

非线性多智能体系统的自适应模糊事件触发包容控制

李柏霖, 杨忠君, 刘一泽

(沈阳化工大学 信息工程学院, 沈阳 110142)

摘要: 针对具有输入延迟和随机干扰的非线性多智能体系统, 提出了一种基于规定性能和事件触发机制的自适应模糊控制方法; 该方法采用了基于相对阈值的事件触发机制, 从而降低了多智能体系统的硬件要求, 并最大限度地减少了智能体之间的通信; 与大多数事件触发机制相比, 这种设计不仅简单方便, 而且有效减少了控制过程中的网络通信负荷; 模糊逻辑系统和 Pade 近似法分别用于处理多智能体系统中的未知非线性函数和输入延迟; 为进一步提高系统的瞬态和稳态性能, 设计了一种新的自适应模糊包容控制器, 该控制器加入了规定的性能函数, 确保包容误差收敛到预定的性能标准; 此外, 为了降低计算复杂度, 还引入了指令滤波技术; 基于 Lyapunov 稳定性理论, 证明了闭环系统的稳定性, 只存在较小的包容误差, 并避免了芝诺现象; 通过理论分析和仿真实验, 进一步验证了所提控制方法的有效性。

关键词: 事件触发; 规定性能函数; 包容控制; 输入延迟; 自适应控制

Adaptive Fuzzy Event-triggered Containment Control for Nonlinear Multi-agent Systems

LI Bolin, YANG Zhongjun, LIU Yize

(College of Information Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract: An adaptive fuzzy control method based on prescribed performance and event-triggered mechanism is proposed for nonlinear multi-intelligent systems with input delays and random disturbances; This method employs an event-triggered mechanism based on relative thresholds to reduce the hardware requirements of the multi-agent system and minimize the communication between the agents. Compared with most event-triggered mechanisms, this design is not only simple and convenient, but also effectively reduces the network communication load during the control process; Fuzzy logic system and Pade approximation method are used to deal with unknown nonlinear functions and input delays in the multi-agent system, respectively; In order to further improve the system's transient and steady-state performances, a new adaptive fuzzy containment controller is designed, which incorporates a prescribed performance function to ensure that the containment error converges to the predefined performance; In addition, in order to reduce the computational complexity, the command filtering technique is introduced; Based on the Lyapunov stability theory, the stability of the closed-loop system is demonstrated with only a small inclusion error, avoiding Zeno phenomenon; The effectiveness of the proposed control method is further verified through theoretical analysis and simulation experiments.

Keywords: event-triggered; prescribed performance function; containment control; input delay; adaptive control

0 引言

近年来, 多智能体系统的包容控制作为一个新的研究方向得到了广泛的关注。在无人机^[1]、水下航行器^[2]、无人船^[3]等领域, 许多研究人员都对它进行了研

究。它的目标是所有的跟随者都能到达领导者形成的凸船体。在实际应用中, 大多数系统都是非线性的, 或者涉及模型的不确定性。为了应对这些系统中未知非线性函数的挑战, 许多研究人员建议使用神经网络或模糊逻辑技术来近似这些未知的非线性函数。参考文献 [4] 提出

收稿日期: 2024-12-12; 修回日期: 2025-01-15。

基金项目: 辽宁省自然科学基金(LJKMZ20220780)。

作者简介: 李柏霖(1997-), 男, 硕士生。

杨忠君(1979-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。

引用格式: 李柏霖, 杨忠君, 刘一泽. 非线性多智能体系统的自适应模糊事件触发包容控制[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(5): 194-204.

了一种针对执行器故障和输入饱和的非仿多智能体系统的自适应容错控制策略。该策略基于径向基函数神经网络进行设计和开发,具有较强的适应性和鲁棒性。同时,在文献[5]中,模糊逻辑方法被用来估计未知的非线性函数,这有助于推进以状态反馈、输出反馈、滑模观测器和自适应模糊反步控制为基础的包容控制方法。

事实上,输入时间延迟是大多数实际物理系统不可避免的问题。许多机械系统,如遥控系统、车载机械臂和太空机械臂^[6-8],都会受到时间延迟的影响。因此,减少多代理系统中时间延迟的影响是近几十年来学者们研究的一个重要领域。参考文献[9-10]探讨了存在时间延迟的多智能体系统中的群体共识问题,并为这些系统引入了创新的控制策略。然而,每个代理的控制法则都依赖于状态信息,以避免输入延迟引起的问题,但上述研究解决的是线性时延问题,而当前大多数多代理系统面临的是非线性时延问题。针对这一问题,参考文献[11-14]构建了不同形式的 Lyapunov-Krasovskii 函数:积分函数和指数函数,它们能补偿输入延迟的影响。然而,这些方法主要针对多代理系统中的状态延迟,在处理输入延迟方面效果较差。参考文献[15-16]研究了受输入时间延迟影响的参数不确定多智能体系统,利用预测模型对延迟系统进行了重新表述。然而,这种方法无法将时延系统完全转换为无时延系统,因为转换过程会引入一个包含时延的积分项,从而使时延的处理更加复杂。此外,输入积分法常用于解决输入时延问题^[17-18],但为这种方法设计反馈增益具有挑战性,控制参数过小会导致性能不佳,而参数过大又会导致系统不稳定。在工业系统中,特别是多智能体系统中,由于智能体之间的信息交互,不可避免地会产生输入延迟。参考文献[19-22],通过运用 Pade 近似的方法,有效攻克了传统方法在处理输入时滞问题时所面临的复杂性难题,使得输入时滞的补偿过程变得更加简便易行,这一方法对于研究具有输入时滞的非线性多智能体系统包容控制,具有显著的实用价值。

另一方面,上述控制方法通常只关注多智能体系统的稳态性能,很少涉及超调和收敛率等瞬态指标。规定性能控制^[23]之所以备受关注,是因为它允许设计者根据实际需求规定系统性能。例如,文献[24]引入了单调收敛性能函数来设计规定性能控制器,使系统误差收敛到一个极小的区域,但也增加了计算负担和设计复杂性,若经过充分优化,可能难以在实时系统中实现。参考文献[25-26]还提出了有限时间性能函数,使跟踪误差在有限时间内达到预定误差区域。在多智能体系统中,系统的瞬态性能受拓扑结构复杂性的严重影响,对控制误差起着至关重要的作用,这也凸显了采用预设性能技术提升系统瞬态性能的重要性。

值得注意的是,前面提到的这些控制方法都是在控制信号持续发送到系统执行器的假设条件下运行的,特别是通过时间触发控制。然而,多智能体系统之间的通信和计算资源限制制约了这些控制方法的实际应用。因此,设计一种既能满足控制需求又能优化通信资源的控制策略变得至关重要。参考文献[27-28]采用集中式事件触发控制,为多无人机系统中的每个无人机设置统一的误差阈值。当任何无人机的状态误差达到阈值时,其余无人机立即触发事件并更新控制器,集中式事件触发控制的缺点在于统一误差阈值无法适应不同无人机的动态特性,可能导致过度触发事件、通信负担增加、反应迟缓以及系统稳定性问题。而参考文献[29-31]则采用分布式事件触发控制,即根据邻近节点的信息为系统中的每个无人机分配一个误差阈值。当无人机的状态误差达到阈值时,它就会触发自己的事件并更新控制器,从而在无人机群之间达成共识。参考文献[32-35]侧重于通过事件触发机制和分布式控制策略优化系统性能,但其缺点在于频繁的信息交换,对网络拓扑的依赖性强,容易受到网络变化或节点故障的影响,导致系统协调性和稳定性下降。参考文献[36]介绍了一种分散式动态事件触发控制方法,用于解决无人机内部防撞难题,将动态阈值与无人机之间的状态误差及其特定触发误差联系起来,从而降低了冗余数据的传输率。但其缺点在于动态阈值的设计较为复杂,且需要实时计算无人机之间的状态误差,增加了计算负担。此外,该方法对系统的实时性要求较高,若计算延迟或传输延迟过大,可能导致防撞控制失效或反应迟缓,影响系统的整体稳定性和安全性。参考文献[37-38]探讨了多种网络攻击模型下的事件触发式共识控制,考虑了攻击引起的拓扑变化,并设计了事件触发式共识控制方案。这些研究在处理随机拒绝服务、欺骗和重放攻击的综合框架内研究了共识控制问题。但其缺点在于攻击模型的复杂性可能导致控制方案在实际应用中的适应性较差,尤其是在面临未知或新型攻击时,系统的鲁棒性和灵活性不足。迄今为止,有关多智能体系统中事件触发控制的研究大多集中于无领导或单领导共识,而针对多领导事件触发包容控制的研究仍然很少,这一空白正是本研究的主要动机。

在前面分析的基础上,本研究提出了一种自适应模糊控制策略,它将规定性能与事件触发机制相结合,专门针对面临输入延迟和随机干扰的多智能体系统而设计。该方法可确保所有跟随者接近领导者定义的凸壳。

这项工作的主要贡献如下:1)与文献[2]和文献[19]中的方法不同,本文考虑了多智能体系统拓扑结构的复杂性,其中瞬态性能会影响系统的控制稳定性。因此,在控制策略中加入了规定的性能函数,大大提高

了多智能体系统的稳定性。此外,与上述参考文献中的控制策略相比,所提出的方法可确保包容跟踪误差收敛为零,而不是渐进收敛。2) 本研究首次在非线性的多智能体包容控制设计中引入了相对阈值事件触发机制,改进了自适应包容控制器。与文献 [19] 和文献 [22] 相比,这种方法减少了通信资源的使用和带宽消耗,避免了芝诺行为。3) 将改进的事件触发机制扩展到具有规定性能的严格反馈多智能体系统,同时还考虑了输入延迟和时变干扰。模拟实验表明,这种方法不仅能改善系统的瞬态性能,节约通信资源,而且能产生比文献 [22] 中的方法更小的控制误差,所有误差都保持在规定的范围内。

1 问题描述

1.1 图论

考虑由跟随者和领导者之间的信息交换构成的有向图 G , 其拉普拉斯矩阵 L : $L = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 \\ 0_{M \times N} & 0_{M \times M} \end{bmatrix}$ 其中, L_1 表示跟随者间的拓扑关系, L_2 表示跟随者与领导者之间的拓扑关系。假设每个跟随者都能通过有向路径与至少一个领导者连通。在此假设下, L_1 满足正定性, 且 $-L_1^{-1}L_2$ 的每行元素和为 1, 所有元素非负。定义领导者的虚拟轨迹为: $y_d(t) = -L_1^{-1}L_2 y_l$ 。

1.2 问题陈述

本文考虑的系统为非线性严格反馈多智能体系统, 受输入延迟和随机干扰的影响, 系统中包括 N 个跟随者和 M 个领导者。我们设计了一种新型的自适应模糊包容控制器, 结合了预设性能和事件触发机制, 以实现下述目标: 保证非线性多智能体系统中的每个信号都是有界的; 确保所有跟随者向领导者定义的凸壳收敛; 确保多代理系统的包含误差收敛到规定区域, 并且不会出现芝诺行为。为满足上述要求, 本文所考虑的多智能体系统模型如下:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_{\tau,k} = v_{\tau,k}(\xi_{\tau,k}) + \xi_{\tau,k+1} + \Delta_{\tau,k}(t), \\ 1 \leq k \leq n-1, \\ \dot{\xi}_{\tau,n} = v_{\tau,n}(\xi_{\tau,n}) + u_{\tau}(t - \zeta_{\tau}) + \Delta_{\tau,n}(t), \\ y_{\tau} = \xi_{\tau,1}. \end{cases} \quad (1)$$

在这种情况下, $\xi_{\tau,k} = [\xi_{\tau,1}, \xi_{\tau,2}, \dots, \xi_{\tau,k}]^T$ 和 $\xi_{\tau,n} = [\xi_{\tau,1}, \xi_{\tau,2}, \dots, \xi_{\tau,n}]^T$ 是系统的状态向量。变量 $y_{\tau} \in R$, 表示第 τ 个追随者 ($\tau = 1, 2, \dots, N$)。函数 $v_{\tau,k}(\xi_{\tau,k})$ 表示一个未知的平滑非线性函数, 而 $\Delta_{\tau,k}(t)$ 表示未知的外部干扰, 满足 $|\Delta_{\tau,k}| \leq \Delta_{\tau,k}^*$, 其中 $\Delta_{\tau,k}^*$ 是一个未知常数。 $u_{\tau}(t - \zeta_{\tau})$ 表示对所考虑系统的输入, 其中 $u_{\tau}(t) = 0$ 对于 $(t \leq 0)$ 且 ζ_{τ} 是一个已知的常数延迟。领导者 y_n 是足够平滑的函数, 其中 y_n 和 $\bar{y}_n$ 都是有界的, $i = N+1$,

$\dots, N+M$ 。

为了补偿系统的输入延迟, 我们采用了文献 [20] 中提到的 Pade 近似技术。

根据拉普拉斯变换的延迟定理, 可以推导出:

$$\Gamma\{u_{\tau}(t - \zeta_{\tau})\} = \exp(-\zeta_{\tau}s)\Gamma\{u_{\tau}(t)\} = \frac{\exp\left(\frac{-\zeta_{\tau}s}{2}\right)}{\exp\left(\frac{\zeta_{\tau}s}{2}\right)}\Gamma\{u_{\tau}(t)\} \quad (2)$$

在此上下文中, $\Gamma\{u_{\tau}(t)\}$ 代表 $u_{\tau}(t)$ 的拉普拉斯变换, 而 s 是指使用 Pade 近似技术推导的拉普拉斯变换变量:

$$\exp(-\zeta_{\tau}s)\Gamma\{u_{\tau}(t)\} \approx \frac{\left(1 - \frac{\zeta_{\tau}s}{2}\right)}{\left(1 + \frac{\zeta_{\tau}s}{2}\right)}\Gamma\{u_{\tau}(t)\} \quad (3)$$

本设计中使用的中间辅助变量 $\xi_{\tau,n+1}$ 符合以下标准:

$$\frac{1 - \frac{\zeta_{\tau}s}{2}}{1 + \frac{\zeta_{\tau}s}{2}}\Gamma\{u_{\tau}(t)\} = \Gamma\{\xi_{\tau,n+1}(t)\} - \Gamma\{u_{\tau}(t)\} \quad (4)$$

因此, 方程表示为:

$$2\Gamma\{u_{\tau}(t)\} = \Gamma\{\xi_{\tau,n+1}(t)\} + \frac{\zeta_{\tau}s}{2}\Gamma\{\xi_{\tau,n+1}(t)\} \quad (5)$$

通过应用逆拉普拉斯变换, 方程被转换为:

$$\dot{\xi}_{\tau,n+1} = \frac{4}{\zeta_{\tau}}u_{\tau} - \frac{2}{\zeta_{\tau}}\xi_{\tau,n+1} \quad (6)$$

通过选择 $\iota_{\tau} = 2/\zeta_{\tau}$, 方程可以改写为:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_{\tau,k} = v_{\tau,k}(\xi_{\tau,k}) + \xi_{\tau,k+1} + \Delta_{\tau,k}(t), \\ 1 \leq k \leq n-1, \\ \dot{\xi}_{\tau,n} = v_{\tau,n}(\xi_{\tau,n}) + \xi_{\tau,n+1} - u_{\tau}(t) + \Delta_{\tau,n}(t), \\ \dot{\xi}_{\tau,n+1} = -\iota_{\tau}\xi_{\tau,n+1} + 2\iota_{\tau}u_{\tau}(t), \\ y_{\tau} = \xi_{\tau,1} \end{cases} \quad (7)$$

1.3 模糊逻辑系统

根据参考文献 [20], 模糊逻辑系统知识库由模糊规则集合组成, 概述如下:

当 $\xi_1 = F_1^l$, $\xi_2 = F_2^l$, $\dots$, $\bar{e}_{\tau}(t) = z_{\tau}(t) - u_{\tau}(t)$, $y = G^l$, $l = 1, 2, \dots, N$ 。在这种情况下, $\xi = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n]^T$ 表示输入, 而 y 代表模糊逻辑系统的输出。模糊集合 F_i^l 和 G^l 分别与隶属函数 $\bar{\mu}_{F_i^l}(x_{\tau})$ 和 $\bar{\mu}_{G^l}(x_{\tau})$ 相关联。 N 定义了规则的总数。通过采用单点模糊化、中心平均去模糊化和乘积推理, 模糊逻辑系统被构建为:

$$y(\xi) = \frac{\sum_{l=1}^N \bar{y}_l \prod_{\tau=1}^n \bar{\mu}_{F_i^l}(\xi_{\tau})}{\sum_{l=1}^N \left[\prod_{\tau=1}^n \bar{\mu}_{F_i^l}(\xi_{\tau}) \right]} \quad (8)$$

这里, $\bar{y}_l = \max_{y \in R} \bar{\mu}_{G^l}(y)$ 。模糊基函数的公式为:

$$\bar{\varphi}_l = \frac{\prod_{\tau=1}^n \bar{\mu}_{F_i^l}(\xi_{\tau})}{\sum_{l=1}^N \left[\prod_{\tau=1}^n \bar{\mu}_{F_i^l}(\xi_{\tau}) \right]} \quad (9)$$

其中: $\theta^T = [\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_N] = [\theta_1, \dots, \theta_N]$, $\varphi(\xi) = [\bar{\varphi}_1(x), \dots, \bar{\varphi}_N(\xi)]^T$ 。因此, 模糊逻辑系统可以表示为 $y(\xi) = \theta^T \varphi(\xi)$ 。

引理1 ([20]): 如果函数 $v_{\tau,k}(\xi_{\tau,k})$ 在一个紧集上是连续且有定义的, 那么对于任何 $\varsigma > 0$, 可以找到一个模糊逻辑系统, 使得:

$$\sup_{\xi \in U} |v(\xi) - \theta^T \varphi(\xi)| \leq \varsigma \quad (10)$$

1.4 预设性能函数设计

为确保所有跟随者的输出都落在领导者生成的凸壳内, 系统的包含误差最初被描述为:

$$s_{\tau,1} = \sum_{i=1}^N a_{\bar{\tau}}(y_{\tau} - y_i) + \sum_{i=N+1}^{N+M} a_{\bar{\tau}}[y_{\tau} - y_{\bar{\tau}}(t)] \quad (11)$$

其次, 正如文献 [26] 所述, 规定性能控制是通过保证包含误差 $s_{\tau,1}$ 严格限制在预定范围内来实现的。规定性能可表示如下:

$$-\wp_{\min} \omega_{\tau}(t) < s_{\tau,1}(t) < \wp_{\max} \omega_{\tau}(t), \forall t \geq 0 \quad (12)$$

在 $0 < \wp_{\min} < 1$ 和 $0 < \wp_{\max} < 1$ 的条件下, 预定的性能函数 $\omega_{\tau}(t) = (\omega_{\tau,0} - \omega_{\tau,\infty})e^{-\phi t} + \omega_{\tau,\infty}$ 被描述为一个严格递减的连续函数。为了支持进一步的理论分析, 将约束包含误差转换为可比较的无约束形式。令 $s_{\tau,1}(t)$ 重新定义为:

$$s_{\tau,1}(t) = \omega_{\tau}(t) \Theta_{\tau}(\beta_{\tau}(t)), \forall t \geq 0 \quad (13)$$

这里, β_{τ} 表示转换后的误差, 而 $\Theta_{\tau}(\beta_{\tau})$ 是一个严格递增的连续函数, 它满足:

$$\Theta_{\tau}(\beta_{\tau}) = \frac{\wp_{\max} e^{\beta_{\tau}} - \wp_{\min} e^{-\beta_{\tau}}}{e^{\beta_{\tau}} + e^{-\beta_{\tau}}} \quad (14)$$

随后的状态转换定义如下:

$$\partial_{\tau,1} = \beta_{\tau}(t) - \frac{1}{2} \ln \frac{\wp_{\min}}{\wp_{\max}} \quad (15)$$

其导数由下式给出:

$$\bar{\partial}_{\tau,1} = \chi_{\tau} \left(\bar{s}_{\tau,1} - \frac{\bar{\omega}_{\tau} s_{\tau,1}}{\omega_{\tau}} \right) \quad (16)$$

显然, 当 $\partial_{\tau,1}$ 有界时, 包含误差 $s_{\tau,1}$ 可以满足预定的性能要求。

2 自适应控制器设计

为了实现控制目标, 我们制定了后续的坐标变换:

$$\begin{cases} \bar{\partial}_{\tau,1} = \chi_{\tau} \left(\bar{s}_{\tau,1} - \frac{\bar{\omega}_{\tau} s_{\tau,1}}{\omega_{\tau}} \right), \\ s_{\tau,k} = \xi_{\tau,k} - \bar{s}_{\tau,k}, k = 2, \dots, n-1, \\ s_{\tau,n} = \xi_{\tau,n} - \bar{s}_{\tau,n} + \xi_{\tau,n+1}/t_{\tau}. \end{cases} \quad (17)$$

这里, $s_{\tau,k}$ 表示误差曲面, 而 $\bar{s}_{\tau,k}$ 作为一阶滤波器的输出:

$$c_{\tau,k} \dot{\bar{s}}_{\tau,k} + \bar{s}_{\tau,k} = \alpha_{\tau,k}, \bar{s}_{\tau,k}(0) = \bar{s}_{\tau,k}(0) \quad (18)$$

在这种情况下, 反步法虚拟控制器 $\bar{s}_{\tau,k}$ 充当输入,

同时 $c_{\tau,k}$ 代表一个正向设计参数。引入公式是为了减少虚拟控制器 $\bar{s}_{\tau,k}$ 的重复微分, 从而防止出现“复杂性爆炸”现象。

第一步设计控制器 $\bar{s}_{\tau,2}$ 和自适应律 $\dot{\theta}_{\tau,1}$:

$$\begin{aligned} \bar{s}_{\tau,2} = & -\frac{\kappa_{\tau,1} \bar{\partial}_{\tau,1} \chi_{\tau} d_{\tau} \theta_{\tau,1}^*}{2\tau_{\tau,1}^2 \varphi_{\tau,1}^T \varphi_{\tau,1}} - \frac{\bar{\partial}_{\tau,1} \chi_{\tau} d_{\tau}}{2\sigma_{\tau,1}^2} - \frac{\bar{\partial}_{\tau,1} \chi_{\tau} d_{\tau}}{2} + \\ & \frac{1}{d_{\tau}} \left(-g_{\tau,1} \chi_{\tau} \bar{\partial}_{\tau,1} + \sum_{i=N+1}^{N+M} a_{\bar{\tau}} \dot{y}_{\bar{\tau}} + \sum_{i=1}^N a_{\bar{\tau}} \xi_{i,2} + \frac{\dot{\omega}_{\tau} s_{\tau,1}}{\omega_{\tau}} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\bar{\theta}_{\tau,1} = \frac{r_{\tau,1} \kappa_{\tau,1} \bar{\partial}_{\tau,1}^2 \chi_{\tau}^2 d_{\tau}^2 \bar{\theta}_{\tau,1}}{2\tau_{\tau,1}^2 \varphi_{\tau,1}^T \varphi_{\tau,1}} - \delta_{\tau,1} \theta_{\tau,1} \quad (20)$$

其中: $r_{\tau,1}$, $\kappa_{\tau,1}$, $\sigma_{\tau,1}$ 和 $r_{\tau,1}$ 表示正设计参数, $d_{\tau} = \sum_{i=1, i \neq \tau}^{N+M} a_{\tau}$, $\bar{\theta}_{\tau,1} = \theta_{\tau,1}^* - \theta_{\tau,1}$ 表示估计误差。

第 k ($2 \leq k \leq n-1$) 步选择以下虚拟控制器 $\bar{s}_{\tau,k+1}$ 和自适应律: $\bar{\theta}_{\tau,k}$

$$\bar{s}_{\tau,k+1} = -g_{\tau,k} s_{\tau,k} - \frac{\kappa_{\tau,k} \bar{s}_{\tau,k} \theta_{\tau,k}}{2\bar{s}_{\tau,k}^2 \varphi_{\tau,k}^T \varphi_{\tau,k}} - \frac{\bar{s}_{\tau,k}}{2\sigma_{\tau,k}^2} - \frac{\bar{s}_{\tau,k}}{2} + \dot{\bar{s}}_{\tau,k} - \bar{s}_{\tau,k-1} \quad (21)$$

$$\bar{\theta}_{\tau,k} = \frac{r_{\tau,k} \kappa_{\tau,k} \bar{s}_{\tau,k}^2 \bar{\theta}_{\tau,k}}{2\tau_{\tau,k}^2 \varphi_{\tau,k}^T \varphi_{\tau,k}} - \delta_{\tau,k} \theta_{\tau,k} \quad (22)$$

其中: $r_{\tau,k}$, $\kappa_{\tau,k}$, $\sigma_{\tau,k}$ 和 $r_{\tau,1}$ 表示正设计参数, $\bar{\theta}_{\tau,k} = \theta_{\tau,k}^* - \theta_{\tau,k}$ 表示估计误差。

2.1 多智能体自适应模糊控制器设计

步骤1: 从方程中, 得到 $\bar{\partial}_{\tau,1}$ 如下

$$\bar{\partial}_{\tau,1} = \chi_{\tau} \left[d_{\tau} (F_{\tau,1}(\xi_{\tau,i}) + \xi_{\tau,2} + \Delta_{\tau,1} - \frac{\bar{\omega}_{\tau} s_{\tau,1}}{\omega_{\tau}}) - \frac{1}{d_{\tau}} \left(\sum_{i=1}^N a_{\bar{\tau}}(\xi_{i,2} + \Delta_{i,1}) - \sum_{i=N+1}^{N+M} a_{\bar{\tau}} y_{\bar{\tau}}(t) \right) \right] \quad (23)$$

这里, $F_{\tau,1}(\xi_{\tau,i}) = v_{\tau,1}(\xi_{\tau,i}) + 1/d_{\tau} [\sum_{i=1}^N a_{\bar{\tau}}(v_{i,1})]$, 并且 $\xi_{\tau,i} = [\xi_{\tau,1}, \xi_{\tau,i}]^T$ 。函数 $F_{\tau,1}(\xi_{\tau,i})$ 表示一个未指定的函数。基于引理1, 这个函数可以使用模糊逻辑系统进行近似:

$$F_{\tau,1}(\xi_{\tau,i}) = \theta_{\tau,1}^T \varphi_{\tau,1} + \mathfrak{Z}_{\tau,1} \quad (24)$$

为了减轻一阶滤波器误差 $\bar{s}_{\tau,2} - \bar{s}_{\tau,2}$ 的影响, 提出了补偿动态 $h_{\tau,1}$:

$$\begin{aligned} \dot{h}_{\tau,1} &= \chi_{\tau} d_{\tau} (-g_{\tau,1} h_{\tau,1} + \bar{s}_{\tau,2} - \bar{s}_{\tau,2} + h_{\tau,2}), \\ h_{\tau,1}(0) &= 0. \end{aligned} \quad (25)$$

这里, $g_{\tau,1}$ 表示一个正的设计参数。

选择合适的 Lyapunov 函数:

$$V_{\tau,1} = \frac{1}{2} \bar{\partial}_{\tau,1}^2 + \frac{1}{2\tau_{\tau,1}} \bar{\theta}_{\tau,1}^2 \quad (26)$$

根据方程, 可将其 $V_{\tau,1}$ 导数表示为:

$$\dot{V}_{\tau,1} = \bar{\partial}_{\tau,1} \dot{\bar{\partial}}_{\tau,1} - \frac{1}{r_{\tau,1}} \bar{\theta}_{\tau,1} \dot{\bar{\theta}}_{\tau,1} =$$

$$\bar{\partial}_{\tau,1} \chi_{\tau} \left[d_{\tau} (\theta_{\tau,1}^T \varphi_{\tau,1} + \mathfrak{I}_{\tau,1} + \bar{s}_{\tau,2} + \mathfrak{S}_{\tau,2} + \Delta_{\tau,1} + g_{\tau,1} h_{\tau,1} - 1/d_{\tau} (\sum_{i=1}^N a_{\bar{\tau}} (\xi_{i,2} + \Delta_{i,1})) - \sum_{i=N+1}^{N+M} a_{\bar{\tau}} \bar{y}_{\bar{\tau}}(t)) - \frac{\bar{\omega}_{\tau} s_{\tau,1}}{\omega_{\tau}} \right] - \frac{1}{r_{\tau,1}} \bar{\theta}_{\tau,1} \bar{\theta}_{\tau,1} \quad (27)$$

已知 $0 < \varphi_{\tau,1}^T \cdot \varphi_{\tau,1} < 1$ ，根据杨氏不等式：

$$\bar{\partial}_{\tau,1} \chi_{\tau} d_{\tau} \theta_{\tau,1}^T \varphi_{\tau,1} \leq \frac{k_{\tau,1} \bar{\partial}_{\tau,1}^2 \chi_{\tau}^2 d_{\tau}^2 \theta_{\tau,1}^*}{2 r_{\tau,1}^2 \varphi_{\tau,1}^T \varphi_{\tau,1}} + \frac{1}{2} r_{\tau,1}^2 \quad (28)$$

$$\bar{\partial}_{\tau,1} \chi_{\tau} d_{\tau} \mathfrak{I}_{\tau,1} \leq \frac{\bar{\partial}_{\tau,1}^2 \chi_{\tau}^2 d_{\tau}^2}{2 \theta_{\tau,1}^2} + \frac{1}{2} \mathfrak{I}_{\tau,1}^2 \theta_{\tau,1}^2 \quad (29)$$

$$\bar{\partial}_{\tau,1} \chi_{\tau} d_{\tau,1} \leq \frac{\bar{\partial}_{\tau,1}^2 \chi_{\tau}^2 d_{\tau}^2}{2} + \frac{1}{2} r_{\tau,1}^2 \quad (30)$$

$$\bar{\partial}_{\tau,1} \sum_{j=1}^N a_{\bar{\tau} i,1} \leq \bar{\partial}_{\tau,1}^2 + \left(\sum_{j=1}^N a_{\bar{\tau} i,1} \right)^2 \quad (31)$$

通过将一和一代入 $\bar{V}_{\tau,1}$ 被重新表述为：

$$\bar{V}_{\tau,1} \leq - (g_{\tau,1} - 1) \bar{\partial}_{\tau,1}^2 + \bar{\partial}_{\tau,1} \chi_{\tau} d_{\tau} \bar{s}_{\tau,2} + \frac{\delta_{\tau,1}}{r_{\tau,1}} \bar{\theta}_{\tau,1} \theta_{\tau,1} + \pi_{\tau,1} \quad (32)$$

这里， $\pi_{\tau,1} = \frac{1}{2} \mathfrak{I}_{\tau,1}^2 + \frac{1}{2} \mathfrak{I}_{\tau,1}^2 \theta_{\tau,1}^2 + \frac{1}{2} \Delta_{\tau,1}^2 + \left(\sum_{i=1}^N a_{\bar{\tau}} \Delta_{i,1} \right)^2$ 。

步骤 $k (2 \leq k \leq n-1)$ ： $s_{\tau,k}$ 的导数表达式可以表示为：

$$\dot{\bar{s}}_{\tau,k} = v_{\tau,k}(\bar{\xi}_{\tau,k}) + \xi_{\tau,k+1} + \Delta_{\tau,k} - \mathfrak{S}_{\tau,k} \quad (33)$$

从引理 1 中可以得出结论：

$$v_{\tau,k}(\bar{\xi}_{\tau,k}) = \theta_{\tau,k}^T \varphi_{\tau,k} + \mathfrak{I}_{\tau,k} \quad (34)$$

为了消除 $\mathfrak{S}_{\tau,k+1} - \mathfrak{S}_{\tau,k+1}$ 的误差影响，引入了以下补偿器 $h_{\tau,k}$

$$\dot{h}_{\tau,k} = -g_{\tau,k} h_{\tau,k} + \mathfrak{S}_{\tau,k+1} - \mathfrak{S}_{\tau,k+1} + h_{\tau,k+1} \quad (35)$$

其中： $g_{\tau,k}$ 是正参数，设计 $\bar{s}_{\tau,k} = s_{\tau,k} - h_{\tau,k}$ 。

选择合适的 Lyapunov 函数：

$$V_{\tau,k} = \frac{1}{2} \bar{s}_{\tau,k}^2 + \frac{1}{2 r_{\tau,k}} \bar{\theta}_{\tau,k}^2 + V_{\tau,k-1} \quad (36)$$

因此：

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\tau,k} &\leq \bar{s}_{\tau,k} \dot{\bar{s}}_{\tau,k} - \frac{1}{r_{\tau,k}} \bar{\theta}_{\tau,k} \dot{\bar{\theta}}_{\tau,k} + \dot{V}_{\tau,k-1} \leq \\ &\bar{s}_{\tau,k} (\theta_{\tau,k}^T \varphi_{\tau,k} + \mathfrak{I}_{\tau,k} + \Delta_{\tau,k} + \mathfrak{S}_{\tau,k+1} + \bar{s}_{\tau,k+1} + \\ &g_{\tau,k} h_{\tau,k} - \mathfrak{S}_{\tau,k}) - \frac{1}{r_{\tau,k}} \bar{\theta}_{\tau,k} \dot{\bar{\theta}}_{\tau,k} + \dot{V}_{\tau,k-1} \end{aligned} \quad (37)$$

从杨氏不等式可以得出：

$$\bar{s}_{\tau,k} \theta_{\tau,k}^T \varphi_{\tau,k} \leq \frac{\kappa_{\tau,k} \bar{s}_{\tau,k}^2 \theta_{\tau,k}^*}{2 r_{\tau,k}^2 \varphi_{\tau,k}^T \varphi_{\tau,k}} + \frac{1}{2} r_{\tau,k}^2 \quad (38)$$

$$\bar{s}_{\tau,k} \mathfrak{I}_{\tau,k} \leq \frac{\bar{s}_{\tau,k}^2}{2 \theta_{\tau,k}^2} + \frac{1}{2} \mathfrak{I}_{\tau,k}^2 \theta_{\tau,k}^2 \quad (39)$$

$$\bar{s}_{\tau,k} \Delta_{\tau,k} \leq \frac{\bar{s}_{\tau,k}^2}{2} + \frac{1}{2} \Delta_{\tau,k}^2 \quad (40)$$

将一和一代入得到 $\bar{V}_{\tau,k}$ ：

$$\begin{aligned} \bar{V}_{\tau,k} &\leq - \sum_{\sigma=2}^k g_{\tau,k} \bar{s}_{\tau,k}^2 + \bar{s}_{\tau,k} \bar{s}_{\tau,k+1} + \\ &\sum_{\sigma=1}^k \frac{\delta_{\tau,\sigma}}{r_{\tau,\sigma}} \bar{\theta}_{\tau,\sigma} \theta_{\tau,\sigma} - (g_{\tau,1} - 1) \bar{\partial}_{\tau,1}^2 + \pi_{\tau,k} \end{aligned} \quad (41)$$

其中： $\pi_{\tau,k} = \pi_{\tau,k-1} + \frac{1}{2} r_{\tau,k}^2 + \frac{1}{2} \mathfrak{I}_{\tau,k}^2 \theta_{\tau,k}^2 + \frac{1}{2} \Delta_{\tau,k}^2$ 。

2.2 多智能体事件触发控制器设计

为了优化多智能体系统中通信资源的使用，采用了^[20]中介绍的相对阈值事件触发控制方法。具体来说，当控制输入较高时，采用较大的阈值，以延长更新时间间隔；当系统趋于稳定时，控制输入阈值向零减小，采用较小的阈值，以获得更精细的控制精度：

$$u_{\tau}(t) = z_{\tau}(t_H), \forall t \in [t_H, t_{H+1}) \quad (42)$$

然后，事件触发控制策略表示为：

$$t_{H+1} = \inf\{t > t_H \mid |\bar{e}_{\tau}(t) - \lambda_{\tau} u_{\tau}(t)| \geq \mu_{\tau}\} \quad (43)$$

令 $\bar{e}_{\tau}(t) = z_{\tau}(t) - u_{\tau}(t)$ 表示测量误差，其中 $z_{\tau}(t)$ 指的是稍后定义的控制律。已知参数 $0 < \lambda_{\tau} < 1$ 和 $\mu_{\tau} > 0$ 决定了更新时间间隔 t_H 和 $H \in \mathbb{Z}^+$ 。一旦触发条件得到满足，控制输入就会更新，而 $z_{\tau}(t_H)$ 保持不变。关于事件触发控制策略，它被设计为假设多智能体系统正常运行。因此，可以得出以下结论：

$$z_{\tau}(t) = (1 + k_1(t) \lambda_{\tau}) u_{\tau}(t) + k_2(t) \mu_{\tau} \quad (44)$$

这里， $|k_1(t)| \leq 1$ 和 $|k_2(t)| \leq 1$ 是时变参数：

$$u_{\tau}(t) = \frac{z_{\tau}(t)}{1 + k_1(t) \lambda_{\tau}} - \frac{k_2(t) \mu_{\tau}}{1 + k_1(t) \lambda_{\tau}} \quad (45)$$

然后

$$z_{\tau}(t) = - (1 + \lambda_{\tau}) \left(\mathfrak{S}_{\tau,n} \tanh\left(\frac{\bar{s}_{\tau,n} \mathfrak{S}_{\tau,n}}{\omega_{\tau}}\right) + \bar{\mu}_{\tau} \tanh\left(\frac{\bar{s}_{\tau,n} \mu_{\tau}}{\omega_{\tau}}\right) \right) \quad (46)$$

$$\mathfrak{S}_{\tau,n} = -g_{\tau,n} s_{\tau,n} - \frac{\kappa_{\tau,n} \bar{s}_{\tau,n} \theta_{\tau,n}}{2 r_{\tau,n}^2 \varphi_{\tau,n}^T \varphi_{\tau,n}} - \frac{\bar{s}_{\tau,n}}{2 \theta_{\tau,n}^2} -$$

$$\frac{\bar{s}_{\tau,n}}{2} + \mathfrak{S}_{\tau,n} - \bar{s}_{\tau,n-1} \quad (47)$$

$$\bar{\theta}_{\tau,n} = \frac{r_{\tau,n} \kappa_{\tau,n} \bar{s}_{\tau,n} \bar{\theta}_{\tau,n}}{2 r_{\tau,n}^2 \varphi_{\tau,n}^T \varphi_{\tau,n}} - \delta_{\tau,n} \theta_{\tau,n} \quad (48)$$

3 稳定性分析

定理 1：对于具有输入延迟和随机扰动的多代理系统，基于所提出的控制方案，可以设计出实用控制器、事件触发控制信号 z_{τ} 、补偿信号、和虚拟控制器和、以及自适应律、和。这些调整可确保跟踪误差保持在规定的限制范围内。闭环系统内的所有信号都保持有界，每个跟随者都收敛在由领导者形成的凸壳内，没有芝诺行为的迹象。

证明：第 n 步： $s_{\tau,n}$ 的导数是：

$$\dot{\bar{s}}_{\tau,n} = v_{\tau,n}(\bar{\xi}_{\tau,n}) + \xi_{\tau,n+1} - u_{\tau} + \Delta_{\tau,n} - \mathfrak{S}_{\tau,n} + \bar{\xi}_{\tau,n+1} / \iota_{\tau} \quad (49)$$

由引理 1 得出:

$$v_{\tau,n}(\bar{\xi}_{\tau,n}) = \theta_{\tau,n}^T \varphi_{\tau,n} + \mathfrak{I}_{\tau,n} \quad (50)$$

令 $\bar{s}_{\tau,n} = s_{\tau,n} - h_{\tau,n}$ 并且 $h_{\tau,n}$ 被表述为:

$$\bar{h}_{\tau,n} = -g_{\tau,n} h_{\tau,n} \quad (51)$$

选择 Lyapunov 函数:

$$V_{\tau,n} = \frac{1}{2} \bar{s}_{\tau,n}^2 + \frac{1}{2r_{\tau,n}} \bar{\theta}_{\tau,n}^2 + V_{\tau,n-1} \quad (52)$$

对 $V_{\tau,n}$ 进行求导:

$$\bar{V}_{\tau,n} = \bar{s}_{\tau,n} \dot{\bar{s}}_{\tau,n} - \frac{1}{r_{\tau,n}} \bar{\theta}_{\tau,n} \dot{\bar{\theta}}_{\tau,n} + \bar{V}_{\tau,n-1} \quad (53)$$

对于所有 $\forall a \in R$ 和 $\gamma > 0$, 有 $-\operatorname{atanh}\left(\frac{a}{\gamma}\right) \leq 0$ 。

根据方程, 可以推导出 $\bar{s}_{\tau,n} \bar{z}_{\tau}(t) \leq 0$ 。由于 $|k_1(t)| \leq 1$ 和 $|k_2(t)| \leq 1$, $\bar{\mu}_{\tau} > \frac{\mu_{\tau}}{1-\lambda_{\tau}} > 0$ 并且 $0 \leq |a| - \operatorname{atanh}\left(\frac{a}{\gamma}\right) \leq 0.2785\gamma$, $\forall a \in R$ 且 $\gamma > 0$, 可以得出:

$$\begin{aligned} \bar{s}_{\tau,n} \dot{\bar{s}}_{\tau,n} &\leq \bar{s}_{\tau,n} \mathfrak{I}_{\tau,n} + 0.557\gamma + \\ &\bar{s}_{\tau,n} (\theta_{\tau,n}^T \varphi_{\tau,n} + \mathfrak{I}_{\tau,n} + \Delta_{\tau,n} + g_{\tau,n} h_{\tau,n} - \dot{\mathfrak{I}}_{\tau,n}) \end{aligned} \quad (54)$$

利用杨氏不等式, 我们推导出:

$$\bar{s}_{\tau,n} \theta_{\tau,n}^T \varphi_{\tau,n} \leq \frac{\kappa_{\tau,n} \bar{s}_{\tau,n}^2 \theta_{\tau,n}^*}{2\mathfrak{I}_{\tau,n}^2 \varphi_{\tau,n}^T \varphi_{\tau,n}} + \frac{1}{2} \mathfrak{I}_{\tau,n}^2 \quad (55)$$

$$\bar{s}_{\tau,n} \mathfrak{I}_{\tau,n} \leq \frac{\bar{s}_{\tau,n}^2}{2o_{\tau,n}^2} + \frac{1}{2} \mathfrak{I}_{\tau,n}^2 o_{\tau,n}^2 \quad (56)$$

$$\bar{s}_{\tau,n} \Delta_{\tau,n} \leq \frac{\bar{s}_{\tau,n}^2}{2} + \frac{1}{2} \Delta_{\tau,n}^2 \quad (57)$$

将一和一代入中可得 $\bar{V}_{\tau,n}$:

$$\bar{V}_{\tau,n} \leq -\sum_{\sigma=2}^n g_{\tau,n} \bar{s}_{\tau,n}^2 + \sum_{\sigma=1}^n \frac{\delta_{\tau,\sigma}}{r_{\tau,\sigma}} \bar{\theta}_{\tau,\sigma} \theta_{\tau,\sigma} - (g_{\tau,1} - 1) \bar{\theta}_{\tau,1}^2 + \pi_{\tau,n} \quad (58)$$

其中:

$$\pi_{\tau,n} = \pi_{\tau,n-1} + \frac{1}{2} \mathfrak{I}_{\tau,n}^2 + \frac{1}{2} \mathfrak{I}_{\tau,n}^2 o_{\tau,n}^2 + \frac{1}{2} \Delta_{\tau,n}^2 + 0.557\gamma$$

考虑一个完整的 Lyapunov 函数, 例如

$$V = \sum_{\tau=1}^N V_{\tau,n} \quad (59)$$

因此, 对 V 求导:

$$\dot{V} \leq \sum_{\tau=1}^N \left[-\sum_{\sigma=2}^n g_{\tau,\sigma} \bar{s}_{\tau,\sigma}^2 + \sum_{\sigma=1}^n \frac{\delta_{\tau,\sigma}}{r_{\tau,\sigma}} \bar{\theta}_{\tau,\sigma} \theta_{\tau,\sigma} - (g_{\tau,1} - 1) \bar{\theta}_{\tau,1}^2 \right] + \pi \quad (60)$$

这里, $(g_{\tau,1} - 1) > 0$, $\pi = \sum_{\tau=1}^N \pi_{\tau,n}$ 。定义 $g_{\tau} =$

$\min_{k=2,\dots,n} \{2g_{\tau,k}, 2\frac{\delta_{\tau,\sigma}}{r_{\tau,\sigma}}, 2(1-g_{\tau,1})\}$, 并且 $g = \min\{g_1, \dots, g_N\}$ 。从 (77) 式, 可以得到:

$$\bar{V} \leq -gV + \pi \quad (61)$$

它的解是:

$$V(t) \leq V(0)e^{-gt} + \frac{\pi}{g} \quad (62)$$

接下来, 我们旨在展示所提出的自适应模糊事件触发控制有效地消除了芝诺行为。假设 $t^* > 0$, 我们发现它代表一个时间常数, 并满足:

$$\forall H \in \mathbb{Z}^+, \{t_{H+1} - t_H \geq t^*\}$$

考虑到 $\bar{e}_{\tau}(t) = z_{\tau}(t) - u_{\tau}(t)$, 可以得出:

$$\frac{d}{dt} |\bar{e}_{\tau}| = \frac{d}{dt} (\bar{e}_{\tau} \times \bar{e}_{\tau})^+ = \operatorname{sign}(\bar{e}_{\tau}) \bar{e}_{\tau} \leq |\bar{z}_{\tau}| \quad (63)$$

从方程中, z_{τ} 是可微的, 并且 $\bar{z}_{\tau}$ 对应于一个有界函数。此外, 必须存在一个常数 $\ell_{\tau} > 0$, 满足 $|\bar{z}_{\tau}| \leq \ell_{\tau}$ 给定并且 $\lim_{t \rightarrow t_{H+1}^-} e_{\tau}(t) = \mu_{\tau}$, 我们推导出执行间隔的下限为 $t^* \geq (\mu_{\tau}/\ell_{\tau})$, 这证实了避免了芝诺行为。

备注 1: 必须指出的是, 前面讨论的参数只是确保了不确定非线性多智能体的稳定性。

1) 上述控制器设置所选参数对控制性能有重大影响。提高设计参数 $g_{\tau,k}$ 和 $\kappa_{\tau,k}$, 或降低设计参数 $o_{\tau,k}$, 都能使系统达到更高的精度。

2) 增加参数 $\psi_{\tau,k}$ 可加快系统响应速度, 但可能会增加系统误差。减少参数 $\omega_{\tau,\infty}$ 会提高系统的精确度, 从而延长事件触发后控制器更新的间隔时间。系统会出现较小的振荡, 因此合理的参数调整将有利于系统的稳定性。

3) 控制信号更新频率的 μ_{τ} 增加会降低控制信号更新的频率, 从而更加节省资源。但是, 如果 μ_{τ} 增长过大, 系统的性能可能会下降。

4) 虽然减少控制信号 λ_{τ} 可能会导致系统控制信号的大幅波动, 但却可以提高多智能体系统的控制性能。

备注 2: 在事件触发控制技术中, 当控制信号的振幅增大时, 通常会采用较高的阈值, 从而延长系统输入信号的更新间隔。但是, 如果控制信号的振幅超过临界值, 就会导致控制信号的测量出现相当大的误差。在刷新控制输入时, 系统可能会遇到较大的脉冲信号, 从而严重降低系统性能。此外, 为了将 Pade 方法的近似补偿误差降至接近零, 必须减小系统的输入延迟。因此, 本文的控制方法在面对具有超大控制信号和超长延迟特征的系统时仍会遇到困难。

4 仿真实例

为了验证本文所设计控制器的有效性, 以下将研究一个受到输入延迟和外部干扰影响的非线性多智能体系统:

$$\begin{cases} \bar{\xi}_{\tau,1} = v_{\tau,1}(\bar{\xi}_{\tau,1}) + \bar{\xi}_{\tau,2} + \Delta_{\tau,1}(t), \\ \bar{\xi}_{\tau,2} = v_{\tau,2}(\bar{\xi}_{\tau,2}) + u_{\tau}(t - \zeta_{\tau}) + \Delta_{\tau,2}(t), \\ y_{\tau} = \bar{\xi}_{\tau,1}, \tau = 1, 2, 3. \end{cases} \quad (64)$$

其中输入延迟为 $\zeta_{\tau} = 0.01$, 随机扰动为 $\Delta_{1,1} = 0.5\cos(t)$, $\Delta_{1,2} = \sin(t)\cos(t)$, $\Delta_{2,1} = 0.2\sin(t)$, $\Delta_{2,2} = \sin(0.5t)$, $\Delta_{3,1} = \cos(t)$, $\Delta_{3,2} = 0.5\cos(t)\sin(t)$ 。非线性函数为 $v_{1,1} = 0.5e^{-\bar{\xi}_{1,1}}$, $v_{1,2} = 0.3\sin(\bar{\xi}_{1,1})\cos(\bar{\xi}_{1,2})$, $v_{2,1} = -0.2\bar{\xi}_{2,1}e^{-\bar{\xi}_{2,1}}$, $v_{2,2} = \bar{\xi}_{2,1}^2\cos(\bar{\xi}_{2,2})$, $v_{3,1} =$

$\xi_{3,1} \cos(\xi_{3,1})$, $v_{3,2} = 0.4 \xi_{3,2} \sin(\xi_{3,1})$ 。初始参数定义为 $\xi_1(0) = [0.5, 1]^T$, $\xi_2(0) = [0.5, 0]^T$ 和 $\xi_3(0) = [0, -1]^T$ 。

图 1 展示了领导者和追随者之间的有向拓扑图, 其中 F_1 、 F_2 和 F_3 代表追随者, 而 L_1 和 L_2 代表领导者。领导者的轨迹定义为: $y_{r1} = \sin(t) + 1$, $y_{r2} = \sin(t) - 0.7$ 。

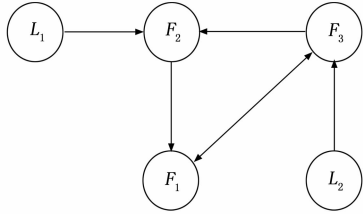


图 1 有向通信图

模糊模型的隶属度函数选择如下:

$$\bar{\mu}_{F'}(\xi_{r,1}) = \exp\left(\frac{-(\xi_{r,1} + 2 - 0.5l)^2}{2}\right) \quad (65)$$

$$\bar{\mu}_{F'}(\xi_{r,1}, \xi_{r,2}) = \exp\left(\frac{-(\xi_{r,1} + 2 - 0.5l)^2}{2}\right) \times \exp\left(\frac{-(\xi_{r,2} + 2 - 0.5l)^2}{2}\right) \quad (66)$$

其中: $l = 1, \dots, 7$ 。系统的设计参数是 $g_{1,1} = 27$,

$g_{1,2} = 28$, $g_{2,1} = 20$, $g_{2,2} = 27$, $g_{3,1} = 50$, $g_{3,2} = 57$, $c_{r,2} = 0.01$ 。规定的性能函数及其各自的参数如下: $\omega_{1,0} = 8.25$, $\omega_{2,0} = \omega_{3,0} = 7.25$, $\omega_{r,\infty} = 0.25$, $\phi_{1,1} = 0.21$, $\phi_{2,1} = 0.18$, $\phi_{3,1} = 0.22$, $\phi_{1\min} = 0.95$, $\phi_{2\min} = \phi_{3\min} = 0.99$, $\phi_{r\max} = 1$ 。事件触发控制的相关参数设计为 $\lambda_r = 0.01$, $\bar{\omega}_r = 0.02$, $\mu_r = 0.05$, $\mu_1 = \mu_2 = 0.02$, $\mu_3 = 0.01$ 。自适应控制器的设计, 结合所提出的预设性能和事件触发机制, 应用于具有输入时滞和随机扰动的不确定非线性严格反馈多智能体智能系统, 仿真结果如图 2~6 所示。

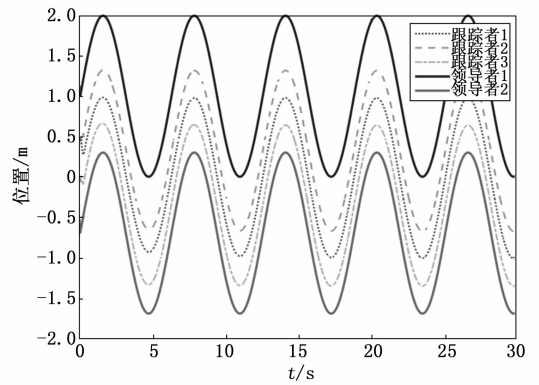
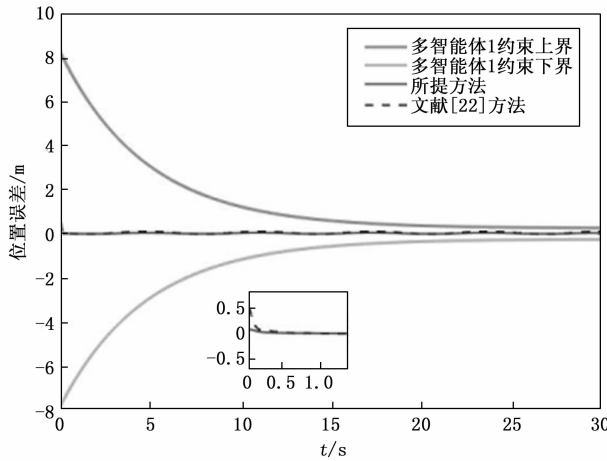
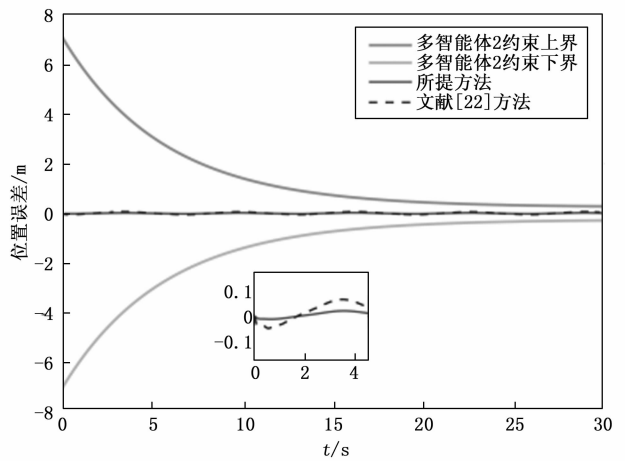


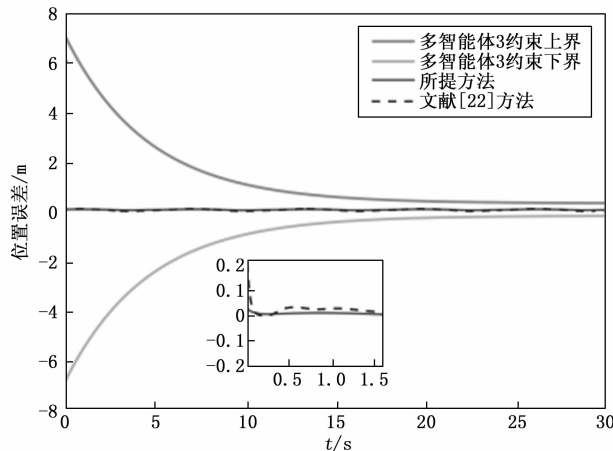
图 2 多智能体一阶输出曲线



(a) 多智能体1的包容误差



(b) 多智能体2的包容误差



(c) 多智能体3的包容误差

图 3 多智能体的包容误差

图 2 展示了在输入时滞和随机扰动作用下, 多智能体系统的输出轨迹。从图中可以看出, 所设计的控制器有效地解决了上述问题, 并验证了控制性能的有效性。

为了进一步验证本文所提出的控制方法的有效性, 我们将其与文献 [22] 中提出的自适应控制方法进行了对比。图 3 展示了多智能体系统的包含误差曲线。从图 3 (a) 中可以清晰地看到, 本文设计的多智能体系统在 0.02 秒时误差便收敛至零, 而文献 [22] 中的方法收敛至零则需要 0.2 秒。与文献 [22] 的方法相比, 本文控制方法的收敛时间大幅缩短, 提高了 90%。同理可得, 其他两个多智能体的收敛时间分别提高了 95% 和 92%。此外, 本文设计的控制器在误差包容方面表现更优, 其误差更小, 能够显著提升系统的精度和速度, 快速收敛至零, 从而进一步凸显了本文控制方法的优越性。

图 4 清晰地展示了事件触发机制下的系统控制信

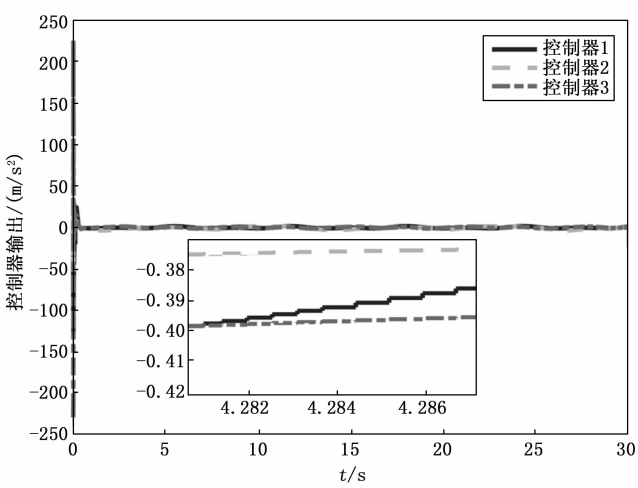


图 4 多智能体控制器

号情况。从图中可以看出, 在未达到触发阈值之前, 控制输入始终保持恒定不变。而对控制输入的调整, 仅在系统满足所设定的事件触发相对阈值时才会进行。

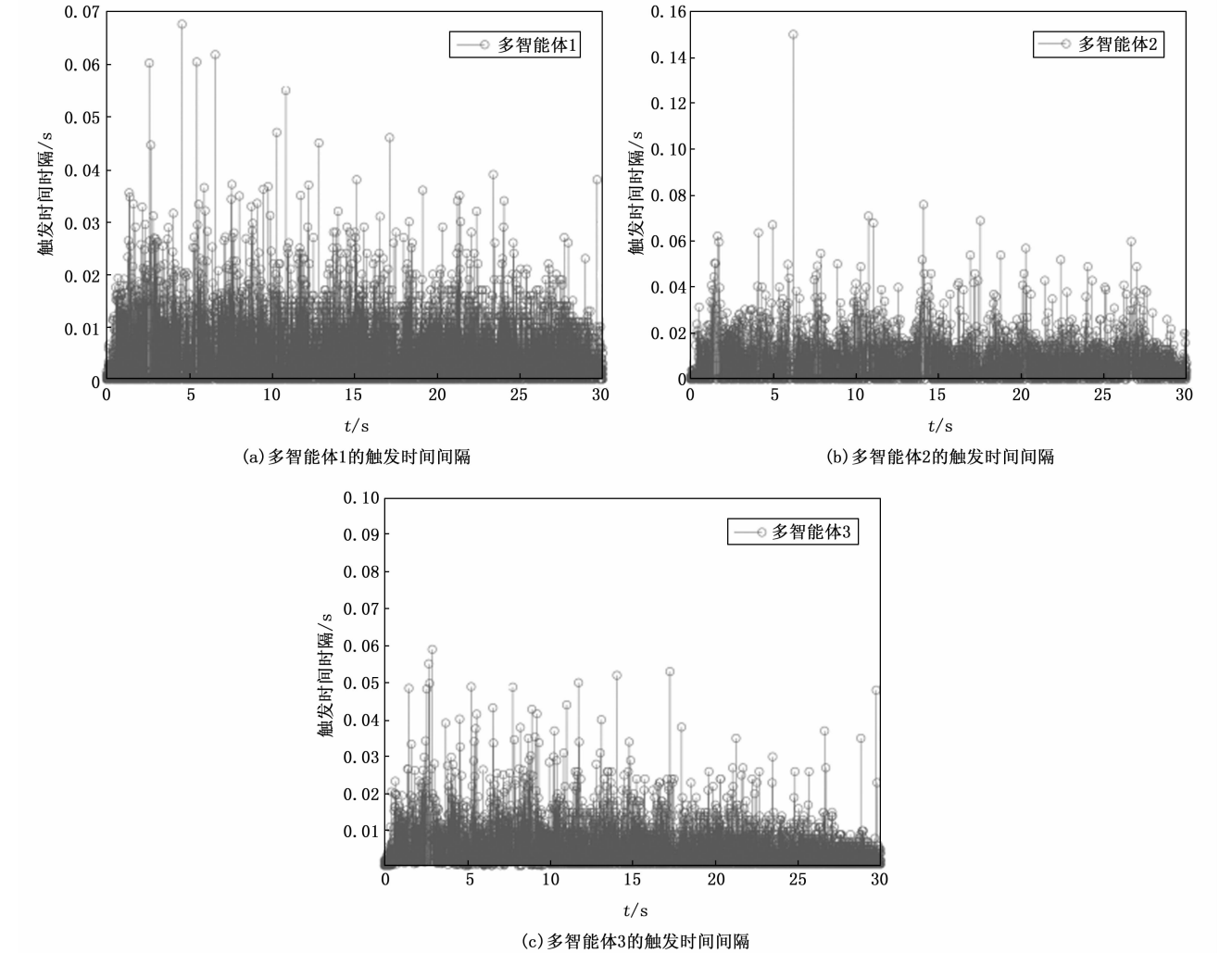


图 5 多智能体事件触发间隔

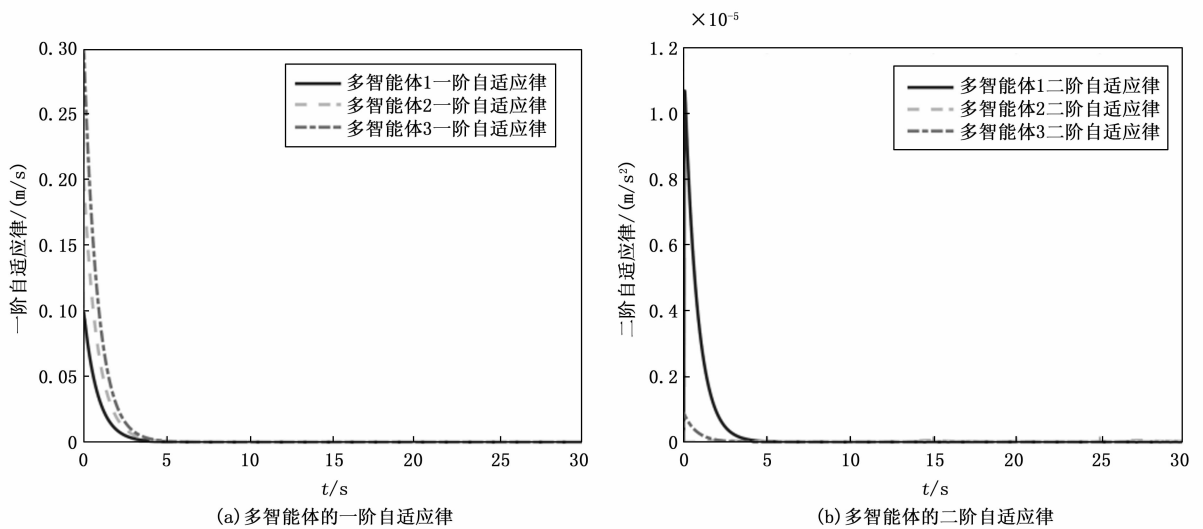


图 6 多智能体的自适应律曲线

这种基于事件触发的控制方式,相较于传统的定时触发机制,能够显著减少控制器的使用频率,从而有效降低系统对控制器资源的依赖,优化系统资源的利用效率。

图 5 描绘了采用具有相对阈值的事件触发控制方法时控制器的更新时序。从图中可以明显看出,当事件触发条件未被满足时,控制器无需进行更新。这表明,通过该事件触发机制,能够有效避免不必要的控制器更新操作。由此,控制器的更新频率得以显著降低,进而实现了对通信和计算资源的优化配置,提高了系统的整体运行效率。

图 6 展示了多智能体系统的自适应律曲线图。通过图示可观察到,随着自适应律的收敛,多智能体系统的参数调整逐步趋于稳定。这表明系统能够通过自适应机制,自动调整控制参数,从而有效实现预定的控制目标。

5 结束语

本研究的重点是以随机干扰和输入延迟为特征的不确定非线性多代理系统中的包容控制问题。通过利用中间变量和 Pade 近似法,大大降低了系统对输入延迟的敏感性。为了估计未知的状态参数,系统采用了模糊逻辑技术。基于预设性能和事件触发机制,以及指令过滤和补偿技术,提出了一种新开发的自适应模糊控制控制器。通过利用 Lyapunov 稳定性理论,可以证明在整个过程中,闭环系统的信号始终保持有界,不会出现芝诺现象。此外,模拟实验证实了所建议控制协议的可行性。模拟结果表明,事件触发机制在预定义性能指标和相对阈值的驱动下,改善了系统的瞬态行为,降低了控制器的更新频率,从而大大节省了通信资源。未来的研

究将侧重于探索多智能体系统在预定义时间内面临的包容控制挑战。

参考文献:

- [1] WANG Y W, ZENG Z H, LIU X K, et al. Input-to-state stability of switched linear systems with unstabilizable modes under DoS attacks [J]. Automatica, 2022, 146: 110607.
- [2] QIN H D, CHEN H, SUN Y C. Distributed finite-time fault-tolerant containment control for multiple ocean bottom flying nodes [J]. Journal of the Franklin Institute, 2020, 357: 11242 - 11264.
- [3] 马俊达, 孙鹤方, 谭冲, 等. 动态约束下船舶固定时间非奇异滑模包容控制 [J]. 电机与控制学报, 2024, 28: 167 - 176.
- [4] YUAN F, LIU Y J, LIU L, et al. Adaptive neural network control of non affine multi-agent systems with actuator fault and input saturation [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2024, 34: 3761 - 3780.
- [5] WANG W, TONG S. Adaptive fuzzy containment control of nonlinear strict feedback systems with full state constraints [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27: 2024 - 2038.
- [6] DENG Y, LECHAPPE V, MOULAY E, et al. Predictor-based control of LTI remote systems with estimated time-varying delays [J]. IEEE Control Systems Letters, 2020, 5: 289 - 294.
- [7] WANG Y, LI S, WANG D, et al. Adaptive time-delay control for cable-driven manipulators with enhanced nonsingular fast terminal sliding mode [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68: 2356 - 2367.

- [8] ALDANA C I, GARCIA-LOPEZ K, NUNO E, et al. Task-Space Teleoperation with Time-Delays and Without Velocity Measurements via a Bounded Controller [J]. IEEE Control Systems Letters, 2022, 7: 1141–1146.
- [9] YANG Z, ZHANG Q, JIANG Z, et al. Flocking of multi-agents with time delay [J]. International Journal of Systems Science, 2012, 4: 2125–2134.
- [10] XING M L. Scaled consensus for multi-agent systems with communication time delays [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2018, 40: 2651–2659.
- [11] NIU Y, YANG Y, NIU B, et al. Robust consensus tracking strategy of heterogeneous nonlinear multi-agent systems with time-varying input delays [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023, 1: 1–12.
- [12] ZHANG Z, CHEN S, SU H. Scaled consensus of second-order nonlinear multiagent systems with time-varying delays via aperiodically intermittent control [J]. IEEE transactions on cybernetics, 2019, 50: 3503–3516.
- [13] LEI J, LI Y X, TONG S. Fuzzy adaptive distributed optimization of uncertain multiagent systems with time-varying delays [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2024, 32: 6125–6135.
- [14] WANG H, YOU Y, LI W. Distributed output-feedback tracking for stochastic nonlinear multiagent systems with time-varying delays [J]. IEEE Access, 2022, 10: 69323–69332.
- [15] ZUO, Z, WANG, C, DING, Z. Robust consensus control of uncertain multi-agent systems with input delay: a model reduction method [J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2017, 27: 1874–1894.
- [16] SUN Y, SU H, WANG X, et al. Scaled consensus of exponentially unstable networked systems with time-varying input delay [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53: 4548–4559.
- [17] OH S Y, CHOI H L. Event-triggered global regulation of an uncertain chain of integrators under unknown time-varying input delay [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2022, 105: 1091–1095.
- [18] PARK J S, OH S Y, CHOI H L. Global regulation of a chain of integrators with an unknown delay in the input via reduced-order observer based output feedback with a gain-scaling factor [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2022, 20: 2868–2878.
- [19] WANG W, LIANG H J, ZHANG Y H, et al. Adaptive cooperative control for a class of nonlinear multi-agent systems with dead zone and input delay [J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 96: 2707–2719.
- [20] YAO D, LIU X, WU J. Adaptive finite-time tracking control for class of uncertain nonlinearly parameterized systems with input delay [J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2020, 18: 2251–2258.
- [21] YANG Z, WANG K, WU Q. Adaptive fuzzy event-triggered control for non-strict feedback nonlinear systems with input delay and full state constraints [J]. IEEE Access, 2023, 11: 113148–113159.
- [22] DENG X, CUI Y. Adaptive fuzzy containment control for nonlinear multi-agent systems with input delay [J]. International Journal of Systems Science, 2021, 52: 1633–1645.
- [23] BECHLIOLIS C P, ROVITHAKIS G A. Robust adaptive control of feedback linearizable MIMO nonlinear systems with prescribed performance [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53: 2090–2099.
- [24] SHAO S, AN Z, CHEN M, et al. Resilient neural control based on event triggered extended state observers and the application in unmanned aerial vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9: 930–943.
- [25] SALMANPOUR Y, MEHDI AREFI M, KHAYATIAN A, et al. Event-triggered fuzzy adaptive leader-following tracking control of nonaffine multiagent systems with finite-time output constraint and input saturation [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022, 30: 933–944.
- [26] A T Z, A C L, B X L A, et al. Finite-time prescribed performance adaptive fuzzy control for unknown nonlinear systems-science direct [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2021, 402: 16–34.
- [27] DU S L, LIU T, HO D W C. Dynamic event-triggered control for leader following consensus of multiagent systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50: 3243–3251.
- [28] SUN Y, JI Z, LIU K. Event-based consensus for general linear multiagent systems under switching topologies [J]. Complexity, 2020, 2020: 5972749.
- [29] TAN X, CAO M, CAO J, et al. Event-triggered synchronization of multiagent systems with partial input saturation [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2021, 8: 1406–1416.
- [30] DU S L, LIU T, HO D W C. Distributed event-triggered fixed-time consensus for leader-follower multiagent systems with nonlinear dynamics and uncertain disturbances [J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2018, 28: 3543–3559.
- [31] LI Y X, YANG G H, TONG S. Fuzzy adaptive distribu-

- ted event-triggered consensus control of uncertain nonlinear multiagent systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49: 1777–1786.
- [32] MA H, LIU D, WANG D, et al. Centralized and decentralized event triggered control for group consensus with fixed topology in continuous time [J]. Neurocomputing, 2015, 161: 267–276.
- [33] YE D, CHEN M M, YANG H J. Distributed adaptive event-triggered fault tolerant consensus of multiagent systems with general linear dynamics [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 49: 757–767.
- [34] XU S, HO D W C, LI L. A distributed event-triggered scheme for discrete time multi-agent consensus with communication delays [J]. Iet Control Theory & Applications, 2014, 8: 830–837.
- [35] CAO L, REN H, MENG W, et al. Distributed event triggering control for six-rotor UAV systems with asymmetric time-varying output constraints [J]. Science China Information Sciences, 2021, 64: 172213.
- [36] WEI L, CHEN M. Distributed DETMs-based internal collision avoidance control for UAV formation with lumped disturbances [J]. Applied Mathematics and Computation, 2022, 433: 127362.
- [37] LIU J, YIN T, YUE D, et al. Event-based secure leader-following consensus control for multiagent systems with multiple cyberattacks [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 51: 162–173.
- [38] MURUGESAN S, LIU Y C. Resilient finite-time distributed event-triggered consensus of multi-agent systems with multiple cyber-attacks [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2023, 116: 106876.
- ~~~~~
- (上接第 184 页)
- [8] 上官朝伟, 李小彭, 李 泉, 等. 模糊 PI 控制器与干扰观测器相结合的空间柔性机械臂的转动控制策略 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2023, 54 (12): 4687–4698.
- [9] 王志芬, 朱 强, 边 军, 等. 抗关节角度突变的多机械臂运动轨迹优化方法 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (11): 403–407.
- [10] 王旭升, 王荣博, 李 洋, 等. 基于位置控制的多自由度机械臂非线性比例-微分阻抗控制 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (24): 10410–10418.
- [11] 淡乾川, 崔凤坤. 机械臂外力的时延强跟踪 Kalman 估计与自学习控制 [J]. 机械设计与制造, 2024, (4): 308–313.
- [12] 陈少南, 赵桂生, 刘 蕾, 等. 基于自适应阻抗控制的大负载液压机械臂柔顺控制 [J]. 液压与气动, 2024, 48 (4): 15–21.
- [13] 丁 杨, 张明路, 焦 鑫, 等. 关节电机驱动六足机器人仿生结构设计及柔顺运动控制 [J]. 工程设计学报, 2023, 30 (2): 154–163.
- [14] 林麒光, 刘 宇, 李 杰, 等. 基于轨迹测量与人机映射的六自由度机械臂运动追踪模型 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (3): 102–110.
- [15] 田新扬, 战 强, 许钦桓. 基于期望阻抗行为的柔性关节控制器设计 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44 (9): 1613–1621.
- [16] 羊 波, 王 琨, 马祥祥, 等. 多智能体强化学习的机械臂运动控制决策研究 [J]. 计算机工程与应用, 2023, 59 (6): 318–325.
- [17] 师 玮, 张金柱, 王 涛, 等. 改进型 PSO 的 6 自由度工业机械臂轨迹规划 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022, (9): 24–28.
- [18] 袁旭华, 刘 羽, 林喜辉. 机械臂时间最优轨迹的样条曲线拟合与智能规划 [J]. 机械设计与制造, 2022, (9): 162–167.
- [19] 谢 嘉, 窦良浩, 李永国, 等. 五自由度机械臂运动分析及轨迹规划 [J]. 制造业自动化, 2022, 44 (7): 11–15.
- [20] 高勋凯, 于海生, 孟祥祥, 等. 永磁同步电机驱动的机械臂能量优化与位置控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024, (5): 85–90.
- [21] 南凯刚, 杨 帆, 汪 可, 等. 有载分接开关驱动轴转动位置的闭环反馈抗扰控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56 (6): 58–66.
- [22] 陈 钢, 高贤渊, 赵治恺, 等. 空间机械臂智能规划与控制技术 [J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54 (1): 1–16.
- [23] 刘 茜, 刘传凯, 朱 安, 等. 空间机械臂运动控制的地面仿真验证技术 [J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54 (1): 58–67.
- [24] 王志芬, 朱 强, 边 军, 等. 抗关节角度突变的多机械臂运动轨迹优化方法 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (11): 403–407.
- [25] 孙巍伟, 代 锟, 马 飞. 空间柔性机械臂建模、控制以及轨迹规划研究综述 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (1): 34–60.