 \mathcal{K} 类函数

$$\rho_\theta = \frac{\left\| \frac{R_\theta(t)}{T_\theta} \right\|}{\sqrt{1-\alpha_\theta}}$$

其中 $\alpha_\theta \in (0, 1)$ 为常数.

当 $\|e_{a\theta}\| \geq \|\rho_\theta\|$ 时, 有

$$\begin{aligned} \dot{V}_{e_{a\theta}} \leq & \frac{1}{2}T_\theta \left[-(1-\alpha_\theta)e_{a\theta}^2 - \alpha_\theta e_{a\theta}^2 + \left(\frac{R_\theta(t)}{T_\theta} \right)^2 \right] \leq \\ & -\frac{\alpha_\theta T_\theta}{2} e_{a\theta}^2 < 0 \end{aligned} \quad (40)$$

因此, $V_{e_{a\theta}}$ 为正定函数, 吸引误差 $e_{a\theta}$ 是一致最终有界的, 其边界可表示为

$$\|e_{a\theta}\| \leq \beta_{e_{a\theta}}(\|e_{a\theta}(0)\|, t) + \gamma_{e_{a\theta}} \left(\sup_{s \in [0, t]} \left\| \frac{R_\theta(s)}{T_\theta} \right\| \right) \quad (41)$$

其中, $\beta_{e_{a\theta}}(\cdot)$ 为 \mathcal{KL} 类函数, $\gamma_{e_{a\theta}}(\cdot)$ 为 \mathcal{K} 类函数.

步骤 2. 跟踪误差 e_θ 的有界性分析

选取 Lyapunov 函数

$$V_{e_\theta} = \frac{1}{2}e_\theta^2 \quad (42)$$

对其求导, 得到

$$\dot{V}_{e_\theta} = e_\theta(\Phi_\theta + E_\theta) = -P(\theta)e_\theta \left[\arctan(k_{b\theta}e_\theta) - \frac{E_\theta}{P(\theta)} \right] \quad (43)$$

由此可得

$$\begin{cases} \dot{V}_{e_\theta} < 0, & \|e_\theta\| > S(t) \\ \dot{V}_{e_\theta} = 0, & \|e_\theta\| = S(t) \\ \dot{V}_{e_\theta} > 0, & \|e_\theta\| < S(t) \end{cases} \quad (44)$$

其中

$$S(t) = \max \left\{ \frac{\tan\left(\frac{e_{a\theta}}{P(\theta)}\right)}{k_{b\theta}}, \tan\left(\frac{2e_{a\theta}}{\pi k_{a\theta}}\right) \right\} \quad (45)$$

由式 (44) 可得, 跟踪误差 e_θ 的边界满足:

$$\|e_\theta\| \leq \beta_{e_\theta}(\|e_\theta(0)\|, t) + \sup_{s \in [0, t]} \|S(s)\| \quad (46)$$

进一步结合式 (33), 可得到误差变化率的边界

$$\|\dot{e}_\theta\| \leq \Phi_\theta + \beta_{e_{a\theta}}(\|e_{a\theta}(0)\|, t) + \gamma_{e_{a\theta}} \left(\sup_{s \in [0, t]} \left\| \frac{R_\theta(s)}{T_\theta} \right\| \right) \quad (47)$$

综上所述, 由式 (44)、(46) 和 (47) 可知, 闭环系统在扰动存在的情况下保持渐近稳定. 由于参数 k_θ 、 k_a 和 k_b 与误差边界耦合, 通过适当增大这些参数可进一步缩小误差收敛邻域; 同时, 参数 λ_1 既影响系统稳定性, 又决定误差界的大小. 因此, 在合理选取参数的情况下, 跟踪误差 e_θ 及其变化率在扰动作用下均收敛至原点附近的小邻域.

对于偏转角 ϕ , 其闭环系统结构与弯曲角情形具有相同形式. 采用与上述相同的分析方法, 可证明闭环系统 (13) 在 SAF 控制律作用下同样渐近稳

定, 且通过适当选取 k_ϕ 、 $k_{a\phi}$ 和 $k_{b\phi}$, 可使跟踪误差 e_ϕ 及其变化率在扰动存在的情况下收敛至原点附近的小邻域. \square

3.4 融合 SAF-HID 控制策略设计

在所提 HID 模型与 SAF 控制律的基础上, 本文针对 CDSRA 系统构建了一种融合 SAF-HID 的控制策略. 该方法的总体控制框架如图 6 所示, 其核心思想在于构建一种“外层决策-内层控制”的双层协同控制结构, 以兼顾人机交互过程中的安全性、鲁棒性与控制精度.

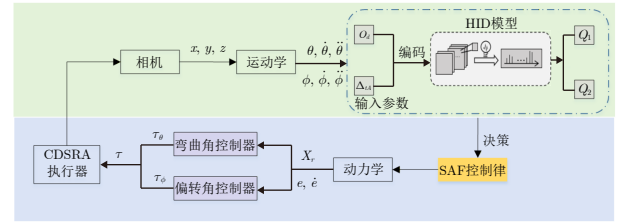


图 6 融合 SAF-HID 控制策略的总体框架
Fig.6 General framework of the integrated SAF-HID control strategy

在该控制框架中, 外层决策模块主要负责环境感知与高层决策. 该模块通过深度相机实时获取 CDSRA 末端执行器、人手及障碍物的三维位置信息, 并将相关感知信息输入 HID 模型, 从而完成基于仿人决策的启停判别. 同时, 外层决策模块结合前述自适应机制, 根据交互风险水平动态调整决策频率与计算资源分配, 在保证安全性的前提下降低系统的计算与通信损耗. 内层控制模块则侧重于精确轨迹跟踪与抗干扰控制, 该模块接收外层 HID 模型输出的决策结果, 并基于 SAF 控制律对 CDSRA 的弯曲角与偏转角进行调节, 通过状态吸引面约束跟踪误差的收敛方向和收敛速度, 从而实现对系统非线性、不确定性及外部扰动的有效抑制.

通过外层决策与内层控制的协同作用, 融合了 SAF-HID 的控制策略能够在安全交互状态下实现稳定、平滑且高精度的轨迹跟踪, 并有效节约计算与通信资源. 而在存在潜在碰撞风险的避障状态下, 系统能够提高决策频率并快速响应环境变化, 从而避免不必要的碰撞行为, 进一步提升人机交互过程中的安全性与系统鲁棒性.

4 仿真实验

本节通过仿真实验对所提出 SAF-HID 控制方法进行验证. 首先, 针对 CDSRA 在人机交互场景中的安全控制问题, 通过对比引入 HID 模型与未引

入 HID 模型的控制策略, 验证了 SAF-HID 方法在面对类似人手的动态障碍物时能够实现有效的安全避障控制. 其次, 针对轨迹跟踪过程中的误差收敛性能, 在系统中引入不确定项和随机扰动, 并将 SAF-HID 方法与经典 PID 控制算法以及神经网络滑模控制 (neural network-sliding mode control, NN-SMC) 算法在控制力矩和误差收敛特性方面进行对比分析, 从而说明所提出控制方法在鲁棒性、安全性及动态响应性能方面的优势.

4.1 参数设置

仿真实验中, 系统的初始状态设定为 $\theta(0) = 0$ 、 $\dot{\theta}(0) = 0$ 、 $\phi(0) = 0$ 和 $\dot{\phi}(0) = 0$. 其中, 弯曲角 θ 的期望轨迹设为常值 $\pi/2$, 偏转角 ϕ 的期望轨迹为时变轨迹, 定义为

$$X_r = \begin{cases} \frac{2\pi t^2}{25}, & 0 < t \leq 2 \\ \frac{8\pi}{25}, & 2 < t \leq 3 \\ \frac{2\pi(t-1)^2}{25}, & t > 3 \end{cases} \quad (48)$$

仿真总时长设为 5 s, 积分步长为 0.001 s. SAF-HID 控制方法的参数配置如下: $k_{a\theta} = k_{a\phi} = 9$, $k_{b\theta} = k_{b\phi} = 1 \times 10^3$, $k_{\theta} = k_{\phi} = 150$.

为模拟系统建模不确定性, 不确定项设置为

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\phi} = 20(\text{sgn}(0.5t) + \cos(0.6t)) \quad (49)$$

同时, 为进一步引入外部扰动因素, 扰动项设定为

$$\sigma_{\theta} = 20(\sin(kt) + \eta_1\dot{\theta} + \eta_2\theta + \eta_3) \quad (50)$$

其中, η_1 、 η_2 和 η_3 为取值范围在 $(-10, 10)$ 内的随机变量.

为验证 SAF-HID 控制方法在动态交互环境下的适应性与抗干扰能力, 在 CDSRA 运行过程中于 2~3 s 时间段引入障碍物, 相应的仿真结果如图 7~9 所示.

4.2 仿真结果分析

为验证 SAF-HID 控制方法在交互安全性与抗扰性能方面的优势, 如图 7 所示, 给出了不同控制策略在动态交互与外部扰动条件下的仿真对比结果. 如图 7(a) 所示, 与未引入 HID 模型的控制方法相比, 结合 HID 模型的 SAF 控制算法能够在交互过程中实现 CDSRA 运行与停止状态的稳定切换. 该方法通过模拟人类决策行为, 在检测到类似人手的动态障碍物时及时调整系统状态, 从而实现有效

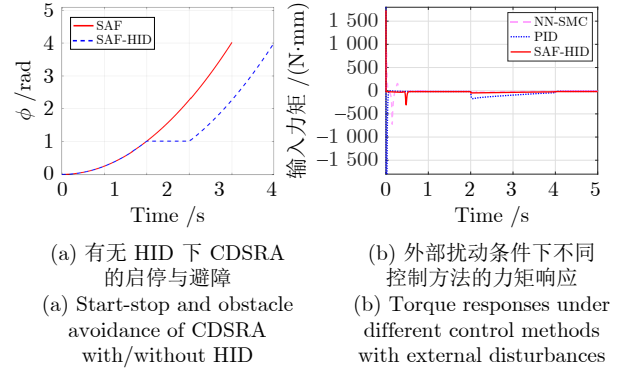


图 7 SAF-HID 控制在交互与扰动条件下的性能对比

Fig. 7 Performance comparison of SAF-HID control under interaction and disturbance conditions

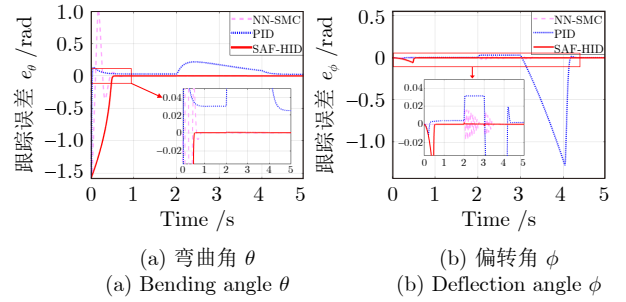


图 8 外部扰动条件下不同控制方法的跟踪误差

Fig. 8 Tracking errors under different control methods with external disturbances

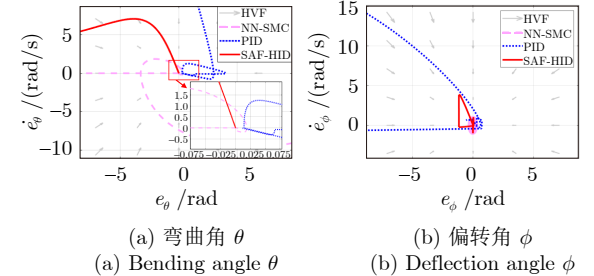


图 9 外部扰动作用下不同控制方法的跟踪误差速度

Fig. 9 Tracking error rates under different control methods with external disturbances

避障, 保障了人机交互过程中的运行安全性. 如图 7(b) 所示, 在无障碍物环境中, 当系统受到外部扰动时, 传统 PID 控制算法产生较大的力矩超调, 且在 $t = 2$ s 之后仍难以收敛至零, 导致系统速度和加速度波动较大, 从而增加了发生碰撞的风险. 相比之下, NN-SMC 控制算法在扰动作用下虽能够维持系统稳定, 但力矩响应过程中仍存在一定幅度的振荡, 影响了交互过程的平稳性. 与上述方法相比, 本文提出的 SAF-HID 控制方法在扰动抑制过程中始终

保持适当幅值的控制力矩, 能够快速完成启停切换并实现平稳响应, 从而保证了交互作业的连续性与安全性。

在跟踪性能方面, 不同控制方法在外界扰动条件下的跟踪误差及其变化率分别如图 8 和图 9 所示. 其中, 灰色箭头表示基于状态吸引面构造的混合向量场 (hybrid vector field, HVF), 反映了误差状态在相平面中的动态演化方向. 可以看出, 传统 PID 控制算法在扰动作用下存在较大的超调现象, 且难以保证跟踪误差稳定收敛至零; NN-SMC 控制算法虽能够实现误差收敛, 但其收敛过程中伴随明显振荡, 整体收敛速度相对较慢. 相比之下, 所提出 SAF-HID 控制方法在扰动存在的情况下仍能够快速响应, 使跟踪误差及其变化率平稳收敛, 体现出更优的动态响应性能与抗扰能力。

综上所述, 仿真结果验证了所提出 SAF-HID 控制方法在外部扰动和动态交互环境下均表现出良好的鲁棒性、适应性和安全性, 为其在实际人机交互场景中的应用提供了有力支撑。

5 实物实验验证

为进一步验证所提出 SAF-HID 控制方法在实际系统中的可行性与有效性, 本节将该方法部署于实际的 CDSRA 原型平台, 并通过多组实物实验对其在安全性、鲁棒性及操作顺应性等方面的性能进行验证. 实验平台由绳驱动软体机械臂本体、伺服驱动单元、视觉感知系统及上位机控制模块组成, 其中 HID 决策模型与 SAF 控制律均以实时方式运行于上位机, 并通过通信接口与执行机构形成闭环控制。

实验内容主要包括两部分: 一是在典型人机协作场景下引入类似人手的动态障碍物, 用以验证 CDSRA 在复杂交互环境中的安全避障能力与启停决策合理性; 二是通过多种物体的抓取、吸附与搬运任务, 评估系统在实际运行过程中的柔顺性、稳定性及对不同操作对象的适应能力. 在安全性验证实验中, 分别部署 PID、NN-SMC 及 SAF-HID 控制算法, 并设置相同的起始点与目标点. 同时在 CDSRA 的运动路径中预先放置类似人手的障碍物, 以对比不同控制策略在避障过程中的控制效果. 实验过程中, 机械臂需要在保证轨迹跟踪精度的同时, 对突发障碍物做出及时响应, 从而避免潜在的碰撞风险. 实验结果如图 10 和 11 所示。

由图 11 可见, 在关节空间的轨迹跟踪过程中, 对于弯曲角 θ , 传统 PID 控制算法在 $t = 2$ s 左右出现明显波动, 在外界干扰存在时难以稳定维持目标

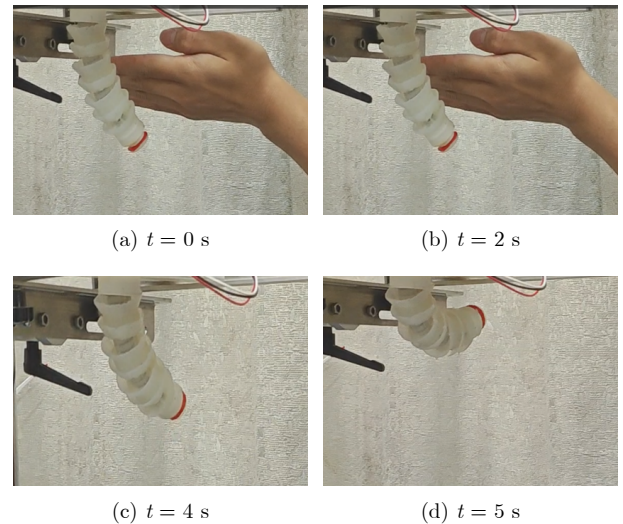


图 10 基于 SAF-HID 控制的 CDSRA 的动态安全避障实验

Fig. 10 Dynamic safe obstacle avoidance of CDSRA under SAF-HID control

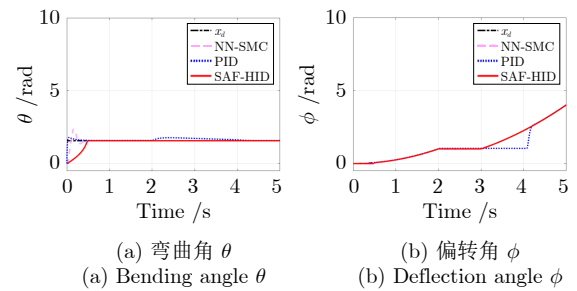


图 11 不同控制方法在关节空间中的避障轨迹

Fig. 11 Joint-space obstacle avoidance trajectories under different control methods

姿态; NN-SMC 控制算法在 $0 \sim 1$ s 区间内产生一定超调, 收敛过程伴随振荡. 相比之下, 所提出 SAF-HID 控制方法能够在保证系统平稳运行的同时实现快速收敛, 表现出更优的动态响应性能与抗扰能力. 对于偏转角 ϕ 的运动过程, PID 控制算法在障碍物移除后存在约 2 s 的启动延迟, 而 SAF-HID 控制方法能够在障碍物移除后迅速完成决策切换并更新期望轨迹, 使 CDSRA 平滑过渡至目标状态. 这表明, 引入仿人决策机制后, 系统在启停控制与轨迹重规划方面具备更强的及时性与环境适应能力。

此外, 为验证 CDSRA 在实际操作任务中的顺应性与应用潜力, 如图 12 所示, 基于 SAF-HID 控制方法, 机械臂完成了物体的抓取、吸附与搬运实验流程. 实验对象涵盖多种形状、质量与表面特性的物体, 结果表明, 柔性硅胶外层在绳驱动弹性体变形与吸盘吸附力的协同作用下, 能够提供稳定的接触与足够的摩擦力, 从而实现了对多样化物体的可

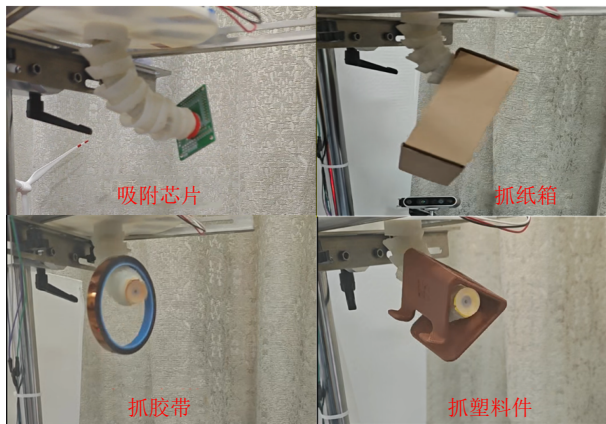


图 12 实际物体的抓取、吸附和搬运

Fig. 12 Grasping, adsorption and manipulation of real objects

靠操作。

综上所述,实物实验结果进一步验证了 SAF-HID 控制方法在实际系统中的鲁棒性、安全性与适应性,表明所提出方法不仅适用于仿真环境,也具备在真实人机协作与柔性操作场景中推广应用的潜力。

6 结束语

针对人机交互场景下绳驱动软体机器人在鲁棒性与安全性方面面临的挑战,本文构建了一套 CD-SRA 实验平台,并提出一种融合仿人决策的状态吸引控制方法。该方法将基于脉冲神经网络的仿人决策模型与状态吸引控制律有机融合,通过外层决策与内层控制的协同设计,实现了系统在动态交互环境中的启停决策、期望轨迹更新与稳定控制。在该控制框架下,状态吸引函数有效约束了跟踪误差的收敛方向与速度,使系统在存在不确定性和外部扰动的情况下仍能够实现快速且平稳的轨迹跟踪。同时,引入的仿人决策机制增强了 CDSRA 对动态障碍物的自主感知与避障能力,从而显著提升系统在人机交互过程中的安全性与鲁棒性。仿真与实物实验结果表明,所提 SAF-HID 控制方法在抗扰性能、动态响应特性以及实际操作稳定性等方面均表现出良好的综合性能,验证了其在真实系统中的可行性与有效性。然而,在更加复杂和多变的人机交互场景中,该方法的决策模型泛化能力仍有进一步提升空间。后续研究将重点围绕增强仿人决策模型的环境适应性、拓展状态吸引控制策略在多任务软体机器人系统中的适用性,并推动相关方法在医疗康复等实际应用场景中的验证与推广,以实现软体机器人在真实环境中的高精度、高安全性自主交互与长期稳定运行。

参考文献

- Wang Tian-Miao, Hao Yu-Fei, Yang Xing-Bang, Wen Li. Soft robotics: Structure, actuation, sensing and control. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, **53**(13): 1-13 (王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 文力. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制. 机械工程学报, 2017, **53**(13): 1-13)
- Liu Hua-Ping, Guo Di, Sun Fu-Chun, Zhang Xin-Yu. Morphology-based embodied intelligence: Historical retrospect and research progress. *Acta Automatica Sinica*, 2023, **49**(6): 1131-1154 (刘华平, 郭迪, 孙富春, 张新钰. 基于形态的具身智能研究: 历史回顾与前沿进展. 自动化学报, 2023, **49**(6): 1131-1154)
- Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 2015, **521**(7553): 467-475
- Armanini C, Boyer F, Mathew A T, Duriez C, Renda F. Soft robots modeling: A structured overview. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, **39**(3): 1728-1748
- Wei Hui-Ling, Liang Cheng-Bin, Wang Jin-Hai, Chen Ming-Xian, Luo Lu-Feng. Research progress of cable-driven flexible manipulator and its application in agricultural robots. *Journal of Intelligent Agricultural Mechanization*, 2024, **5**(4): 95-106 (韦慧玲, 梁成斌, 王金海, 陈明献, 罗陆锋. 绳驱柔性机械手研究进展及其在农业机器人中的应用. 智能化农业装备学报, 2024, **5**(4): 95-106)
- Tan Chen-Yu, Xu Peng, Li Ping, Yu Hong-Liu. Current research on modeling and control methods for cable-driven flexible manipulator. *Information and Control*, 2023, **52**(3): 277-291 (谭晨羽, 许朋, 李平, 喻洪流. 绳驱柔性机械臂建模与控制方法研究现状. 信息与控制, 2023, **52**(3): 277-291)
- Tang Z Q, Tian L Y, Xin W C, Wang Q Q, Rus D, Laschi C. A general soft robotic controller inspired by neuronal structural and plastic synapses that adapts to diverse arms, tasks, and perturbations. *Science Advances*, 2026, **12**(2): Article No. eaea3712
- Lai J W, Lu B, Zhao Q X, Chu H K. Constrained motion planning of a cable-driven soft robot with compressible curvature modeling. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, **7**(2): 4813-4820
- Wang Shi-Qiang, Xie Zhe-Xin, Yuan Fei-Yang, Li Lei, Liu Yu-Chen, Wang Tian-Miao, et al. Bio-inspired physical intelligence for soft robotics. *Science Bulletin*, 2022, **67**: 959-975 (王世强, 谢哲新, 袁菲阳, 李磊, 刘昱辰, 王田苗, 等. 软体机器人的仿生物理智能. 科学通报, 2022, **67**: 959-975)
- Huang X J, Zou J, Gu G Y. Kinematic modeling and control of variable curvature soft continuum robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, **26**(6): 3175-3185
- Geng Peng, He Yan-Lin, Yang Yi, Li Wen-Yu. Research status and prospects of control methods for soft robotic arms. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, **44**(11): 85-98 (耿鹏, 何彦霖, 杨溢, 历文字. 软体机械臂控制方法研究现状及展望. 仪器仪表学报, 2024, **44**(11): 85-98)
- Caasenbrood B, Pogromsky A, Nijmeijer H. Control-oriented models for hyperelastic soft robots through differential geometry of curves. *Soft Robotics*, 2023, **10**(1): 129-148
- Alkayas A Y, Mathew A T, Feliu-Talegon D, Deng P, Thuruthel T G, Renda F. Soft synergies: Model order reduction of hybrid soft-rigid robots via optimal strain parameterization. *IEEE Transactions on Robotics*, 2024, **41**: 1118-1137
- Kazemipour A, Fischer O, Toshimitsu Y, Wong K W, Katschmann R K. Adaptive dynamic sliding mode control of soft continuum manipulators. In: Proceedings of the 2022 International Conference on Robotics and Automation. Philadelphia, USA: IEEE, 2022. 3259-3265
- Wang D, Zhao B W, Li X L, Dong L, Zhang M J, Zou J, et al. Dexterous electrical-driven soft robots with reconfigurable chiral-lattice foot design. *Nature Communications*, 2023, **14**(1): Article No. 5067
- Truby R L, Chin L, Rus D. A recipe for electrically-driven soft robots via 3D printed handed shearing auxetics. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, **6**(2): 795-802
- Nguyen C C, Teh T, Thai M T, Phan P T, Hoang T T, Davies J, et al. A handheld hydraulic soft robotic device with bidirectional bending end-effector for minimally invasive surgery. *IEEE*

- Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 2023, **5**(3): 590–601
- 18 Liu S J, Liu C B, Wei G W, Ren L Q, Ren L. Design, modeling, and optimization of hydraulically powered double-joint soft robotic fish. *IEEE Transactions on Robotics*, 2025, **41**: 1211–1223
 - 19 Qiao Zeng, Wang Shen-Long, Li Kai, Lin Jun-Jie, Hu Jin-Jie, Li Zhuo-Yi, et al. Water-jet propelled squid-inspired soft robot driven by pneumatic bistable device. *Robot*, 2023, **45**(3): 287–301 (乔增, 王神龙, 李凯, 林俊杰, 胡锦涛, 黎卓羿, 等. 气动双稳态装置驱动的仿喷水推进乌贼结构软体机器人. *机器人*, 2023, **45**(3): 287–301)
 - 20 Wang D, Jiang C R, Gu G Y. Modeling design of lattice-reinforced pneumatic soft robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, **40**: 606–623
 - 21 Hua De-Zheng, Shen Yu-Rui, Peng Lai, Wang Qi-Yu, Liu Xin-Hua. Rolling-deformation motion characteristics of magnetorheological soft robot. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, **60**(21): 56–65 (华德正, 申玉瑞, 彭来, 王其雨, 刘新华. 磁流变软体机器人滚动-变形运动特性. *机械工程学报*, 2024, **60**(21): 56–65)
 - 22 Dong Y, Wang L, Xia N, Yang Z X, Zhang C, Pan C F, et al. Untethered small-scale magnetic soft robot with programmable magnetization and integrated multifunctional modules. *Science Advances*, 2022, **8**(25): Article No. eabn8932
 - 23 Qi X D, Mei Y, Chen D, Li Z J, Tan X B. Design and nonlinear modeling of a modular cable-driven soft robotic arm. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024, **29**(4): 3083–3091
 - 24 Zhou Z F, Zuo R Z, Du M, Wang S J, Levy S, Sun Y, et al. A cable-driven soft robotic hand with an in-hand RGB-D camera for dexterous grasping and manipulation. *IEEE Transactions on Robotics*, 2025, **42**: 600–618
 - 25 Yang J L, Zhou Z X, Runciman M, Avery J, Sun Z J, Mylonas G. A soft inflatable cable-driven parallel robot with a variable stiffness end-effector for advanced interventional endoscopy. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2025, **72**(9): 2794–2803
 - 26 Garriga-Casanovas A, Rodriguez y Baena F. Kinematics of continuum robots with constant curvature bending and extension capabilities. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2019, **11**(1): Article No. 011010
 - 27 Thuruthel T G, Falotico E, Renda F, Laschi C. Model-based reinforcement learning for closed-loop dynamic control of soft robotic manipulators. *IEEE Transactions on Robotics*, 2019, **35**(1): 124–134
 - 28 Yang Y Y, Peng J Z, Liu Y Q, He W. State-attracted functions-based trajectory planning and tracking control for uncertain robotic systems based on a human-inspired vector field. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2026, **73**(4): 5782–5793
 - 29 Yang Y Y, Ma R L, Peng J Z, Liu Y Q, He W. Modeling and trajectory tracking control for a rope-driven soft robotic arm based on state-attracted functions. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2025, **10**(10): 9750–9757
 - 30 Wang Rui-Dong, Wang Rui, Zhang Tian-Dong, Wang Shuo. A survey of research on robotic brain-inspired intelligence. *Acta Automatica Sinica*, 2024, **50**(8): 1485–1501 (王瑞东, 王睿, 张天栋, 王硕. 机器人人类智能研究综述. *自动化学报*, 2024, **50**(8): 1485–1501)
 - 31 Zhang T Y K, Zhan J X, Shi J M, Xin J M, Zheng N N. Human-like decision-making of autonomous vehicles in dynamic traffic scenarios. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, **10**(10): 1905–1917
 - 32 Huang H J, Rau P-L P, Ma L. Will you listen to a robot? Effects of robot ability, task complexity, and risk on human decision-making. *Advanced Robotics*, 2021, **35**(19): 1156–1166
 - 33 Tabb A, Yousef K M A. Solving the robot-world hand-eye(s) calibration problem with iterative methods. *Machine Vision and Applications*, 2017, **28**(5–6): 569–590
 - 34 Yang Y Y, Peng J Z, Fan P H. A non-destructive dropped fruit impact signal imaging-based deep learning approach for smart sorting of kiwifruit. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, **202**: Article No. 107380



彭金柱 郑州大学电气与信息工程学院教授. 主要研究方向为机器人运动规划, 柔顺控制, 人机交互与协作.

E-mail: jzpeng@zzu.edu.cn

(PENG Jin-Zhu Professor at the School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University. His main research interests include robot motion planning, compliant control, human-robot interaction and collaboration.)



王子浩 郑州大学电气与信息工程学院硕士研究生. 主要研究方向为仿生机器人和人机交互.

E-mail: cismysu@163.com

(WANG Zi-Hao Master student at the School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University. His main research interests include bionic robots and human-robot interaction.)



杨耀雨 郑州大学电气与信息工程学院博士研究生. 主要研究方向为机器人控制和人机交互.

E-mail: yaoyuyang@gs.zzu.edu.cn

(YANG Yao-Yu Ph.D. candidate at the School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University. His main research interests include robot control and human-robot interaction.)



范朋辉 郑州大学电气与信息工程学院博士研究生. 主要研究方向为机器人控制, 神经网络, 柔顺控制.

E-mail: fph@gs.zzu.edu.cn

(FAN Peng-Hui Ph.D. candidate at the School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University. His main research interests include robot control, neural networks and compliant control.)



刘亚强 郑州大学电气与信息工程学院副教授. 主要研究方向为机器人控制, 强化学习, 分布参数系统. 本文通信作者.

E-mail: liuyaqiang@zzu.edu.cn

(LIU Ya-Qiang Associate professor at the School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University. His main research interests include robotic control, reinforcement learning and distributed parameter systems. Corresponding author of this paper.)