

基于观测器的人在环多机械臂系统预设性能二分一致性

刘沛明^{1,2} 郭祥贵^{1,2}

摘要 研究通讯拓扑为符号有向图的人在环多机械臂系统的预设性能二分一致性跟踪控制问题. 为在预设时间内收敛到预设精度, 提出一种基于观测器的预设性能控制策略. 首先, 设计预设时间和精度的观测器以估计领导者的输出信息, 通过合作/竞争信息交互实现观测器输出的二分一致性. 该观测器不需要领导机械臂的输入信息及输出信息的高阶导数, 并通过无芝诺行为的事件触发机制降低不同机械臂间的通讯负担. 其次, 通过反步法及误差转化法将有约束的机械臂输出跟踪问题转化为无约束的误差系统稳定性问题, 进而基于观测器输出设计机械臂的输出调节控制器. 值得一提的是, 设计的控制策略不需要系统初始状态的先验知识且避免了预设时刻控制增益无穷大的现象, 增强了系统的可靠性. 最后, 仿真结果表明所提控制策略的可行性及优越性.

关键词 多机械臂系统, 二分一致性, 预设时间和精度, 人在环控制

引用格式 刘沛明, 郭祥贵. 基于观测器的人在环多机械臂系统预设性能二分一致性. 自动化学报, 2024, 50(9): 1761–1771

DOI 10.16383/j.aas.c230622

Observer-based Prescribed Performance Bipartite Consensus for Human-in-the-loop Multi-manipulator Systems

LIU Pei-Ming^{1,2} GUO Xiang-Gui^{1,2}

Abstract This paper investigates the problem of prescribed performance bipartite consensus tracking control of a class of human-in-the-loop multi-manipulator systems with communication topology represented by a signed directed graph. In order to converge to a prescribed accuracy within a prescribed time, an observer-based prescribed performance control strategy is proposed. First, a prescribed-time and prescribed-accuracy observer is designed to estimate the leader's output information. Meanwhile, the bipartite consensus of observer outputs is achieved through cooperation/competition information exchange. Notably, the designed observer does not require inputs and higher-order derivatives of outputs of the leader manipulator. In addition, an event-triggered mechanism without Zeno behavior is adopted to reduce the communication burden among different manipulators. Second, the constrained output tracking problem for manipulator systems is transformed into an unconstrained stability problem for error systems by using backstepping and error transformation techniques. Subsequently, an output regulation controller for manipulator systems is designed based on observer outputs. It is worth mentioning that the proposed control strategy does not necessitate prior knowledge of the system's initial states and avoids the issue of infinite control gains at prescribed time, thereby enhancing the system's reliability. Finally, simulation results demonstrate the feasibility and superiority of the proposed control strategy.

Key words Multi-manipulator systems, bipartite consensus, prescribed-time and prescribed-accuracy, human-in-the-loop control

Citation Liu Pei-Ming, Guo Xiang-Gui. Observer-based prescribed performance bipartite consensus for human-in-the-loop multi-manipulator systems. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(9): 1761–1771

收稿日期 2023-10-09 录用日期 2024-03-29

Manuscript received October 9, 2023; accepted March 29, 2024
雄安新区科技创新专项 (2023XAGG0062), 国家自然科学基金 (62173028, 62233015), 广东省基础与应用基础研究基金 (2024A1515011493), 北京自然科学基金 (4232060, IS23065) 资助

Supported by Science, Technology & Innovation Project of Xiongan New Area (2023XAGG0062), National Natural Science Foundation of China (62173028, 62233015), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2024A1515011493), and Beijing Natural Science Foundation (4232060, IS23065)

本文责任编辑 赵旭东

Recommended by Associate Editor ZHAO Xu-Dong

1. 北京科技大学自动化学院 北京 100083 2. 北京市工业波谱成像工程技术研究中心 北京 100083

1. School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

机器人技术被认为将主导未来十年, 其应用市场将大幅增长. 目前, 先进的机器人系统正受到学术界和工业界的广泛关注^[1]. 这种兴趣源于它们在半导体制造、医疗、航空航天、军事等领域的潜在应用价值. 特别是, 机器人已被广泛应用于装配、码垛、焊接、喷漆、3D 打印等^[2-3]. 在这些应用中, 多个机械臂的协作至关重要. 近年来, 随着微控制及无线通讯技术的发展, 多智能体系统的协同控制受到了

2. Beijing Engineering Research Center of Industrial Spectrum Imaging, Beijing 100083

广泛关注^[4]. 由于其能完成单个智能体所不能完成的复杂任务, 被广泛应用在编队飞行^[5]、智能电网^[6]、机械臂群同步^[7]等领域. 一致性作为协同控制的基础课题, 其目的是在位置和速度等状态上达到一致, 研究者进行了大量的研究^[8-10]. 针对有领导者的情况, 文献^[11-13]研究了领导跟随一致性问题, 其中的跟随者跟踪领导者的状态. 需要注意的是上述一致性结果都是通过智能体之间的合作完成的, 换句话说, 多智能体系统的通讯拓扑通过非负权重的无符号图描述^[14]. 因此, 系统中的所有智能体最终都达到同一个状态. 然而, 在一些实际的多智能体系统中, 一些智能体可能与其邻居表现出对抗作用, 如生产线两侧双机械臂系统的物品传送需要两个机械臂的运动状态对称, 表现为两个机械臂相对自身的运动轨迹相反(竞争特性). 此时智能体间的拓扑兼具正负两种权重^[15]. 在这种情况下, 二分一致性在近年来得到了大量的研究, 如针对线性系统在无向图^[16]及有向图^[17-18]拓扑情况下分别设计二分一致性控制策略, 以及针对非线性系统的有向图^[19]和无向图^[20]情况. 然而, 前面所提二分一致性研究的前提是多智能体系统中所有智能体为自治系统. 这一要求在处理一些紧急情况下过于理想, 可能导致严重的事故, 如特斯拉自动驾驶汽车的碰撞及波音737喷气式客机的坠毁^[21]. 在这种情况下, 通常安排人类操作员辅助自治系统完成复杂任务. 文献^[22]和文献^[23]分别研究了单智能体和多智能体系统的人在环控制策略, 相比于完全自治系统, 人在环系统的鲁棒性和灵活性更强. 因此, 研究存在对抗交互的人在环多机械臂系统的二分一致性问题具有重要的理论与实际意义.

另一方面, 在机器人的很多应用场景中, 对收敛时间和收敛精度有较高的要求, 通常需要在较短的时间内达到较高的跟踪精度^[24]. 显然, 有限时间控制^[23, 25]、固定时间控制^[26-27]和预设时间控制^[28-30]在这方面发挥着至关重要的作用. 相比于有限时间控制中收敛时间与系统的初始状态相关^[23]和固定时间控制中收敛时间以一个与系统初始状态无关的常数为界^[26], 预设时间控制能够根据用户的需求提前设定任意的收敛时间. 因此, 预设时间控制在实际应用中更具吸引力. 然而, 文献^[28-30]中的预设时间控制方法为了达到零稳态误差, 预设时刻无穷大的控制增益不可避免. 预设性能控制保证了收敛误差始终在预设区域内^[31], 常见的预设性能控制方法可以分为两种: 构造障碍函数法^[31-32]和误差转化法^[33-34]. 然而, 文献^[31-32]中的控制策略需要系统初始状态的先验知识, 这会导致控制器在一些场合

无法适用; 文献^[33-34]中通过误差转化法同时考虑了收敛时间和收敛精度的需求, 同样需要系统初始状态的先验知识. 因此, 在不知道系统先验知识的情况下同时考虑收敛时间和收敛精度的控制策略需要进一步的研究.

基于上述讨论, 本文针对人在环多机械臂系统设计一种预设性能的二分一致性跟踪控制方法, 其收敛时间和收敛精度均可由设计者在不知道系统初始状态先验知识的情况下提前分配. 本文的设计难点包括: 1) 有人机械臂的输入及输出信息的导数未知, 需要进行估计; 2) 系统初始状态的先验知识未知且系统对收敛时间和收敛精度要求严格. 本文的主要创新点包含:

1) 本文的控制方法引入人在环策略, 为领导机械臂系统设计手势控制方案, 与传统的二分一致性控制方法^[16-20]相比, 在高度不确定和安全严格的环境中提高了系统的可靠性和灵活性.

2) 设计一种预设时间和精度的二分一致性控制策略. 与文献^[35]中的观测器相比, 所提基于观测器的控制策略在不需要有人机械臂的输入信息和输出信息的高阶导数的情况下实现了多机械臂系统的二分一致性. 此外, 不同于文献^[31-34]根据初始条件设计性能函数, 本文设计的预设时间和精度的控制策略不需要系统初始条件的先验知识.

3) 不同于文献^[36]中的预设时间和精度的群一致性控制策略, 所设计控制器不需要机械臂系统结构的动态关系. 需要指出的是, 本文通过神经网络逼近系统未知动态函数, 并进一步通过预设性能控制削弱逼近误差对系统的影响, 实现对存在模型未知动态的系统预设精度的精准控制.

符号说明: \mathbf{R} , \mathbf{R}^M 和 $\mathbf{R}^{N \times N}$ 分别为全体实数集、 M 维欧氏空间以及所有 $N \times N$ 实矩阵的集合; \cup 和 \cap 分别表示并集和交集; $|\cdot|$ 表示标量的绝对值; \emptyset 为空集; $\exp(\cdot)$, $\text{sgn}(\cdot)$ 以及 $\text{diag}\{\cdot\}$ 分别代表指数函数、符号函数以及对角矩阵; $\lambda_{\max}(\cdot)$ 和 $\lambda_{\min}(\cdot)$ 分别表示矩阵特征值的最大值和最小值; $\sup\{\cdot\}$ 表示非空集合的上确界.

1 问题描述及预备知识

1.1 代数图论

网络的信息流向可以用有向的符号图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$ 来表征, 其中 $\mathcal{V} = \{1, \dots, N\}$ 为由关联机械臂索引的顶点集; $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V} = \{(i, j) | i, j \in \mathcal{V}\}$ 为边集, $(i, j) \in \mathcal{E}$ 表示存在 i 到 j 的信息流; \mathcal{A} 为符号权重的邻接矩阵. 如果节点 j 到节点 i 存在信息

流, 即 $(j, i) \in \mathcal{E}$, 则 $a_{ij} \neq 0$, 否则 $a_{ij} = 0$. 假设图中没有自环, 即 $a_{ii} = 0$. 定义拉普拉斯矩阵 $L = [l_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 为

$$l_{ij} = \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq i}^N |a_{ij}|, & j = i \\ -a_{ij}, & j \neq i \end{cases}$$

假设存在两个集合 \mathcal{V}_1 和 \mathcal{V}_2 满足 $\mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_2 = \mathcal{V}$ 和 $\mathcal{V}_1 \cap \mathcal{V}_2 = \emptyset$, 如果对任意的 $i, j \in \mathcal{V}_\ell, \ell \in \{1, 2\}$, 有 $a_{ij} \geq 0$, 对任意的 $i \in \mathcal{V}_\ell, j \in \mathcal{V}_{3-\ell}$, 有 $a_{ij} \leq 0$, 则图 \mathcal{G} 为结构平衡的. 此外, 如果任意两个节点间存在有向路径, 则图 \mathcal{G} 为联通的. 定义 $B = \text{diag}\{b_1, \dots, b_N\}$, 其中 $b_i > 0$ 表示节点 i 可以直接接收有人机械臂的信息, 其他情况下 $b_i = 0$.

1.2 机械臂模型

单个机械臂的动态方程如下

$$J\ddot{p} + H\dot{p} + mgl \sin(p) = \mathcal{U} \quad (1)$$

其中, \ddot{p} , \dot{p} 以及 p 分别为连杆的角加速度、角速度以及角位置; \mathcal{U} 表示电机扭矩的输入信号; J 和 H 分别为电机的转动惯量和阻尼系数; l, m, g 分别为关节轴线至质心的长度、连杆质量以及重力加速度.

考虑多机械臂系统包含 N 个跟随机械臂和 1 个作为领导者的有人机械臂, 其通讯拓扑为有向的符号图 \mathcal{G} . 第 i 个机械臂的动态可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_{i,1} = x_{i,2} \\ \dot{x}_{i,2} = u_i + f_i(\bar{x}_i) \\ y_i = x_{i,1}, \quad i = 0, 1, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

其中, $x_{i,1} = p_i, x_{i,2} = \dot{p}_i, \bar{x}_i = [x_{i,1}, x_{i,2}]^T, u_i = \mathcal{U}/J, f_i(\bar{x}_i) = -x_{i,2}H/J - (mgl \sin(x_{i,1}))/J, y_i$ 为机械臂的输出信号. 编号为 0 的机械臂为有人机械臂, u_0 为使用者的操作输入.

注 1. 与自治的跟随机械臂相比, 有人机械臂可以通过手势进行控制^[5]. 图 1 展示了一种手势控制领导机械臂运动的示意图, 表 1 列出了手势、领导机械臂动作以及对应领导机械臂输入之间的关系. 此外, 不同于文献 [7] 中假设自治领导者的前 n 阶导数 (或领导者的输入信号) 已知, 本文中仅有人机械臂的角度输出信息提供给跟随机械臂, 这符合实际情况, 原因是实际应用中机械臂运动的各阶状态及其输入难以准确测量, 甚至无法测量.

假设 1. 有人机械臂的输出信号 y_0 不存在跳跃, 即其导数有界, 满足 $|\dot{y}_0| \leq \bar{y}_0$, 其中 $\bar{y}_0 > 0$ 为未知的上界.

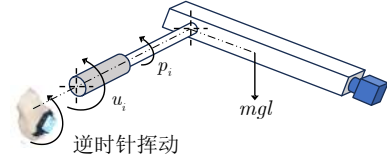


图 1 手势及机械臂示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gesture and manipulator

表 1 手势与领导机械臂动作的对应关系

Table 1 The corresponding relationship between the gesture and the action of the leader manipulator

手势	动作	u_0
逆时针挥动	逆时针转动	$u_0 = \mathfrak{S}_g \tanh(v_g)$
顺时针挥动	顺时针转动	$u_0 = -\mathfrak{S}_g \tanh(v_g)$

注: $\mathfrak{S}_g > 0$ 和 $v_g > 0$ 分别为放大系数及经过预处理的手势挥动速度.

假设 2. 人在环多机械臂系统 (2) 的通讯拓扑联通且结构平衡. 此外, 至少存在一个机械臂能接收有人机械臂的信息.

1.3 径向基神经网络

如果径向基神经网络的神经元个数足够多, 则其能逼近任意的连续函数 $f: \mathbf{R}^M \rightarrow \mathbf{R}$. 此时, 函数 $f(Z)$ 可以表示为

$$f(Z) = [\Phi^*]_{M_1 \times 1}^T \Gamma(Z) + \zeta(Z) \quad (3)$$

其中, $Z = [Z_1, \dots, Z_{M_1}]^T$ 为神经网络的输入, M_1 为神经元个数, Φ^* 为理想权重向量, $\zeta(Z)$ 为有界逼近误差且常数上界为 $\zeta^* \in \mathbf{R}_+$, $\Gamma(Z) = [\Gamma_1(Z), \dots, \Gamma_{M_1}(Z)]^T$ 为核函数向量, 本文选择高斯核函数表示为

$$\Gamma_m(Z) = \exp\left(-\frac{(Z - o_m)^T(Z - o_m)}{2\pi_m^2}\right) \quad (4)$$

其中, $m = 1, \dots, M_1$; o_m 和 π_m 分别表示高斯核函数的中心及对应域的宽度.

1.4 控制目标和理论准备

为方便描述, 给出如下预设时间和精度二分一致性的定义.

定义 1. 考虑人在环多机械臂系统 (2), 对于给定的收敛时间 T 和收敛精度 ε , 如果在任意的初始条件 $\bar{x}_i(0)$ 下都满足

$$|y_i - d_i y_0| < \varepsilon, \quad t \geq T, \quad i = 1, \dots, N \quad (5)$$

其中, $d_i \in \{-1, 1\}$ 为领导者到节点 i 有向路径上所有权重乘积的符号, 则系统 (2) 达到了预设时间和精度二分一致性.

本文的控制目标是设计预设时间和精度控制律

实现人在环多机械臂系统 (2) 的预设时间和精度二分一致性. 为完成控制目标, 给出如下引理.

引理 1^[4]. 如果多机械臂系统的符号图为联通且结构平衡的, 则矩阵 $L + B$ 非奇异. 此外, 存在对角矩阵 $D = \text{diag}\{d_1, \dots, d_N\}$ 使 DAD 中所有的元素非负, 其中 $d_i \in \{-1, 1\}$ 为领导者到节点 i 有向路径上所有权重乘积的符号.

注 2. 需要指出的是, 人在环二分一致性并不是群一致性的简单推广, 它们之间存在着较大的区别, 主要不同体现在如下三点: 1) 二者控制器设计过程完全不同, 群一致性^[36-37] 需要采用牵引控制技术解决多领导者时牵引节点的选取问题, 而本文则侧重于合作/竞争关系的处理; 2) 合作/竞争关系下群一致性^[38] 要求系统的通讯拓扑满足入度平衡条件, 而本文仅需要系统的通讯拓扑满足结构平衡条件; 3) 本文的子群划分是由通讯拓扑中的合作/竞争关系决定的, 会因通讯链路及权重的不同而不同, 而文献 [36] 中子群的划分可以由用户指定, 与系统的通讯拓扑没有必然联系.

2 预设时间和精度二分一致性控制

在本节中, 为人在环多机械臂系统提出一个预设时间和精度的二分一致性控制策略. 多机械臂系统的控制结构示意图如图 2 所示, 从图中可以看出, 控制结构由观测器、控制器以及滤波器构成, 其中观测器通过网络交互估计领导者的输出信息并生成参考信号 (观测器输出), 控制器根据观测器生成的参考信号完成输出调节, 从而达到控制目标.

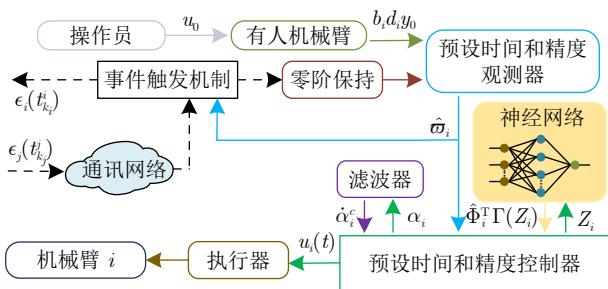


图 2 控制结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the control structure

2.1 预设时间和精度性能函数

对于给定的预设时间 $0 < T < \infty$ 以及预设精度 $0 < \varepsilon < \infty$, 引入如下预设性能函数^[24]

$$\beta(t) = \begin{cases} \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{T}\right)^{2q} + \varepsilon, & 0 < t < T \\ \varepsilon, & t \geq T \end{cases} \quad (6)$$

其中, q 为正整数. 由于机械臂系统 (2) 为二阶系统, 为保证 $\beta^{(\varphi)}(t)$, $\varphi = 0, 1, 2$ 可微, 本文取 $q = 2$.

注 3. 预设性能函数 (6) 在初始时刻趋于无穷大, 逐渐衰减到预设时刻的给定精度, 这一设计使任意初始条件下实现控制目标成为可能. 其次, 预设性能函数 (6) 在预设时刻后维持预设精度能保证系统控制的全局稳定. 不同于文献 [24] 中单智能体的跟踪问题, 本文考虑了合作/竞争下人在环多机械臂系统的二分一致性问题.

2.2 观测器设计

首先, 为每个智能体设计如下观测器来估计领导者的输出 y_0 , 产生参考信号 \hat{w}_i

$$\dot{\hat{w}}_i = v_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

其中, \hat{w}_i, v_i 分别为观测器的输出和输入.

定义如下误差变量

$$\tilde{w}_i(t) = \hat{w}_i(t) - d_i y_0(t) \quad (8)$$

$$e_i(t) = \sum_{j=1}^N |a_{ij}| (\hat{w}_i - \text{sgn}(a_{ij}) \hat{w}_j) + b_i (\hat{w}_i - d_i y_0) \quad (9)$$

$$\gamma_i(t) = c_1 (\beta^2 - e_i^2) \quad (10)$$

其中, c_1 是正的常数, $\tilde{w}_i(t), e_i(t), \gamma_i(t)$ 分别表示观测误差、二分一致性误差以及边界距. 此外

$$e_i(t) = \sum_{j=1}^N |a_{ij}| (\hat{w}_i - \text{sgn}(a_{ij}) \hat{w}_j) + b_i (\hat{w}_i - d_i y_0) = [(L + B)_{i, \cdot}] \tilde{w} \quad (11)$$

其中, $\tilde{w} = [\tilde{w}_1, \dots, \tilde{w}_N]^T$, $[(L + B)_{i, \cdot}]$ 表示矩阵 $L + B$ 的第 i 行.

复合函数 $h(\gamma_i(t))$ 构造如下

$$h(\gamma_i(t)) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{\gamma_i(t)}{l_{1i}} - 1\right)^{2q}, & 0 < \gamma_i(t) \leq l_{1i} \\ 1, & \gamma_i(t) > l_{1i} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $l_{1i} \in \mathbf{R}_+$ 是人为设计的安全系数, 用来表征误差与性能函数的安全间隔.

结合式 (12), 转化误差 $\epsilon_i(t)$ 定义为

$$\epsilon_i(t) = \frac{e_i(t)}{h(\gamma_i(t))} \quad (13)$$

引理 2. 如果转化误差 $\epsilon_i(t)$ 有界, 则对任意的 $t \in [0, \infty)$, $|e_i(t)| < \beta(t)$ 成立.

证明. 注意到 e_i 是连续的且 $|e_i(0^+)| < \beta(0^+)$, 如果 $-\beta(t) < e_i(t) < \beta(t)$ 不成立, 则必然存在 \bar{t} 使得

$|e_i(\bar{t})| = \beta(\bar{t})$ 成立, 此时 $h(\gamma_{i,p}(t)) = 0$, 进一步有 $\epsilon_{i,p}(t)$ 无界. 这一结论与 $\epsilon_{i,p}(t)$ 有界互相矛盾, 此时 $-\beta(t) < e_i(t) < \beta(t)$ 不成立的假设有误. \square

观测器的输入设计为

$$v_i(t) = -c_2 \sum_{j=1}^N \Xi_{ij} \mu_{1j}^{-1} \epsilon_j(t_{k_j}^j) + \sum_{j=1}^N \Xi_{ij} \hat{\eta}_j - \sum_{j=1}^N \Xi_{ij} \mu_{1j}^{-1} \mu_{2j}, \quad t \in [t_{k_j}^j, t_{k_{j+1}}^j) \quad (14)$$

其中, Ξ_{ij} 是 Ξ 中的元素且有 $\Xi = (L+B)^{-1}$; $t_{k_j}^j$ 为机械臂 j 的第 k_j 次触发时刻; $\hat{\eta}_j$ 是 η_j 的估计值, η_j 满足 $\sum_{j=1}^N \Xi_{ij} \eta_j = -\bar{y}_0$; c_2 是正的常数. 此外

$$\mu_{1j} = \begin{cases} \frac{1}{h(\gamma_i)} - \frac{4c_1q}{l_{1i}h^2(\gamma_j)} \left(\frac{\gamma_j}{l_{1i}} - 1 \right)^{2q-1} e_j^2 > 0, \\ 0 < \gamma_j(t) < l_{1i} \\ 1, & \gamma_j(t) \geq l_{1i} \end{cases} \quad (15)$$

$$\mu_{2j} = \begin{cases} \frac{4c_1q}{l_{1i}h^2(\gamma_i)} \left(\frac{\gamma_j}{l_{1i}} - 1 \right)^{2q-1} \beta \dot{\beta} e_j, & 0 < \gamma_j(t) < l_{1i} \\ 0, & \gamma_j(t) \geq l_{1i} \end{cases} \quad (16)$$

在观测器 (7) 的设计中, 由于领导者输出信息的导数未知, 采用自适应方法估计领导者输出信号导数的上界, 进一步通过预设性能方法抑制估计误差, 保证观测器的估计精度. 具体地, 变量 $\hat{\eta}_j$ 的自适应更新律设计如下

$$\dot{\hat{\eta}}_j = -c_3 \hat{\eta}_j - \mu_{1j} \epsilon_j(t_{k_j}^j) \quad (17)$$

其中, c_3 为正常数.

为减少系统间冗余数据的传输, 设计如下形式的事件触发机制

$$t_{k_{j+1}} = \left\{ t : t > t_{k_j}^j, |\Psi_j| \geq \min \left\{ \frac{\psi_j}{\mu_{1j}(t)}, \psi_j \right\} \right\} \quad (18)$$

其中, $\Psi_j = \epsilon_j(t) - \epsilon_j(t_{k_j}^j)$, ψ_j 为自定义的正常数.

注 4. 在观测器 (7) 设计中采用事件触发机制节约机械臂间的通讯资源. 其次, 不同于文献 [28–30] 中的无穷大增益方法和文献 [31–32] 中的障碍函数法, 基于引理 2, 本文将有约束的机械臂输出跟踪问题转化为无约束的误差系统稳定性问题, 降低了控制律设计的难度.

定理 1. 考虑人在环多机械臂系统 (2), 如果假设 1 和假设 2 成立, 则对于任意的观测器初始条件

$\hat{\omega}_i(0)$, 式 (14) ~ (18) 给出的输入信号保证了所设计观测器 (7) 的一致性误差 e_i 在预设时刻 T 前收敛到预设精度 ε 内, 并且满足 $|e_i(t)| < \beta(t)$. 此外, 观测器的输出信号 $\hat{\omega}_i$ 达到了二分一致性, 设计的事件触发机制 (18) 不会出现芝诺现象.

证明. 基于设计的观测器输入信号 (14), $\hat{\omega}_i$ 的导数表示为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\omega}}_i \leq \dot{\hat{\omega}}_i + \dot{y}_0 = & -c_2 \sum_{j=1}^N \Xi_{ij} \mu_{1j}^{-1} \epsilon_j(t) + \\ & \sum_{j=1}^N \Xi_{ij} \hat{\eta}_j - \sum_{j=1}^N \Xi_{ij} \mu_{1j}^{-1} \mu_{2j} + \\ & c_2 \sum_{j=1}^N \Xi_{ij} \mu_{1j}^{-1} \Psi_j \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $\tilde{\eta}_j = \hat{\eta}_j - \eta_j$. 进一步, N 个观测器关于式 (19) 的矩阵形式可以表示为

$$\dot{\hat{\omega}} \leq -c_2 \Xi \mu_1^{-1} \epsilon - \Xi \mu_1^{-1} \mu_2 + \Xi \tilde{\eta} + c_2 \Xi \mu_1^{-1} \Psi \quad (20)$$

其中, $\epsilon = [\epsilon_1, \dots, \epsilon_N]^T$, $\mu_1 = \text{diag}\{\mu_{11}, \dots, \mu_{1N}\}$, $\mu_2 = [\mu_{21}, \dots, \mu_{2N}]^T$, $\tilde{\eta} = [\tilde{\eta}_1, \dots, \tilde{\eta}_N]^T$, $\Psi = [\Psi_1, \dots, \Psi_N]^T$. 此外, 式 (11) 可以转化为

$$e = (L+B)\hat{\omega} \quad (21)$$

其中, $e = [e_1, \dots, e_N]^T$.

对 ϵ_i 求导可得 $\dot{\epsilon}_i = \mu_{1i} \dot{\epsilon}_i + \mu_{2i}$, 进一步可以描述为

$$\dot{\epsilon} = \mu_1 \dot{\epsilon} + \mu_2 \quad (22)$$

类似地, 更新律 (17) 可以表示为

$$\dot{\hat{\eta}} = -c_3 \hat{\eta} - \mu_1 \epsilon + \mu_1 \Psi \quad (23)$$

其中, $\hat{\eta} = [\hat{\eta}_1, \dots, \hat{\eta}_N]^T$.

选择如下形式的 Lyapunov 函数

$$V_o(t) = \frac{1}{2} \epsilon^T \epsilon + \frac{1}{2} \tilde{\eta}^T \tilde{\eta} \quad (24)$$

结合式 (20) ~ (23), $V_o(t)$ 的导数可以表示为

$$\begin{aligned} \dot{V}_o(t) = & \epsilon^T \dot{\epsilon} + \tilde{\eta}^T \dot{\hat{\eta}} = \epsilon^T \mu_1 (L+B) \dot{\hat{\omega}} + \epsilon^T \mu_2 + \\ & \tilde{\eta}^T \dot{\hat{\eta}} \leq -c_2 \epsilon^T \epsilon - \epsilon^T \mu_2 + \epsilon^T \mu_1 \tilde{\eta} + \\ & c_2 \epsilon^T \Psi + \epsilon^T \mu_2 + \tilde{\eta}^T \dot{\hat{\eta}} = -c_2 \epsilon^T \epsilon + c_2 \epsilon^T \Psi + \\ & \tilde{\eta}^T (\mu_1 \epsilon + \dot{\hat{\eta}}) \leq -c_2 \epsilon^T \epsilon - \frac{c_3}{2} \tilde{\eta}^T \tilde{\eta} + c_2 \epsilon^T \Psi + \\ & \tilde{\eta}^T \mu_1 \Psi + \frac{c_3}{2} \eta^T \eta \end{aligned} \quad (25)$$

其中, $\eta = [\eta_1, \dots, \eta_N]^T$ 且 $c_3 \eta^T \eta / 2$ 为常数.

基于事件触发机制 (18), 可以得到

$$c_2 \epsilon^T \Psi \leq \frac{c_2}{2} \epsilon^T \epsilon + \frac{c_2}{2} \Psi^T \Psi \leq \frac{c_2}{2} \epsilon^T \epsilon + \frac{c_2}{2} \sum_{j=1}^N \psi_j^2 \quad (26)$$

$$\tilde{\eta}^T \mu_1 \Psi \leq \frac{c_3}{4} \tilde{\eta}^T \tilde{\eta} + \frac{1}{c_3} \Psi^T \mu_1 \mu_1 \Psi \leq \frac{c_3}{4} \tilde{\eta}^T \tilde{\eta} + c_4 \quad (27)$$

其中, $\psi = [\psi_1, \dots, \psi_N]^T$, $c_4 = \psi^T \psi / c_3$ 是常数.

将式 (26) ~ (27) 代入式 (25) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_o(t) &\leq -\frac{c_2}{2} \epsilon^T \epsilon - \frac{c_3}{4} \tilde{\eta}^T \tilde{\eta} + \frac{c_2}{2} \sum_{j=1}^N \psi_j^2 + c_4 + \\ &\frac{c_3}{2} \eta^T \eta \leq -\mathfrak{S}_1 V_1(t) + \mathfrak{S}_2 \end{aligned} \quad (28)$$

其中, $\mathfrak{S}_1 = \min\{c_2, c_3/2\}$, $\mathfrak{S}_2 = (c_2/2) \sum_{j=1}^N \psi_j^2 + c_3 \eta^T \eta / 2 + c_4$ 是正常数. 因此, ϵ_i 和 $\tilde{\eta}_i$ 有界. 结合引理 2, 可以得到 $|e_i(t)| < \beta(t)$ 成立. 此外, 由式 (21) 可得 $\tilde{\omega} = \Xi e$, 那么误差 $\tilde{\omega}_i$ 在指定时间 T 内收敛到指定区域 $\Lambda_i = \{\tilde{\omega}_i \in \mathbf{R} : |\tilde{\omega}_i| < \lambda_{\max}(\Xi)\epsilon\}$. 进一步, 根据一致性误差 e_i 的定义, 可以得到观测器实现了二分一致性的结论.

接下来证明事件触发机制 (18) 不会产生芝诺现象. 首先, 由式 (10)、式 (12)、式 (15)、式 (16) 以及式 (20) ~ (22) 可以得到 \dot{e}_j 有界, 结合 Ψ_j 在式 (18) 中的定义, 可以得到存在常数 $\bar{\Psi}_j$ 使下式成立

$$|\dot{\Psi}_j(t)| \leq \bar{\Psi}_j \quad (29)$$

此外, 根据事件触发机制的作用机理, $\Psi_j(t_{k_j}^j) = 0$ 和 $\lim_{t \rightarrow t_{k_j+1}^j-} |\Psi_j(t)| \geq \psi_j^*$ 成立, 其中 $\psi_j^* = \min\{\psi_j, \psi_j / \mu_{1j}\}$. 因此, 有如下结论

$$t_{k_j+1}^j - t_{k_j}^j \geq \frac{\psi_j^*}{\bar{\Psi}_j} \quad (30)$$

式 (30) 表明事件触发机制不存在芝诺现象. \square

2.3 预设时间和精度的输出调节控制器设计

基于观测器 (7) 生成参考信号 $\hat{\omega}_i$, 多机械臂系统的协同控制问题转化为单个机械臂系统的输出调节问题. 为避免对虚拟控制器的复杂求导, 为每个跟随机械臂系统引入如下形式的一阶滤波器

$$\nu_i \dot{\alpha}_i^c(t) + \alpha_i^c(t) = \alpha_i(t), \quad \alpha_i^c(0) = \alpha_i(0) \quad (31)$$

其中, $\alpha_i^c(t)$ 为滤波器的输出, $\alpha_i(t)$ 为滤波器的输入且满足 $|\alpha_i(t)| < \bar{\alpha}_i$, $\bar{\alpha}_i$ 为正常数, $\nu_i > 0$ 为设计的时间常数.

引理 3^[39]. 考虑滤波器 (31), 如果 α_i 有界, 通过选择合适的时间常数 ν_i , 有如下结论

$$|\alpha_i^c(t) - \alpha_i(t)| < \hat{\alpha}_i \quad (32)$$

其中, $\hat{\alpha}_i$ 为正常数.

对于第 i 个机械臂, 定义如下形式的变量

$$\tilde{y}_i = y_i - \hat{\omega}_i \quad (33)$$

$$\xi_i = \delta_i(\beta - \tilde{y}_i)(\beta + \tilde{y}_i) = \delta_i(\beta^2 - \tilde{y}_i^2) \quad (34)$$

$$h(\xi_i(t)) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{\xi_i(t)}{l_{2i}} - 1\right)^{2q}, & 0 < \xi_i(t) \leq l_{2i} \\ 1, & \xi_i(t) > l_{2i} \end{cases} \quad (35)$$

$$\varphi_{i,1}(t) = \frac{\tilde{y}_i(t)}{h(\xi_i(t))} \quad (36)$$

$$\varphi_{i,2}(t) = x_{i,2}(t) - \alpha_i^c(t) \quad (37)$$

$$\sigma_i(t) = \alpha_i^c(t) - \alpha_i(t) \quad (38)$$

其中, l_{2i} 表示安全系数, δ_i 和 l_{2i} 均为正常数, α_i 和 α_i^c 分别为虚拟控制律和滤波器 (31) 的输出.

引理 4. 如果误差 $\varphi_{i,1}(t)$ 有界, 则对于 $\forall t \in [0, \infty)$, $|\tilde{y}_i(t)| < \beta(t)$ 成立.

证明. 证明过程与引理 2 类似, 在此省略. \square

回顾引理 4, 如果设计的虚拟控制器能确保转化误差 $\varphi_{i,1}$ 有界, 则系统的调节误差 \tilde{y}_i 将收敛到预设精度. 因此, 本文在考虑预设性能的前提下, 不需要引入其他方法消除滤波误差. 基于引理 3 和引理 4, 并结合反步法, 设计的预设性能反步控制器如表 2 所示.

表 2 预设性能反步控制器

Table 2 Prescribed performance backstepping controller

虚拟控制器	
$\alpha_i = -\frac{\kappa_{i,2} + \varphi_{i,1}}{\kappa_{i,1}} + v_i$	(T2.1)
$\kappa_{i,1} = \begin{cases} \frac{1}{h(\xi_i)} - \frac{4\delta_i q}{l_{2i} h^2(\xi_i)} \left(\frac{\xi_i}{l_{2i}} - 1\right)^{2q-1} \tilde{y}_i^2 > 0, \\ 0 < \xi_i < l_{2i} \\ 1, & \xi_i \geq l_{2i} \end{cases}$	
$\kappa_{i,2} = \begin{cases} \frac{4\delta_i q}{l_{2i} h^2(\xi_i)} \left(\frac{\xi_i}{l_{2i}} - 1\right)^{2q-1} \beta \dot{\beta} \tilde{y}_i, & 0 < \xi_i < l_{2i} \\ 0, & \xi_i \geq l_{2i} \end{cases}$	
控制器	
$u_i = -\frac{1}{2} \varphi_{i,2} - \kappa_{i,1} \varphi_{i,1} - \hat{\Phi}_i^T \Gamma(Z_i) + \dot{\alpha}_i^c$	(T2.2)
$\dot{\hat{\Phi}}_i = -r_{i,1} \hat{\Phi}_i + r_{i,2} \varphi_{i,2} \Gamma(Z_i)$	(T2.3)
其中, $r_{i,1}$ 和 $r_{i,2}$ 为正常数, $Z_i = [x_{i,1}, x_{i,2}]^T$.	

注 5. 本文设计的预设时间和精度控制策略有如下特点: 1) 不同于文献 [4], 本文不同机械臂间的交互通过观测器实现, 之后基于观测器的输出信息

设计机械臂的实际控制律, 阻止了机械臂之间由于故障、扰动等原因造成的不利因素的传播; 2) 不同于文献 [7] 中网络层需要领导者的各阶导数信息, 本文观测器的设计仅需要领导者的输出信息, 降低了控制器的保守性; 3) 相比于文献 [33–34] 中的预设时间和精度控制方法需要系统初始状态的先验知识, 由于本文采用的预设性能函数有注 3 所述初始时刻趋于无穷的特性, 因此设计的控制策略不需要领导者初始状态的先验知识. 此外, 由于观测器 (7) 的设计与系统的阶数无关, 而控制器 (T2.2) 基于反步法设计, 因此本文的控制策略很容易推广到高阶系统.

注 6. 与文献 [36] 中预设性能的群一致性控制策略相比, 本文的主要创新点体现在以下三点: 1) 本文所设计控制器不需要机械臂系统结构的动态关系, 即式 (2) 中 $f_i(\bar{x}_i)$ 完全未知. 需要指出的是, 本文通过神经网络逼近该未知函数, 并进一步通过预设性能控制削弱了由神经网络逼近误差对系统的影响, 实现了对存在模型未知动态的系统预设精度的精准控制. 2) 本文在虚拟控制器的设计中减少了不必要的缩放, 进而减小了控制器的复杂度. 3) 引入手势控制领导机械臂系统框架, 并建立如图 1 和表 1 所示的人机交互运动模型.

2.4 二分一致性分析

基于设计的预设时间和精度二分一致性跟踪控制策略, 给出如下定理.

定理 2. 考虑人在环多机械臂系统 (2), 如果假设 1 和假设 2 成立, 则所设计的观测器 (7) 及表 2 所示的控制律 (T2.2) 和自适应律 (T2.3) 能保证多机械臂系统在预设时间 T 内达到二分一致性, 并且跟随机械臂相对于有人机械臂之间的跟踪误差 $e_i^*(t) = y_i(t) - d_i y_0(t)$ 能收敛在预设精度 $(1 + \lambda_{\max}(\Xi))\varepsilon$ 内.

证明. 基于反步法, 证明过程可分为如下两步:

步骤 1. 基于式 (2)、式 (33)、式 (36)、式 (38), $\varphi_{i,1}$ 的导数可以表示为

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_{i,1} &= \kappa_{i,1} \dot{y}_i + \kappa_{i,2} = \\ &\kappa_{i,1}(\varphi_{i,2} + \alpha_i + \sigma_i - v_i) + \kappa_{i,2} \end{aligned} \quad (39)$$

其中, $\kappa_{i,1}$ 和 $\kappa_{i,2}$ 如表 2 所示. 进一步可以得到

$$\begin{aligned} \varphi_{i,1} \dot{\varphi}_{i,1} &= \kappa_{i,1} \varphi_{i,1} \varphi_{i,2} + \kappa_{i,1} \varphi_{i,1} \alpha_i + \\ &\kappa_{i,1} \varphi_{i,1} \sigma_i - \kappa_{i,1} \varphi_{i,1} v_i + \varphi_{i,1} \kappa_{i,2} \end{aligned} \quad (40)$$

利用杨氏不等式, 可得

$$\kappa_{i,1} \varphi_{i,1} \sigma_i \leq \frac{1}{2} \varphi_{i,1}^2 + \frac{1}{2} \kappa_{i,1}^2 \sigma_i^2 \quad (41)$$

将式 (41) 代入式 (40) 得到

$$\begin{aligned} \varphi_{i,1} \dot{\varphi}_{i,1} &\leq \kappa_{i,1} \varphi_{i,1} \varphi_{i,2} + \kappa_{i,1} \varphi_{i,1} \alpha_i + \frac{1}{2} \varphi_{i,1}^2 + \\ &\frac{1}{2} \kappa_{i,1}^2 \sigma_i^2 - \kappa_{i,1} \varphi_{i,1} v_i + \varphi_{i,1} \kappa_{i,2} \end{aligned} \quad (42)$$

考虑如下形式的 Lyapunov 函数

$$V_{i,1} = \frac{1}{2} \varphi_{i,1}^2 \quad (43)$$

结合式 (42) 和式 (T2.1), 对式 (43) 求导, 有

$$\dot{V}_{i,1} \leq -\frac{1}{2} \varphi_{i,1}^2 + \kappa_{i,1} \varphi_{i,1} \varphi_{i,2} + \frac{1}{2} \kappa_{i,1}^2 \sigma_i^2 \quad (44)$$

由于滤波器的输出信号用在步骤 2 中, 若在步骤 1 中不考虑滤波器, 所得到的虚拟控制率与式 (T2.1) 相同, 此时, α_i 可保证 $\varphi_{i,1}$, $\kappa_{i,1}$ 以及 $\kappa_{i,2}$ 有界. 进一步地, 根据式 (T2.1) 可得 α_i 有界. 因此, 在考虑滤波器的情况下, 虚拟控制律 α_i 同样有界. 结合引理 3, 可以得到 $\kappa_{i,1}^2 \sigma_i^2 / 2$ 有界.

步骤 2. 基于式 (2) 和式 (37), $\varphi_{i,2}$ 的导数为

$$\dot{\varphi}_{i,2} = \dot{x}_{i,2} - \dot{\alpha}_i^c = u_i + f_i - \dot{\alpha}_i^c \quad (45)$$

利用神经网络 (3) 逼近函数 f_i , 式 (45) 进一步转化为

$$\begin{aligned} \varphi_{i,2} \dot{\varphi}_{i,2} &= \varphi_{i,2} u_i + \varphi_{i,2} f_i - \varphi_{i,2} \dot{\alpha}_i^c = \varphi_{i,2} u_i + \\ &\varphi_{i,2} ([\Phi_i^*]^T \Gamma(Z_i) + \zeta(Z_i)) - \varphi_{i,2} \dot{\alpha}_i^c \leq \\ &\varphi_{i,2} u_i + \varphi_{i,2} [\Phi_i^*]^T \Gamma(Z_i) + \frac{1}{4} \varphi_{i,2}^2 - \\ &\varphi_{i,2} \dot{\alpha}_i^c + |\zeta^*|^2 \end{aligned} \quad (46)$$

考虑如下 Lyapunov 函数

$$V_i = V_{i,1} + \frac{1}{2} \varphi_{i,2}^2 + \frac{1}{2r_{i,2}} \tilde{\Phi}_i^T \tilde{\Phi}_i \quad (47)$$

其中, $\hat{\Phi}_i$ 是 Φ_i^* 的估计且 $\tilde{\Phi}_i = \hat{\Phi}_i - \Phi_i^*$.

对式 (47) 求导并结合式 (44) 和式 (46) 可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= \dot{V}_{i,1} + \varphi_{i,2} \dot{\varphi}_{i,2} + \frac{1}{r_{i,2}} \tilde{\Phi}_i^T \dot{\tilde{\Phi}}_i \leq -\frac{1}{2} \varphi_{i,1}^2 + \frac{1}{4} \varphi_{i,2}^2 + \\ &\kappa_{i,1} \varphi_{i,1} \varphi_{i,2} + \frac{1}{2} \kappa_{i,1}^2 \sigma_i^2 + \varphi_{i,2} u_i + |\zeta^*|^2 + \\ &\varphi_{i,2} ([\Phi_i^*]^T \Gamma(Z_i) - \dot{\alpha}_i^c) + \frac{1}{r_{i,2}} \tilde{\Phi}_i^T \dot{\tilde{\Phi}}_i \leq \\ &-\frac{1}{2} \varphi_{i,1}^2 + \kappa_{i,1} \varphi_{i,1} \varphi_{i,2} + \varphi_{i,2} u_i - \varphi_{i,2} \dot{\alpha}_i^c + \\ &\varphi_{i,2} [\Phi_i^*]^T \Gamma(Z_i) + \frac{1}{r_{i,2}} \tilde{\Phi}_i^T \dot{\tilde{\Phi}}_i + \frac{1}{4} \varphi_{i,2}^2 + l_i \end{aligned} \quad (48)$$

其中, $\iota_i = \sup_{t>0} \{ \kappa_{i,1}^2 \sigma_i^2 / 2 \} + |\zeta^*|^2$.

将控制律 (T2.2) 和自适应律 (T2.3) 代入式 (48) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &\leq -\frac{1}{2}\varphi_{i,1}^2 - \frac{1}{4}\varphi_{i,2}^2 - \frac{r_{i,1}}{2r_{i,2}}\tilde{\Phi}_i^T\tilde{\Phi}_i + \iota_i + \\ &\frac{r_{i,1}}{2r_{i,2}}[\Phi_i^*]^T\Phi_i^* \leq -\varrho_1 V_i + \varrho_2 \end{aligned} \quad (49)$$

其中, $\varrho_2 = (r_{i,1}/(2r_{i,2}))[\Phi_i^*]^T\Phi_i^* + \iota_i$, $\varrho_1 = \min\{1/2, r_{i,1}\}$ 为常数.

对式 (49) 两侧进行积分, 可以得到

$$V_i(t) \leq e^{-\varrho_1 t} V_i(0) + \frac{\varrho_2}{\varrho_1} (1 - e^{-\varrho_1 t}) \quad (50)$$

则 $V_i(t)$ 有界, 进一步得到 $\varphi_{i,1}$, $\varphi_{i,2}$ 以及 $\tilde{\Phi}_i$ 有界. 根据引理 4, 可以得到跟随机机械臂系统相对于观测器 (7) 输出信号 $\hat{\omega}_i$ 的调节误差 $\tilde{y}_i = y_i - \hat{\omega}_i$ 在预设时间 T 内收敛到预设精度 ε . 回顾式 (8)、式 (21) 以及定理 1, 观测器的观测误差 $\tilde{\omega}_i = \hat{\omega}_i - d_i y_0$ 收敛到精度 $\lambda_{\max}(\Xi)\varepsilon$, 进一步可以得到跟随机机械臂相对于有人机械臂之间的跟踪误差 $e^*(t) = y_i(t) - d_i y_0(t)$ 收敛到精度 $(1 + \lambda_{\max}(\Xi))\varepsilon$ 以内. \square

注 7. 从定理 2 中可以看出, 跟随机机械臂输出 y_i 相对于领导机械臂 $d_i y_0$ 的跟踪误差 e^* 可以分为两部分, 分别为观测器的观测误差 $\tilde{\omega}_i$ 以及控制器的调节误差 \tilde{y}_i . 因此, 在实际应用中, 需要将给定精度分配给观测误差及调节误差. 需要注意的是, 当人在环多机械臂系统的通讯拓扑已知时, 根据引理 1 可知 $\lambda_{\max}(\Xi)$ 是一个已知的量. 观测器的设计中由于需要系统的全局拓扑信息 $\Xi = (L + B)^{-1}$, 在一定程度上可能会加重系统的通讯负担, 这也同系统中机械臂的编号顺序 (不同的编号顺序在通讯链路不变的情况下 L 不同) 密切相关.

注 8. 关于控制策略中参数的选择, 有以下几点基本准则:

1) 增大式 (12) 和式 (35) 中安全系数 l_{1i} 和 l_{2i} 的值可以提高观测器的估计精度/机械臂的跟踪精度. 但是, 大的 l_{1i} 和 l_{2i} 值也会造成观测器/机械臂的输出信号出现抖动现象. 因此, 需要在观测器/机械臂的精度与抖振之间进行权衡.

2) 式 (17) 和式 (T2.3) 中自适应更新参数 $r_{i,1}$, $r_{i,2}$ 和 c_3 应为正的常数. 减小 $r_{i,1}$, c_3 并增大 $r_{i,2}$ 可以加快 $\hat{\eta}_j$ 和 $\hat{\Phi}_i$ 的收敛速度, 这有助于提高二分一致性, 但也可能增加控制信号的幅值.

3) 事件触发机制 (18) 中阈值参数 ψ_j 的大小与触发次数以及观测器的性能相关. 增加 ψ_j 可以减少机械臂间的通讯次数, 减少通讯负担. 然而, 传输

数据的减少会造成观测器估计轨迹存在转折点, 降低观测器的性能.

3 仿真验证

基于人在环多机械臂系统模型 (2), 本节考虑由 1 个领导机械臂和 5 个跟随机机械臂组成的网络系统. 图 3 展示了机械臂间的合作/竞争耦合关系, 其满足假设 2 中的连通性和结构平衡特性.

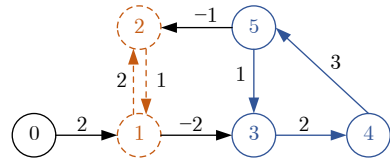


图 3 不同机械臂间的通讯拓扑
Fig.3 Communication topology among different manipulators

仿真中, 机械臂系统参数选择为 $J = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $H = 1 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$, $mgl = 10 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$; 跟踪误差 e_i^* 的收敛时间和精度要求为 5 s 和 0.12 rad; 基于定理 2 和图 3, 观测器和控制器中预设性能函数 (6) 的参数都设置为 $T = 5 \text{ s}$, $\varepsilon = 0.03 \text{ rad}$; 系统的采样周期为 0.001 s. 此外, 控制器的参数如表 3 所示.

表 3 控制器参数
Table 3 Parameters of the controllers

参数	值	参数	值	参数	值
c_1	20	c_2	15	ϱ_1	$[0.8, 0.5]^T$
l_{1i}	2.100	l_{2i}	1.500	ϱ_2	$[2.8, 2.5]^T$
$r_{i,1}$	0.001	$r_{i,2}$	0.500	ϱ_3	$[1.1, 1.5]^T$
b_i	5	c_3	0.001	π_1	1.5
ψ_j	3	ν_i	0.001	π_2	3.0
δ_i	140	M_1	3	π_3	2.0

仿真结果如图 4 ~ 7 所示. 图 4 显示了人在环多机械臂系统的输出曲线, 可以看出多机械臂系统的输出实现了二分一致性. 图 5 展示了所设计观测器的事件触发时刻, 相比于连续采样中 10 000 次的采样次数, 不同机械臂的触发次数分别为 287、76、103、211、248. 可以看出本文提出的事件触发机制有效地减少了冗余数据的传输, 从而降低通讯消耗. 图 6 展示了各机械臂的控制输入 $u_i(t)$ 和机械臂 1 的自适应权重 $\hat{\Phi}_1(t)$ 的轨迹. 由于每个机械臂的权重 $\hat{\Phi}_i \in \mathbf{R}^3$ 有三个变量需要估计, 5 个机械臂一共有 15 个权重变量. 为了简洁, 在此仅展示机械臂 1 的权重变化轨迹. 此外, 从控制输入来看, 由于预设时间的约束, 机械臂在初始运行时刻输入较大, 需

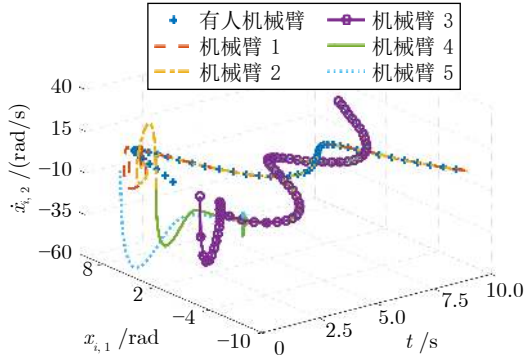


图 4 不同机械臂的角度轨迹

Fig. 4 Angle trajectories of different manipulators

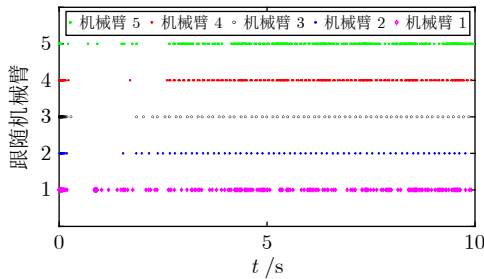


图 5 不同机械臂的触发时刻

Fig. 5 Trigger instants of different manipulators

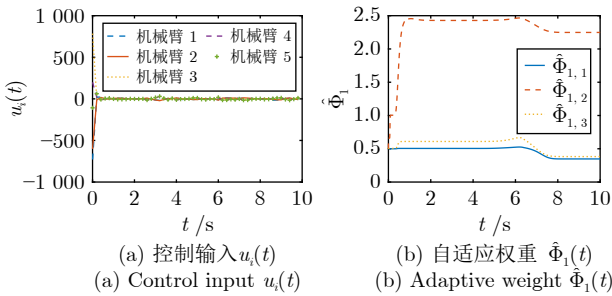


图 6 基于控制器 (T2.2) 的仿真结果

Fig. 6 Simulation results based on the controller (T2.2)

要机械臂系统采用扭矩较大的驱动电机。图 7 展示了二分一致性误差 e_i 和调节误差 \tilde{y}_i , 从图中可以看出, 本文提出的控制策略使观测器的二分一致性误差 e_i 和控制器的调节误差 \tilde{y}_i 均在预设时间 $T = 5$ s 内收敛到预设精度 $\varepsilon = 0.03$ rad 内。

图 8 展示了本文所提预设时间和精度控制策略在系统初始条件先验知识未知情况下的优越性, 其中图 8(a) 展示了采用文献 [34] 中预设性能控制方法的多机械臂系统在初始条件为 $[x_1(0), x_2(0), x_3(0), x_4(0), x_5(0)]^T = [17, -15, -13, 12, 6]^T$ 时的跟踪误差 e_i^* , 此时系统无法收敛。这是由于文献 [34] 中的预设性能控制方法需要系统初始条件的先验知

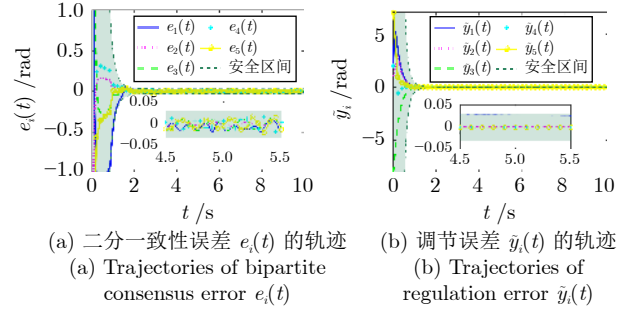


图 7 观测器和机械臂性能

Fig. 7 Performance of observers and manipulators

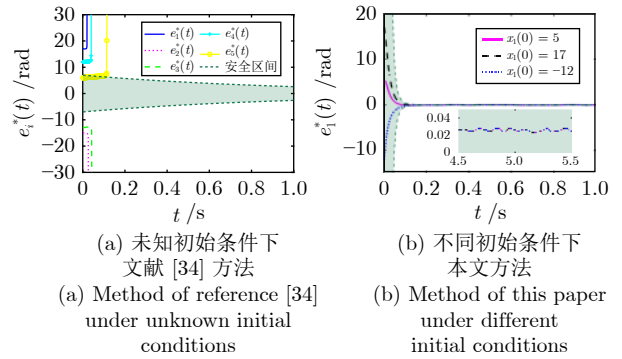


图 8 不同控制方法的跟踪误差

Fig. 8 Tracking errors of different control methods

识, 在无初始条件先验知识的情况下, 可能由于初始条件不在预设边界内导致系统状态无法收敛。相反, 图 8(b) 展示了本文所提方法在不同初始条件下 (含图 8(a) 中的初始条件) 机械臂 1 的跟踪误差 e_1^* 轨迹, 此时由定理 2 可知, 在不同的初始条件下, 当 $t \geq 5$ s 时, 均有 $e_1^* < (1 + 3) \times 0.03$ rad = 0.12 rad。为公平起见, 图 8(a) 和图 8(b) 是在相同收敛时间 (5 s) 和稳态误差 (0.12 rad) 限制下完成的。可以看出, 在没有初始状态先验知识的情况下, 本文所提的预设性能控制策略能在任意初始条件下实现控制目标。

为体现所提预设时间和精度二分一致性控制策略的优越性, 将本文所提的控制策略 (性能函数为 $(1 + 3)\beta(t)$, $T = 5$ s, $\varepsilon = 0.03$ rad) 与文献 [21] 的预设性能控制策略 (性能函数为 $(7 - 0.12)e^{-t} + 0.12$)、文献 [30] 预设时间控制策略 (收敛时间为 5 s) 以跟踪误差 e_i^* 为指标进行比较。除上述性能指标外, 其他参数取值均相同。不同方法下机械臂 1 的跟踪误差结果如图 9 所示, 可以看出本文的控制策略较文献 [30] 中的预设时间控制策略有更快的收敛速度及更高的收敛精度, 较文献 [21] 中的预设性能控制策略有更快的收敛速度及相似的收敛精度。

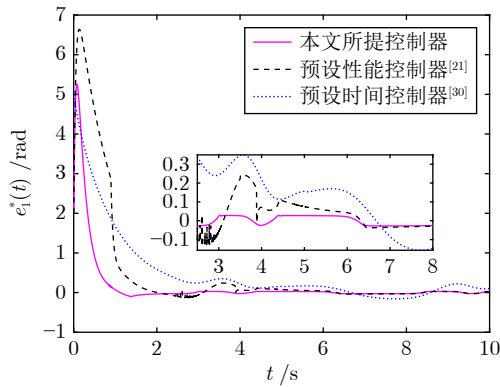


图 9 不同控制方法的比较

Fig. 9 Comparison of different control methods

4 结束语

本文针对具有合作/竞争拓扑的人在环多机械臂系统, 设计了预设性能二分一致性控制策略. 通过为每个机械臂系统构建预设时间和精度观测器, 实现了领导者输出信号的估计与观测器输出信号的二分一致性. 此外, 观测器输出作为参考信号传输给控制器. 在此基础上, 设计了输出调节器, 使机械臂角度输出与参考信号之间的跟踪误差在预设时间内收敛到预设精度. 通过 Lyapunov 稳定性分析证明了所提控制策略的有效性. 未来的研究包括消除观测器设计中用到的全局拓扑信息以进一步降低通讯负担, 以及将预设性能控制拓展到更一般的系统拓扑中, 如不满足结构平衡的符号图.

References

- Mattila J, Koivumäki J, Caldwell D G, Semini C. A survey on control of hydraulic robotic manipulators with projection to future trends. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, **22**(2): 669–680
- Zhai J Y, Xu G. A novel non-singular terminal sliding mode trajectory tracking control for robotic manipulators. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2021, **68**(1): 391–395
- He W, Ouyang Y C, Hong J. Vibration control of a flexible robotic manipulator in the presence of input deadzone. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, **13**(1): 48–59
- Ning B D, Han Q L, Zuo Z Y. Bipartite consensus tracking for second-order multiagent systems: A time-varying function-based preset-time approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2021, **66**(6): 2739–2745
- Guo H Z, Chen M, Jiang Y H, Lungu M. Distributed adaptive human-in-the-loop event-triggered formation control for QUAVs with quantized communication. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, **19**(6): 7572–7582
- Cao Y C, Yu W W, Ren W, Chen G R. An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, **9**(1): 427–438
- Liu P M, Guo X G, Wang J L, Xie X P, Yang F W. Fully distributed hierarchical ET intrusion-and fault-tolerant group control for MASs with application to robotic manipulators. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, **21**(3): 2868–2881
- Xu Jun, Zhang Guo-Liang, Zeng Jing, Sun Qiao, Yang Fan. Robust guaranteed consensus for high-order discrete-time multi-agent systems with switching topologies and time delay. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(2): 360–373 (徐君, 张国良, 曾静, 孙巧, 羊帆. 具有时延和切换拓扑的高阶离散时间多智能体系统鲁棒性能一致性. *自动化学报*, 2019, **45**(2): 360–373)
- Guo X G, Zhang D Y, Wang J L, Ahn C K. Adaptive memory event-triggered observer-based control for nonlinear multi-agent systems under DoS attacks. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2021, **8**(10): 1644–1656
- Chai J Y, Lu Q, Tao X D, Peng D L, Zhang B T. Dynamic event-triggered fixed-time consensus control and its applications to magnetic map construction. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, **10**(10): 2000–2013
- Zheng Wei, Zhang Zhi-Ming, Liu He-Xin, Zhang Ming-Quan, Sun Fu-Chun. Dynamic feedback mean square consensus control based on linear transformation for leader-follower multi-agent systems. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(10): 2474–2485 (郑维, 张志明, 刘和鑫, 张明泉, 孙富春. 基于线性变换的领导-跟随多智能体系统动态反馈均方一致性控制. *自动化学报*, 2022, **48**(10): 2474–2485)
- Lin G H, Li H Y, Ma H, Yao D Y, Lu R Q. Human-in-the-loop consensus control for nonlinear multi-agent systems with actuator faults. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, **9**(1): 111–122
- Zhang Y F, Wu Z G, Shi P. Resilient event-/self-triggering leader-following consensus control of multiagent systems against DoS attacks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, **19**(4): 5925–5934
- Zhao G L, Hua C C. Leaderless and leader-following bipartite consensus of multiagent systems with sampled and delayed information. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2023, **34**(5): 2220–2233
- Ma Xiao-Lu, Tan Yi-Bo, Mei Hong. Predefined-time bipartite consensus of multi-agent systems with disturbances under signed graph. *Control and Decision*, 2024, **39**(5): 1517–1526 (马小陆, 谭毅波, 梅宏. 符号图下含扰动的多智能体系统预定时间二分一致性. *控制与决策*, 2024, **39**(5): 1517–1526)
- Zhao G L, Cui H L, Hua C C. Hybrid event-triggered bipartite consensus control of multiagent systems and application to satellite formation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2023, **20**(3): 1760–1771
- Chen Shi-Ming, Jiang Gen-Lan, Zhang Zheng. Bipartite practical consensus control of multi-agent systems with communication constraints. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(5): 1318–1326 (陈世明, 姜根兰, 张正. 通信受限的 MAS 二分实用一致性. *自动化学报*, 2022, **48**(5): 1318–1326)
- Cai Y L, Zhang H G, Duan J, Zhang J. Distributed bipartite consensus of linear multiagent systems based on event-triggered output feedback control scheme. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, **51**(11): 6743–6756
- Wang X J, Niu B, Zhai L, Kong J, Wang X M. A novel distributed bipartite consensus control of nonlinear multiagent systems via prioritized strategy approach. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, **69**(6): 2852–2856
- Tao M, Liu X Y, Shao S, Cao J D. Predefined-time bipartite consensus of networked Euler-Lagrange systems via sliding-mode control. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, **69**(12): 4989–4993
- Lin G H, Li H Y, Ma H, Zhou Q. Distributed containment control for human-in-the-loop MASs with unknown time-varying parameters. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2022, **69**(12): 5300–5311
- Wu H N, Zhang X M, Li R G. Synthesis with guaranteed cost and less human intervention for human-in-the-loop control sys-

- tens. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, **52**(8): 7541–7551
- 23 Lin G H, Li H Y, Ahn C K, Yao D Y. Event-based finite-time neural control for human-in-the-loop UAV attitude systems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2023, **34**(12): 10387–10397
- 24 Cao Y, Cao J F, Song Y D. Practical prescribed time tracking control over infinite time interval involving mismatched uncertainties and non-vanishing disturbances. *Automatica*, 2022, **136**: Article No. 110050
- 25 Li Y X, Wei M, Tong S C. Event-triggered adaptive neural control for fractional-order nonlinear systems based on finite-time scheme. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, **52**(9): 9481–9489
- 26 Li K W, Li Y M, Zong G D. Adaptive fuzzy fixed-time decentralized control for stochastic nonlinear systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, **29**(11): 3428–3440
- 27 Sun Meng-Wei, Ren Lu, Liu Jian, Sun Chang-Yin. Dynamic event-triggered fixed-time consensus control of multi-agent systems under switching topologies. *Acta Automatica Sinica*, 2023, **49**(6): 1295–1305
(孙梦薇, 任璐, 刘剑, 孙长银. 切换拓扑下动态事件触发多智能体系统固定时间一致性. *自动化学报*, 2023, **49**(6): 1295–1305)
- 28 Zhou B, Zhang K K, Jiang H Y. Prescribed-time control of perturbed nonholonomic systems by time-varying feedback. *Automatica*, 2023, **155**: Article No. 111125
- 29 Li W Q, Krstic M. Prescribed-time output-feedback control of stochastic nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2023, **68**(3): 1431–1446
- 30 Lyu D, Sun M, Jia Q. Event-based prescribed-time synchronization of directed dynamical networks with Lipschitzian nodal dynamics. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, **69**(3): 1847–1851
- 31 Liu Y J, Zeng Q, Tong S C, Chen C L P, Liu L. Actuator failure compensation-based adaptive control of active suspension systems with prescribed performance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, **67**(8): 7044–7053
- 32 Bechlioulis C P, Rovithakis G A. Prescribed performance adaptive control for multi-input multi-output affine in the control nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, **55**(5): 1220–1226
- 33 Chen P H, Luan X L, Liu F. MT-filters-based event-triggered adaptive prescribed performance tracking control of multi-agent systems with unknown direction actuator failure. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2023, **33**(14): 8224–8253
- 34 Liu D C, Liu Z, Chen C L P, Zhang Y. Prescribed-time containment control with prescribed performance for uncertain nonlinear multi-agent systems. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, **358**(3): 1782–1811
- 35 Wang H, Wen G H, Yu W W, Yu X H. Designing event-triggered observers for distributed tracking consensus of higher-order multiagent systems. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, **52**(5): 3302–3313
- 36 Liu P M, Guo X G, Wang J L, Coutinho D, Wu Z G. Preset-time and preset-accuracy human-in-the-loop cluster consensus control for MASs under stochastic actuation attacks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2024, **69**(3): 1675–1688
- 37 Ma Q, Wang Z, Miao G Y. Second-order group consensus for multi-agent systems via pinning leader-following approach. *Journal of the Franklin Institute*, 2014, **351**(3): 1288–1300
- 38 Lu H Q, Hu Y, Guo C Q, Zhou W N. Cluster synchronization for a class of complex dynamical network system with randomly occurring coupling delays via an improved event-triggered pinning control approach. *Journal of the Franklin Institute*, 2020, **357**(4): 2167–2184
- 39 Dong W J, Farrell J A, Polycarpou M M, Djapic V, Sharma M. Command filtered adaptive backstepping. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, **20**(3): 566–580



刘沛明 北京科技大学自动化学院博士研究生。主要研究方向为多智能体系统, 容错控制。

E-mail: liupeiming1783@126.com

(LIU Pei-Ming Ph.D. candidate at the School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing. His research interest covers multi-agent systems and fault-tolerant control.)



郭祥贵 北京科技大学自动化学院教授。2012 年获得东北大学控制科学与工程专业博士学位。主要研究方向为多智能体系统, 模糊系统, 车辆队列控制和容错控制。本文通信作者。

E-mail: guoxianggui@163.com

(GUO Xiang-Gui Professor at the School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing. He received his Ph.D. degree in control science and engineering from Northeastern University in 2012. His research interest covers multi-agent systems, fuzzy systems, vehicular platoon control, and fault-tolerant control. Corresponding author of this paper.)