

引用:刘科力,孙宗耀,李娇娇,等.单连杆机械臂多智能体系统的鲁棒自适应容错一致性跟踪控制[J].聊城大学学报(自然科学版),2025,38(6):823-830.

Citation:LIU Keli, SUN Zongyao, LI Jiaojiao, ZHAO Junsheng. Robust adaptive fault-tolerant consensus tracking control for one-link manipulator multi-agent systems[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025,38(6):823-830.

文章编号 1672-6634(2025)06-0823-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024120015

单连杆机械臂多智能体系统的鲁棒自适应容错一致性跟踪控制

刘科力¹, 孙宗耀¹, 李娇娇¹, 赵军圣²

(1. 曲阜师范大学 自动化研究所, 山东 曲阜 273165; 2. 聊城大学 数学科学学院, 山东 聊城 252059)

摘要 研究了一类由三个单连杆机械臂组成的多智能体系统的鲁棒自适应容错一致性跟踪控制问题。借助自适应技术中的 Backstepping 方法,设计了一个状态反馈控制器,确保系统在遭受未知有界扰动和执行器输入故障的情况下,尽管只有部分追随者可以获取领导者的信息,但每个单连杆机械臂的角速度能一致地渐近跟踪领导者信号。本文的创新之处在于在单连杆机械臂系统中同时考虑扰动和故障,并将多智能体系统控制策略应用于机械臂系统中。最后通过仿真验证了控制策略的有效性。

关键词 机械臂;多智能体;鲁棒自适应;执行器故障;一致性跟踪

中图分类号 TP241;TP273

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Robust adaptive fault-tolerant consensus tracking control for one-link manipulator multi-agent systems

LIU Keli¹, SUN Zongyao¹, LI Jiaojiao¹, ZHAO Junsheng²

(1. Institute of Automation, Qufu Normal University, Qufu 273165, China;

2. School of Mathematical Sciences, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract This paper investigates the robust adaptive fault-tolerant consensus tracking control problem for a class of multi-agent systems composed of three one-link manipulators. By using the backstepping method of adaptive techniques, a state feedback controller is designed to ensure that, despite unknown bounded disturbances and actuator input faults, each one-link manipulator's angular velocity can asymptotically track the leader signal in consensus, even when only partial followers have information about the leader. The novelty of this work lies in simultaneously considering disturbances and faults in one-link manipulator systems and applying multi-agent system control strategies to manipulator systems. Finally, the effectiveness of the control strategy is verified through simulations.

Keywords manipulators; multi-agent; robust adaptive; actuator faults; consensus tracking

收稿日期:2024-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(62173208);山东省泰山学者项目(tsqn202103061)资助

通信作者:孙宗耀,男,汉族,博士,教授,泰山学者青年专家,研究方向:非线性系统控制、自适应理论和时滞系统, E-mail: sunzongyao@sohu.com。

0 引言

机械臂是机器人系统中的一个重要分支,因其具有效率高、灵活性高、安全性高的优点,被广泛应用于农业生产、工业制造、航空航天、医疗手术、军事勘测等各个领域^[1-5]。机械臂根据设计材料的不同可以分为刚性机械臂和柔性机械臂^[6]。柔性材料由于具有能耗低、质量轻、精度高、响应速度快等优点,受到了越来越多国内外学者的关注^[3,7]。机械臂的主要功能是把物体从原位置搬运到目标位置,常规的机械臂仅在每个关节处有一个驱动器(即关节电机)。要实现机械臂的位置控制,只需要利用关节电机实现机械臂各连杆的角度控制即可^[1]。因此,关于机械臂系统的角度控制成为了学者们研究的热门问题。

通常一个单连杆机械臂的动力学模型可以表示为 $J\ddot{q} + B\dot{q} + Mgl\sin(q) = u(t)$, 该模型具有拉格朗日方程形式^[8]。式中 $q(t)$, $\dot{q}(t)$, $\ddot{q}(t)$ 分别表示单连杆的角度、角速度和角加速度, $u(t)$ 为控制输入, 表示电机转矩, J 为电机的总转动惯量, B 为总阻尼系数, M 为连杆的总质量, g 为重力加速度, l 为关节轴到质心的距离。 J , B , M , l 均为常数。实际的机械臂在转动过程中由于环境、摩擦等因素会产生一定的扰动, 则模型表示为 $J\ddot{q} + B\dot{q} + Mgl\sin(q) = u(t) + d(t)$, 式中 $d(t)$ 表示转矩扰动, 通常认为是有界的。

每个机械臂系统可以看作一个智能体, 在解决复杂的现实问题时, 单个智能体的能力通常不够。多智能体系统是由多个智能体组成的集合, 它可以将复杂的系统改造成小的、彼此互相通信和协调的简单系统。近年来, 由于在机器人、无人机、通信网络、卫星集群等领域的广泛应用^[9-14], 多智能体系统得到了飞速的发展。一致性问题是多智能体领域最热门的研究话题之一, 其目标是在一定的协议下设计适当的算法, 使系统中的每个智能体通过与其邻居之间的通信渐近收敛到一个协议^[15]。在机械臂的角度控制问题中, 一致性通常要求实现每个机械臂角度的统一。

考虑现实中的机械臂系统, 对系统进行定位和控制需要执行器和各类传感器之间的信息传递和相互配合。然而在操作机械臂时, 一些元件可能会出现部分甚至完全失效的情形, 从而导致系统操作精度下降、测量数据不准。系统中产生的故障轻则使系统无法达到预期性能, 控制精度误差增大, 重则导致整个系统不稳定、机械臂损坏或失控。一旦系统的执行器或传感器发生故障, 原先设计的控制方法可能无法实现控制目标, 需要人为对机械臂进行停机、检查和维修^[3]。因此, 针对机械臂系统故障问题的容错控制具有很重大的意义^[16]。

如果所研究的系统是精确已知的, 那么控制设计过程会比较简单, 然而模型的不确定性在研究实际问题时是不可避免的^[17-19]。由于机械臂模型存在非线性和不确定性, 自适应控制被认为是其控制器设计的有效方法^[20]。近年来, 对于机械臂系统自适应控制的研究越来越深入, 文献[21]针对一类具有时滞的死区输出非线性系统提出了一种新的模糊自适应控制器并将其应用于具有死区输出的机械臂系统。文献[22]研究了一类不确定非线性系统的基于事件触发的自适应控制问题, 并将其应用于基于网络控制的机械臂系统。然而类似以上的针对机械臂系统的研究都只研究了单个系统。随着多智能体的发展, 将多智能体系统研究方法应用于机械臂系统的案例有很多。文献[23]研究了存在不匹配未知参数和外部不确定干扰的非线性高阶多智能体系统的分布式自适应一致性跟踪控制问题并将其应用于一个由五个单连杆机械臂构成的系统。文献[24]提出了基于多智能体强化学习算法的机械臂优化方法。然而以上研究均未考虑执行器故障问题。

综上所述, 目前对于多个机械臂组成的多智能体系统的容错一致性跟踪自适应控制问题还有待深入研究, 鉴于此, 本文对下面的问题进行研究: 如何设计一个状态反馈控制器, 使得一类由三个单连杆机械臂组成的带有未知扰动和执行器输入故障的实际二阶多智能体系统实现渐近跟踪目标。为了解决这一问题, 本文采用自适应控制技术, 提出了一种新的控制设计策略, 该策略包含以下三个方面的创新:

(1) 与大量有关机械臂系统的文献相比, 本文同时考虑了未知扰动和执行器输入故障的影响, 更具有现实意义。

(2) 对跟踪信号进行了较为简单的假设, 即假设跟踪信号可以表示为基函数的线性组合, 进行了对未知参数的分离, 降低了求导的复杂程度, 且跟踪信号基函数线性组合表示中的基函数被所有系统已知, 使得渐近跟踪目标得以更好地实现。

(3) 将执行器故障、未知扰动和多种未知参数统一处理,使设计过程更加简约。即在控制器设计的第2步中,用一个参数来估计与执行器故障、未知扰动等多种因素相关的未知参数。

本文采用如下的规范符号: $\mathbf{R}$ 表示全体实数的集合, $\mathbf{R}^{m \times m}$ 表示所有 $m \times m$ 维实数矩阵构成的向量空间。对于第 i 个子系统,若其阶数为 n , 则其状态向量表示为 $\mathbf{x}_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}]^T$ 。为了表达的简洁性,在不引起混淆时,函数的变量可以简化或省略,例如 $f(g(x))$ 可以被表示为 $f(x)$, $f(\cdot)$ 或 f 。

1 控制目标与预备知识

考虑一个由三个单连杆机械臂组成的多智能体系统,每个机械臂的动力学模型可以表示为

$$\begin{aligned} J_i \ddot{q}_i + B_i \dot{q}_i + M_i g l_i \sin(q_i) &= \tau_i + d_i(t), \\ \tau_i &= A_i(t) u_i + D_i(t), i=1,2,3, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $q_i(t)$, $\dot{q}_i(t)$, $\ddot{q}_i(t)$ 分别表示第 i 个单连杆的角度、角速度和角加速度, $\tau_i(t)$ 为执行器故障输入, $u_i(t)$ 为实际控制输入,表示电机转矩, J_i 为电机的总转动惯量, B_i 为总阻尼系数, M_i 为连杆的总质量, g 为重力加速度, l_i 为关节轴到质心的距离, J_i, B_i, M_i, l_i 都是未知常数, $d_i(t)$ 为有界的标量力矩扰动,即满足 $|d_i(t)| \leq \tilde{d}_i$, $A_i(t)$ 表示执行器输入增益故障,是标量连续函数且满足 $A_i(t) \geq \bar{A}_i \geq 0$, $D_i(t)$ 表示执行器输入偏差故障,是标量连续函数且满足 $|D_i(t)| \leq \tilde{D}_i$ 。

假设领导者(跟踪信号)表示为基函数的线性组合,即 $y_d = \mathbf{C}^T \mathbf{Y}$, 其中 $\mathbf{Y} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_m]^T$, $Y_i, i=1,2, \dots, m$ 为有界基函数且对所有子系统都已知, $\mathbf{C} = [C_1, C_2, \dots, C_m]^T$ 为常数参数,仅对部分子系统已知。对于上述跟踪信号的基函数线性组合表示是一种常用的表达方式,出现在许多相关文献中^[12,25-27]。例如,若跟踪信号表示为 $y_d = 3\cos 2t$, 则基函数 $\cos 2t$ 被所有子系统已知,而常系数 3 仅被部分子系统已知。若跟踪信号表示为 $y_d = 0.5\cos t + 2\sin t = [0.5, 2]^T [\cos t, \sin t]^T$, 则基函数向量 $[\cos t, \sin t]$ 被所有子系统已知,而常系数向量 $[0.5, 2]$ 仅被部分子系统已知。

本文的控制目标是对于给定的由三个单连杆机械臂构成的多智能体系统(1)和(2),设计一个分布式鲁棒自适应容错控制器使得:(1) 闭环系统的所有信号在 $[t_0, +\infty)$ 上是一致有界的。(2) 所有追随者的单连杆角度一致地渐近跟踪领导者信号,即 $q_i - y_d \rightarrow 0, t \rightarrow +\infty, i=1,2,3$ 。

为了实现此控制目标,需要用到以下引理。

引理 1^[28] 给定连续函数 $f_1(t) \in \mathbf{R}$ 和 $f_2(t) > 0$ 且满足 $f_2(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$, 对于任意的 $t \geq 0$, 都成立

$$|f_1(t)| < \frac{f_1^2(t)}{\sqrt{f_1^2(t) + f_2^2(t)}} + f_2(t), \frac{|f_1(t)|}{\sqrt{f_1^2(t) + f_2^2(t)}} < 1.$$

图论的相关知识: 在一个由 N 个追随者和 1 个领导者组成的多智能体系统中,假设 N 个追随者之间的信息传递可以由一个无向图 $\mathcal{G} = (V, E)$ 表示,其中 $V = 1, \dots, N$ 表示每个智能体的索引集, $E = \{(i, j) \in V \times V\}$ 表示两个不同的智能体之间的边集。因为 $\mathcal{G}$ 是无向的,如果 $(i, j) \in E$, 则 $(j, i) \in E$, 这时称智能体 j 为智能体 i 的一个邻居,反之亦然。注意到边 (i, i) 是不存在的,因此 $(i, i) \notin E$ 。 $\mathcal{G}$ 的邻接矩阵 $\mathbf{A} = [a_{i,j}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 定义为如果 $(i, j) \in E$, 则 $a_{i,j} = a_{j,i} = 1$, 如果 $(i, j) \notin E$, 则 $a_{i,j} = a_{j,i} = 0$ 。显然, $\mathbf{A}$ 是一个对称矩阵,对角元 $a_{i,i} = 0$ 。假定 $\mathcal{G}$ 是连通的,即在每一对不同的智能体之间存在一个无向的边序列。另一方面,领导者的信息只被 N 个追随者中的一部分已知。如果追随者 i 能够直接获取领导者的信息,则记 $a_{i,0} = 1$, 否则,记 $a_{i,0} = 0$ 。

2 控制器设计

通过定义 $x_{i,1} = q_i, x_{i,2} = \dot{q}_i, y_i = q_i$, 系统(1)可以转化为

$$\begin{cases} \dot{x}_{i,1} = x_{i,2}, \\ \dot{x}_{i,2} = \frac{\tau_i}{J_i} + \frac{d_i(t)}{J_i} - \frac{B_i}{J_i} x_{i,2} - \frac{M_i g l_i \sin(x_{i,1})}{J_i}, \\ y_i = x_{i,1}, \end{cases} \quad (2)$$

初始条件为 $x_{i,1}(t_0)=q_i(t_0), x_{i,2}(t_0)=\dot{q}_i(t_0), y_i(t_0)=q_i(t_0)$, 分别表示第 i 个单连杆机械臂在初始时刻 t_0 的单连杆角度、角速度和角度。

然后,引入如下的坐标变换

$$\begin{aligned} z_{i,1}(t) &= \sum_{j=0}^3 a_{i,j} y_{i,j}(t), \\ z_{i,2}(t) &= x_{i,2}(t) - \alpha_i(x_{i,1}(t), a_{i,1}x_{1,1}(t), a_{i,2}x_{2,1}(t), a_{i,3}x_{3,1}(t), Y(t), \dot{Y}(t), \hat{C}_i(t)), \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $y_{i,j}=y_i-y_j, y_0=y_d, \hat{C}_i \in \mathbf{R}^m, i=1,2,3$ 是对 C 的在线估计。

第 1 步:本步的主要任务是设计虚拟控制器 $\alpha_{i,1}(\cdot)$, 为此我们需要考虑一个非负连续可微函数

$$V_1(x_{3,1}, y_d, \bar{\hat{C}}_3) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{i,j} y_{i,j}^2 + \sum_{i=1}^3 a_{i,0} y_{i,0}^2 + \sum_{i=1}^3 \tilde{C}_i^T \Gamma^{-1} \tilde{C}_i, \text{ 其中 } \Gamma \in \mathbf{R}^{m \times m} \text{ 是一个正定设计参数矩阵,}$$

$$\tilde{C}_i(t) = C - \hat{C}_i(t), \bar{\hat{C}}_3 = [\hat{C}_1, \hat{C}_2, \hat{C}_3]^T. \text{ 由式(2)和(3)可知}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{i,j} y_{i,j} \dot{y}_{i,j} + 2 \sum_{i=1}^3 a_{i,0} y_{i,0} \dot{y}_{i,0} - 2 \sum_{i=1}^3 \tilde{C}_i^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{C}}_i. \\ &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{i,j} y_{i,j} \dot{y}_i - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{i,j} y_{i,j} \dot{y}_j + 2 \sum_{i=1}^3 a_{i,0} y_{i,0} \dot{y}_i - 2 \sum_{i=1}^3 a_{i,0} y_{i,0} \dot{y}_0 - 2 \sum_{i=1}^3 \tilde{C}_i^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{C}}_i. \end{aligned}$$

由于 $\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{i,j} y_{i,j} \dot{y}_i = - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{i,j} y_{i,j} \dot{y}_j$ 和 $\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{i,j} y_{i,j} \dot{y}_0 = 0$, 不难得出

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= 2 \sum_{i=1}^3 ((\dot{y}_i - \dot{y}_0) \sum_{j=0}^3 a_{i,j} y_{i,j} - \tilde{C}_i^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{C}}_i) \\ &= 2 \sum_{i=1}^3 (z_{i,1} z_{i,2} + z_{i,1} (\alpha_{i,1} - \hat{C}_i^T \dot{Y}) - \tilde{C}_i^T (z_{i,1} \dot{Y} + \Gamma^{-1} \dot{\hat{C}}_i)), \end{aligned} \quad (4)$$

取自适应律 $\dot{\hat{C}}_i$ 和虚拟控制器 $\alpha_{i,1}$ 为

$$\dot{\hat{C}}_i = -\Gamma \dot{Y} z_{i,1}, \alpha_{i,1} = \hat{C}_i^T \dot{Y} - \mu_{i,1} z_{i,1}, \quad (5)$$

式中 $\mu_{i,1}$ 是一个正设计参数。将式(5)代入式(4),则可以得到

$$\dot{V}_1 = 2 \sum_{i=1}^3 (-\mu_{i,1} z_{i,1}^2 + z_{i,1} z_{i,2}). \quad (6)$$

第 2 步:设计实际控制器

$$u_i(x_i, a_{i,1}x_1, a_{i,2}x_2, a_{i,3}x_3, \hat{C}_i, \hat{\Theta}_i, Y, \dot{Y}, \dot{Y}, \eta_i) = -\alpha_{i,2} z_{i,2}, \quad (7)$$

式中 $\alpha_{i,2}(x_i, a_{i,1}x_1, a_{i,2}x_2, a_{i,3}x_3, \hat{C}_i, Y, \dot{Y}, \dot{Y}, \eta_i)$ 是一个待设计的连续函数, $\eta_i(t) > 0$ 是连续函数且满足

$\eta_i(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty, \hat{\Theta}_i(t)$ 是未知正常数 $\Theta_i = \max\{\frac{J_i}{A_i}, \frac{d_i}{A_i}, \frac{B_i}{A_i}, \frac{M_i g l_i}{A_i}, \frac{\bar{D}_i}{A_i}\}$ 的估计值。为此,我考虑非负连续可微函数 $V_2(x_1, x_2, x_3, Y, \dot{Y}, \dot{Y}, \bar{\hat{C}}_3, \bar{\hat{\Theta}}_3) = V_1 + \sum_{i=1}^3 z_{i,2}^2 + \sum_{i=1}^3 \frac{\bar{A}_i q_i}{J_i} \tilde{\Theta}_i^2$, 其中 $\tilde{\Theta}_i(t) = \Theta_i - \hat{\Theta}_i(t), \bar{\hat{\Theta}}_3 = [\hat{\Theta}_1, \hat{\Theta}_2, \hat{\Theta}_3], q_i$ 是一个正设计参数。由式(2), (3), (5), (6) 不难推出

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= 2 \sum_{i=1}^3 (-\mu_{i,1} z_{i,1}^2 - \frac{\bar{A}_i q_i}{J_i} \tilde{\Theta}_i \dot{\tilde{\Theta}}_i + z_{i,2} \frac{A_i}{J_i} u_i + z_{i,2} (z_{i,1} + \frac{D_i}{J_i} + \frac{d_i}{J_i} - \frac{B_i}{J_i} x_{i,2} - \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial x_{i,1}} x_{i,2} - \\ &\quad \frac{M_i g l_i \sin(x_{i,1})}{J_i} - \sum_{j=1}^3 a_{i,j} \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial x_{j,1}} x_{j,2} - \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial Y} \dot{Y} - \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial \dot{Y}} \dot{Y} - \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial \hat{C}_i} \dot{\hat{C}}_i), \end{aligned} \quad (8)$$

根据假设条件 $A_i(t) \geq \bar{A}_i \geq 0$ 和式(7)可以推出

$$z_{i,2} \frac{A_i}{J_i} u_i = -\frac{A_i}{J_i} \alpha_{i,2} z_{i,2}^2 \leq -\frac{\bar{A}_i}{J_i} \alpha_{i,2} z_{i,2}^2. \quad (9)$$

利用引理 1 还可以得出

$$z_{i,2}(z_{i,1} + \frac{D_i}{J_i} + \frac{d_i}{J_i} - \frac{B_i}{J_i}x_{i,2} - \frac{M_i g l_i \sin(x_{i,1})}{J_i} - \sum_{j=1}^3 a_{i,j} \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial x_{j,1}} x_{j,2} - \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial x_{i,1}} x_{i,2} - \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial Y} Y - \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial \dot{Y}} \dot{Y} - \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial \dot{C}_i} \dot{C}_i) \leq \frac{\bar{A}_i \Theta_i M_i^2 z_{i,2}^2}{J_i \sqrt{M_i^2 z_{i,2}^2 + \eta_i^2}} + \frac{\bar{A}_i \Theta_i}{J_i} \eta_i, \quad (10)$$

式中 $M_i(x_i, a_{i,1}x_1, a_{i,2}x_2, a_{i,3}x_3, \hat{C}_i, Y, \dot{Y}, \dot{Y}) = |z_{i,1}| + |x_{i,2}| + |\sin(x_{i,1})| + |\frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial x_{i,1}} x_{i,2}| + 2 + \sum_{j=1}^3 a_{i,j} |\frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial x_{j,1}} x_{j,2}| + |\frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial Y} Y| + |\frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial \dot{Y}} \dot{Y}| + |\frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial \dot{C}_i} \dot{C}_i|$, 是一个已知连续函数。此时可以选择自适应律 $\dot{\hat{\Theta}}_i$ 和连续函数 $\alpha_{i,2}$ 为

$$\dot{\hat{\Theta}}_i = \frac{M_i^2 z_{i,2}^2}{q_i \sqrt{M_i^2 z_{i,2}^2 + \eta_i^2}}, \alpha_{i,2} = \mu_{i,2} + \frac{\hat{\Theta}_i M_i^2}{\sqrt{M_i^2 z_{i,2}^2 + \eta_i^2}}, \quad (11)$$

式中 $\mu_{i,2}$ 为一个正设计参数。将式(9)~(11)代入式(8)可知

$$\dot{V}_2 \leq 2 \sum_{i=1}^3 (-\mu_{i,1} z_{i,1}^2 - \frac{\bar{A}_i \mu_{i,2}}{J_i} z_{i,2}^2 + \frac{\bar{A}_i \Theta_i}{J_i} \eta_i). \quad (12)$$

3 主要结果

定理1 对于给定的由三个单连杆机械臂构成的多智能体系统(1),(2),所设计的分布式控制器和自适应律可以保证闭环系统具有以下性质:

- (1) 闭环系统的所有信号在 $[t_0, +\infty)$ 上是一致有界的。
- (2) 所有追随者的单连杆角度一致地渐近跟踪领导者信号,即

$$q_i(t) - y_d(t) \rightarrow 0, t \rightarrow +\infty, i=1,2,3.$$

证 首先定义闭环系统为 $\dot{\psi}(t) = \Phi(t, \psi(t))$, 其中 $\psi(t) = [x_1^T, x_2^T, x_3^T, \bar{C}_3^T, \bar{\Theta}_3^T]^T$, 很明显 $\Phi(t, \psi(t))$ 关于 t 是连续的。根据连续系统解的存在性定理, $\psi(t)$ 定义在区间 $[t_0, t_b)$, 其中 t_b 为有限值或者正无穷。下面依次证明(1)和(2)。

- (1) 从 t_0 到 $t \in [t_0, t_b)$ 对不等式(12)两边同时积分,可以得到

$$V_2(t) \leq V_2(t_0) + 2 \sum_{i=1}^3 \int_{t_0}^t \frac{\bar{A}_i \Theta_i}{J_i} \eta_i(\tau) d\tau < +\infty,$$

因此对于 $i=1,2,3$ 和 $j=0,1,2,3$, $a_{i,j}y_{i,j}(t)$, $z_{i,2}(t)$, $\tilde{C}_i(t)$ 和 $\tilde{\Theta}_i$ 在 $[t_0, t_b)$ 上是有界的,根据 $Y(t)$ 在 $[t_0, t_b)$ 上的有界性以及 $a_{i,j}$ 的定义,可以得出 $x_{i,1}(t)$, $\hat{C}_i(t)$ 和 $\hat{\Theta}_i$ 在 $[t_0, t_b)$ 上是有界的。再结合 $Y(t)$ 和 $\dot{Y}(t)$ 在 $[t_0, t_b)$ 上的有界性,以及函数 $\alpha_{i,1}(\cdot)$ 的连续性,我们可以得出 $x_{i,2}(t) = z_{i,2}(t) + \alpha_{i,1}$ 在 $[t_0, t_b)$ 上的有界性,进而结合函数 $M_i(\cdot)$ 的连续性和 $Y(t)$ 在 $[t_0, t_b)$ 上的有界性,可以得出 M_i 在 $[t_0, t_b)$ 上是有界的。

根据式(7)和(11)得到 $|u_i| = \left| \mu_{i,2} z_{i,2} + \frac{\hat{\Theta}_i M_i^2 z_{i,2}}{\sqrt{M_i^2 z_{i,2}^2 + \eta_i^2}} \right| \leq \mu_{i,2} |z_{i,2}| + |\hat{\Theta}_i| M_i$, 因此 u_i 在 $[t_0, t_b)$ 上是有界的。

接下来利用反证法证明 $t_b = +\infty$ 。假设 t_b 为一个有限值,则 t_b 是一个有限逃逸时间,所以当 $t \rightarrow t_b$ 时, $x_i(t) \rightarrow +\infty, i=1,2,3$ 或者 $u_i(t) \rightarrow +\infty$, 这与 $x_i(t), i=1,2,3$ 和 $u_i(t)$ 在 $[t_0, t_b)$ 上的有界性是矛盾的,因此 $t_b = +\infty$ 。综上所述,所有闭环信号在 $[t_0, +\infty)$ 上是一致有界的。

- (2) 从 t_0 到 $t \in [t_0, t_b)$ 对不等式(12)两边同时积分,可以得到

$$\begin{aligned} & 2 \sum_{i=1}^3 (\mu_{i,1} \int_{t_0}^{+\infty} z_{i,1}^2(\tau) d\tau + \frac{\bar{A}_i \mu_{i,2}}{J_i} \int_{t_0}^{+\infty} z_{i,2}^2(\tau) d\tau) \\ & \leq V_2(t_0) + 2 \sum_{i=1}^3 \int_{t_0}^{+\infty} \frac{\bar{A}_i \Theta_i}{J_i} \eta_i(\tau) d\tau < +\infty, \end{aligned} \quad (13)$$

根据式(2)和(3)可知 $\dot{z}_{i,1}(t), i=1,2,3$ 在 $[t_0, +\infty)$ 上是有界的,因此 $\dot{z}_{i,1}(t), i=1,2,3$ 在 $[t_0, +\infty)$ 上是一致连续的。结合这一点和不等式(13),可以根据 Barbalat 引理^[29]得出 $z_{i,1}(t) \rightarrow 0, t \rightarrow +\infty, i=1,2,3$ 。再根据 $z_{i,1}(t)$ 的定义可以得出 $q_i(t) - y_d(t) \rightarrow 0, t \rightarrow +\infty, i=1,2,3$ 。

4 仿真

本部分通过仿真实现说明本文所给出的控制策略的有效性和先进性。为此,我们给定由三个单连杆机械臂组成的多智能体系统(1)的系统参数如: $J_1=J_2=1, J_3=1.5, B_1=B_2=2, B_3=1, M_1gl_1=10, M_2gl_2=8, M_3gl_3=5$, 其中 J_i 为电机的总转动惯量, B_i 为总阻尼系数, M_i 为连杆的总质量, g 为重力加速度, l_i 为关节轴到质心的距离,假设力矩扰动为 $d_1(t)=-0.05\sin(2t), d_2(t)=-0.01\sin(t), d_3(t)=-0.08\sin(t)$, 三个子系统的执行器故障输入分别为

$$\tau_1 = \begin{cases} u_1, t \leq 3, \\ u_1 + (t-3)(-0.5u_1 + 0.5\sin(0.5t)), 3 < t \leq 4, \\ 0.5u_1 + 0.5\sin(0.5t), t > 4, \end{cases}$$

$$\tau_2 = \begin{cases} u_2, t \leq 2, \\ u_2 + (t-2)(-0.2u_2 + 0.2\sin(0.1t)), 2 < t \leq 3, \\ 0.8u_2 + 0.2\sin(0.1t), t > 3, \end{cases}$$

$$\tau_3 = \begin{cases} u_3, t \leq 3, \\ u_3 + (t-3)(-0.1u_3 + 0.1\sin(t)), 3 < t \leq 4, \\ 0.9u_3 + 0.1\sin(t), t > 4, \end{cases}$$

跟踪信号被选择为 $y_d(t)=0.2\sin(0.5t)$, 则有常系数和基函数为 $C=0.2, Y=\sin(0.5t)$ 。三个子系统的通信拓扑可由图1表示。

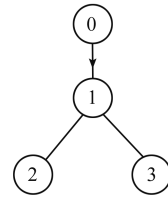


图1 三个子系统的通信拓扑

Fig. 1 Communication topology for the three subsystems

由图1可知 $a_{1,1}=0, a_{1,j}=1, j=0,2,3, a_{2,1}=1, a_{2,k}=0, k=0,2,3, a_{3,1}=1, a_{3,l}=0, l=0,2,3$ 。

考虑 $T=20$ s,应用第二部分中式(5),(7)和(11)所设计的自适应律和控制器,并选择设计参数为 $\Gamma=1, \mu_{1,1}=3.9, \mu_{1,2}=4, \mu_{2,1}=4, \mu_{2,2}=1, \mu_{3,1}=4, \mu_{3,2}=4, q_i=1, i=1,2,3$ 。

选择时变衰减函数 $\eta_i(t), i=1,2,3$ 为 $\eta_i(t)=e^{-0.5t}, i=1,2,3$, 选择三个子系统的初始值为 $x_{1,1}(0)=3, x_{1,2}(0)=-49, x_{2,1}(0)=-1.5, x_{2,2}(0)=19, x_{3,1}(0)=-2, x_{3,2}(0)=19, \hat{C}_1(0)=1, \hat{C}_2(0)=1, \hat{C}_3(0)=1, \hat{\Theta}_1(0)=1, \hat{\Theta}_2(0)=1, \hat{\Theta}_3(0)=1$, 分别表示每个子系统的初始单连杆角度、初始角速度以及初始参数估计。

图2~7给出了仿真结果:(1)图2展示了三个单连杆机械臂系统的角速度 $q_i, i=1,2,3$ 最终一致地实现了对领导者信号 y_d 的渐近跟踪,即实现了三个单连杆机械臂角速度的统一。图3展示了跟踪误差 $e_i=y_i-y_d, i=1,2,3$ 渐近收敛到零。但是文献[12]中的方法并不能保证跟踪误差的渐近收敛。相比之下,本文所提出的控制方法可以更好地补偿执行器故障和参数不确定性,使各个单连杆机械臂系统的角速度以更好的性能实现了对领导者信号的一致性跟踪。(2)图2~7说明闭环系统的所有信号均是有界的。

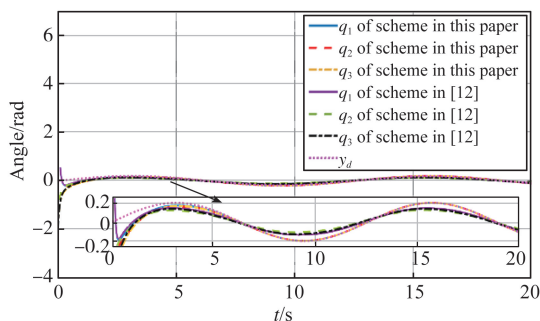


图2 $q_i, i=1,2,3$ 和 y_d 的轨迹

Fig. 2 Trajectories of $q_i, i=1,2,3$ and y_d

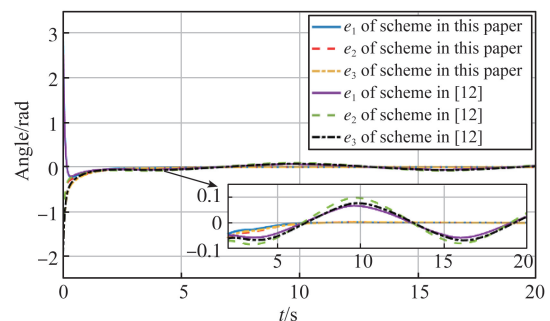
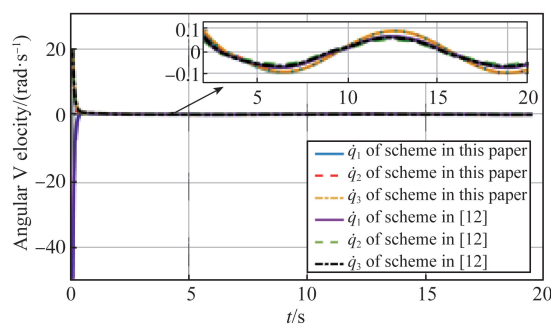
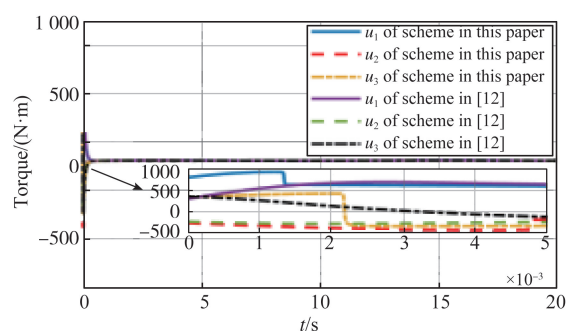
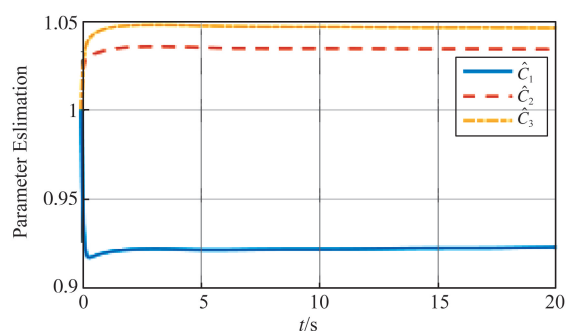
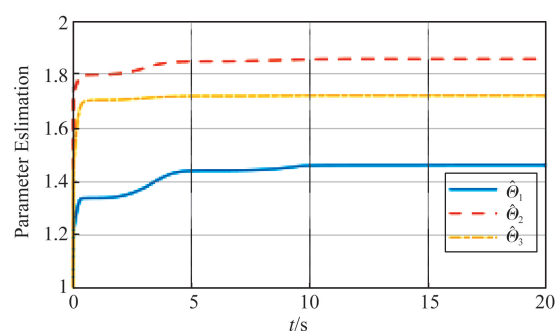


图3 $e_i, i=1,2,3$ 的轨迹

Fig. 3 Trajectories of $e_i, i=1,2,3$

图4 $\dot{q}_i, i=1,2,3$ 的轨迹Fig. 4 Trajectories of $\dot{q}_i, i=1,2,3$ 图5 $u_i, i=1,2,3$ 的轨迹Fig. 5 Trajectories of $u_i, i=1,2,3$ 图6 $\hat{C}_i, i=1,2,3$ 的轨迹Fig. 6 Trajectories of $\hat{C}_i, i=1,2,3$ 图7 $\hat{\theta}_i, i=1,2,3$ 的轨迹Fig. 7 Trajectories of $\hat{\theta}_i, i=1,2,3$

5 结论

本文研究了一类由三个单连杆机械臂组成的多智能体系统基于自适应 Backstepping 技术的鲁棒一致性容错跟踪控制问题。在存在未知扰动和执行器输入故障的情况下,所设计的控制器不仅能够保证闭环系统所有信号一致有界,而且能够在只有部分追随者可以获取领导者信息情况下,使所有追随者的单连杆角度一致性地渐近跟踪领导者信号。

参 考 文 献

- [1] 孟庆鑫,赖旭芝,闫泽,等. 驱动器故障影响下柔性机械臂运动控制的进展与展望[J]. 广东工业大学学报, 2022, 39(5): 9-20.
- [2] 李啸. 基于状态观测器的单连杆柔性机械臂自适应位置跟踪控制[D]. 烟台:烟台大学, 2023.
- [3] 佟思源. 基于 PDE 柔性机械臂系统故障容错控制方法研究[D]. 长春:长春工业大学, 2023.
- [4] 吕文韬,蒋涵元,张立岩. 状态约束下单连杆机械臂输出反馈自适应跟踪控制[J]. 控制工程, 2023, 30(6): 1146-1152.
- [5] LI J J, SUN Z Y, WEN C Y, et al. Adaptive event-triggered exponential tracking control of parallel robot manipulators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2024. DOI: 10.1109/TMECH.2024.3483284.
- [6] 李永超. 基于 SRF 控制的单连杆柔性机械臂减振方法研究[D]. 西安:长安大学, 2021.
- [7] 谢仕培,孙伟. 单连杆柔性关节机械臂的高阶滑模控制器设计[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2024, 37(2): 9-18.
- [8] LIU Z, LAI G Y, ZHANG Y, et al. Adaptive fuzzy tracking control of nonlinear time-delay systems with dead-zone output mechanism based on a novel smooth model[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23(6): 1998-2011.
- [9] PACK D J, DELIMA P, TOUSSAINT G J, et al. Cooperative control of UAVs for localization of intermittently emitting mobile targets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2009, 39(4): 959-970.
- [10] DO K D. Formation tracking control of unicycle-type mobile robots with limited sensing ranges[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(3): 527-538.
- [11] IGNACIUK P, BARTOSZEWICZ A. Discrete-time sliding-mode congestion control in multisource communication networks with time-

- varying delay[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 19(4): 852-867.
- [12] WANG W, HUANG J S, WEN C Y, et al. Distributed adaptive control for consensus tracking with application to formation control of nonholonomic mobile robots[J]. Automatica, 2014, 50(4): 1254-1263.
- [13] REN W, BEARD R W, ATKINS E M. Information consensus in multivehicle cooperative control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2007, 27(2): 71-82.
- [14] WEN G H, DUAN Z S, YU W W, et al. Consensus in multi-agent systems with communication constraints[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2012, 22(2): 170-182.
- [15] HUANG J S, WEN C Y, WANG W, et al. Adaptive finite-time consensus control of a group of uncertain nonlinear mechanical systems [J]. Automatica, 2015, 51: 292-301.
- [16] 任世纪, 孙宗耀, 赵军圣. 一类输出受限机械系统的鲁棒自适应容错跟踪[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2024, 37(5): 8-17.
- [17] SUN Z Y, LI J J, WEN C Y, et al. Adaptive event-triggered prescribed-time stabilization of uncertain nonlinear systems with asymmetric time-varying output constraint[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2024, 69(8): 5454-5461.
- [18] SUN Z Y, LI J J, WEN C Y, et al. A new adaptive designated-time stabilizing strategy for uncertain time-varying nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2025, 70(1): 579-586.
- [19] WANG W, HUANG J S, WEN C Y, et al. Distributed adaptive control for consensus tracking with application to formation control of nonholonomic mobile robots[J]. Automatica, 2014, 50(4): 1254-1263.
- [20] HSIA T. Adaptive control of robot manipulators-a review[C]//Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1986, 3: 183-189.
- [21] LIU Z, LAI G Y, ZHANG Y, et al. Adaptive fuzzy tracking control of nonlinear time-delay systems with dead-zone output mechanism based on a novel smooth model[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23(6): 1998-2011.
- [22] XING L T, WEN C Y, LIU Z T, et al. Event-triggered adaptive control for a class of uncertain nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 62(4): 2071-2076.
- [23] WANG W, WEN C Y, HUANG J S. Distributed adaptive asymptotically consensus tracking control of nonlinear multi-agent systems with unknown parameters and uncertain disturbances[J]. Automatica, 2017, 77: 133-142.
- [24] 宁柯军, 杨汝清. 基于多智能体的机械臂嵌入式系统控制[J]. 上海交通大学学报, 2005(12): 2016-2019.
- [25] BAI H, ARCAK M, WEN J T. Adaptive design for reference velocity recovery in motion coordination[J]. Systems & Control Letters, 2008, 57(8): 602-610.
- [26] BAI H, ARCAK M, WEN J T. Adaptive motion coordination: using relative velocity feedback to track a reference velocity[J]. Automatica, 2009, 45(4): 1020-1025.
- [27] YU H, XIA X H. Adaptive consensus of multi-agents in networks with jointly connected topologies[J]. Automatica, 2012, 48(8): 1783-1790.
- [28] SUN Z Y, XU T L, CAI B, et al. Robust adaptive regulation of magnetic levitation systems with input quantization and external disturbances[J]. Journal of the Franklin Institute, 2023, 360(3): 1672-1689.
- [29] 闵颖颖, 刘允刚. Barbalat 引理及其在系统稳定性分析中的应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2007(1): 51-55.

(责任编辑: 赵海军)