

文章编号: 1001-0920(2012)03-0446-05

可重构机械臂反演时延分散容错控制

李元春¹, 陆鹏², 赵博²

(1. 长春工业大学 控制工程系, 长春 130012; 2. 吉林大学 汽车动态模拟国家重点实验室, 长春 130022)

摘要: 针对存在模型参数不确定性的可重构机械臂系统执行器故障, 提出一种基于反演设计与时延技术相结合的容错控制方法. 该方法利用反演设计的基本思想, 通过神经网络补偿子系统动力学模型中的参数不确定项和关联项. 利用时延控制的逼近能力来补偿执行器的故障, 使得故障发生时能及时实现容错控制. 该方法具有不需要在线进行故障诊断的特点, 仿真结果表明了所提出控制方法的有效性.

关键词: 容错控制; 时延控制; 反演设计; 神经网络控制; 可重构机械臂

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Backstepping time delay decentralized fault-tolerant control for reconfigurable manipulators

LI Yuan-chun¹, LU Peng², ZHAO Bo²

(1. Department of Control Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012; 2. State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation, Jilin University, Changchun 130022, China. Correspondent: LI Yuan-chun, E-mail: liyc@mail.ccut.edu.cn)

Abstract: For system actuator's fault of reconfigurable manipulators with model parameters uncertainty, a fault-tolerant control algorithm based on backstepping design and time delay technology is proposed. This method uses the basic idea of the backstepping design, and compensates parameter uncertainty of the dynamic model and interconnection term by the neural networks. The proposed fault tolerant control does not need a fault diagnosis mechanism. Finally, simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: fault-tolerant control; time delay control; backstepping design; neural network control; reconfigurable manipulators

1 引言

可重构机器人广泛应用于人类无法完成的遥操作和危险环境中, 但其传感器、执行器或其他部件不可避免地会发生故障, 同时操作者也无法对机器人进行直接干预. 如果故障不能得到及时的处理, 机器人则会以一种不可预知的方式工作, 这样不仅会缩短机器人的使用寿命, 甚至导致灾难性后果. 为了提高可靠性和自修复能力, 容错控制已成为可重构模块机器人技术需要迫切研究的任务.

文献 [1-2] 采用神经网络逼近故障函数, 并将故障信息用于控制律的重构. [3] 在航天器的姿态控制领域采用多模型方法检测和隔离执行器故障. 上述方法大都属于集中控制方法. 目前, 分散控制在机器人的研究中越来越受到重视, 它不仅结构简单, 具有柔

性, 而且适合软件模块化的设计思想. [4] 针对执行器故障设计了一种基于直接和间接自适应的可重构模块机器人分散容错控制. [5] 提出一种基于力矩传感器的可重构模块机器人容错控制方法, 该方法在不影响且不需要其他模块信息的情况下实现容错, 非常适合于可重构模块机器人.

本文针对执行器故障提出了一种可重构模块机械臂的反演神经网络时延分散容错控制, 将可重构模块机械臂的动力学描述为一个交联子系统的集合^[6]. 在执行器正常运行过程中采用反演神经网络分散控制, 该控制方法不但继承了反演控制的优点, 而且可以利用神经网络补偿模型参数不确定项和各个子系统之间关联项的影响. 时延控制适用于处理未知动力学部分, 且不需要任何明确的估计^[7]. 本文将故障视

收稿日期: 2010-12-06; 修回日期: 2011-02-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60674091, 60974010); 吉林省科技发展计划项目(20110705).

作者简介: 李元春(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模与优化、机器人控制等研究; 陆鹏(1984—), 男, 硕士生, 从事可重构模块机器人故障诊断与容错控制的研究.

为未知动力学部分进行处理, 提出了一种不需要进行实时在线估计的时延容错方法, 利用时延控制的逼近能力来补偿执行器的故障, 使得故障发生时能及时实现容错控制. 此方法不但独立于故障信息, 而且独立于其他关节和连杆模块信息, 适合软件模块化的设计思想, 并且当执行器失效时仍能保证系统的稳定性和跟踪的精确性.

2 问题描述

可重构模块机械臂是一个由关节模块和连杆模块组成的开运动学链. 为了设计分散控制律, 将每个关节模块考虑成机械臂系统的一个子系统, 这些子系统通过关节耦合力矩相互关联. 应用 Lagrange 方程, 各子系统的动力学模型可以描述为^[8]

$$u_i = M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + G_i(q_i) + F_i(q_i, \dot{q}_i) + Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}). \quad (1)$$

其中

$$Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \left\{ \sum_{j=1, j \neq i}^n M_{ij}(q)\ddot{q}_j + [M_{ii}(q) - M_i(q_i)]\ddot{q}_i \right\} + \left\{ \sum_{j=1, j \neq i}^n C_{ij}(q, \dot{q})\dot{q}_j + [C_{ii}(q, \dot{q}) - C_i(q_i, \dot{q}_i)]\dot{q}_i \right\} + [\bar{G}_i(q) - G_i(q_i)];$$

$q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i \in R$ 分别为子系统 i 的位置、速度和加速度; $M_i(q_i) \in R$ 为惯性张量; $C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i \in R$ 包含哥氏力和离心力; $G_i(q_i) \in R$ 为重力项; $F_i(q_i, \dot{q}_i) \in R$ 为摩擦力项; $Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) \in R$ 为子系统关联项.

考虑到模型参数的不确定性, 各子系统的实际参数 $M_i(q_i), C_i(q_i, \dot{q}_i), G_i(q_i)$ 可以分解成名义值和结构参数不确定性两个部分, 即

$$\begin{aligned} M_i(q_i) &= M_{i0}(q_i) - \Delta M_i(q_i), \\ C_i(q_i, \dot{q}_i) &= C_{i0}(q_i, \dot{q}_i) - \Delta C_i(q_i, \dot{q}_i), \\ G_i(q_i) &= G_{i0}(q_i) - \Delta G_i(q_i). \end{aligned}$$

此时子系统的动力学方程可以改写为

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i &= M_{i0}^{-1}(q_i)(-C_{i0}(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i - G_{i0}(q_i) + u_i) + \Delta M_i^{-1}(q_i)[u_i - C_{i0}(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i - G_{i0}(q_i)] - M_i^{-1}(q_i)[\Delta C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + \Delta G_i(q_i) + F_i(q_i, \dot{q}_i)] - M_i^{-1}Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}). \end{aligned} \quad (2)$$

定义

$$\begin{aligned} \rho_i(q_i, \dot{q}_i, u_i) &= \Delta M_i^{-1}(q_i)[u_i - C_{i0}(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i - G_{i0}(q_i)] - M_i^{-1}(q_i)[\Delta C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + \Delta G_i(q_i) + F_i(q_i, \dot{q}_i)] \end{aligned}$$

为系统的不确定项.

假设 1 由于力矩 u_i 是 q_i 和 \dot{q}_i 的函数, 可以将不确定性 $\rho_i(q_i, \dot{q}_i, u_i)$ 的估计假设为 $\hat{\rho}_i(q_i, \dot{q}_i, \hat{W}_{i\rho})$.

设 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}]^T = [q_i, \dot{q}_i]^T, i = 1, 2, \dots, n$. 状态空间 S_i 表示为

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= A_i x_i + B_i [M_{i0}^{-1}(-C_{i0}(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i - G_{i0}(q_i) + u_i)] + \rho_i(q_i, \dot{q}_i, W_{i\rho}^*) + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}), \\ y_i &= C_i x_i. \end{aligned} \quad (3)$$

其中: x_i 为子系统 S_i 的状态变量; y_i 为子系统 S_i 的输出; $h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 为子系统关联项, 且有

$$\begin{aligned} h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) &= -M_i^{-1}(q_i)Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}); \\ A_i &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C_i = [1 \ 0]. \end{aligned}$$

控制目标是针对系统模型 (1) 设计分散控制律, 使可重构模块机械臂跟踪期望轨迹.

3 反演神经网络分散控制

定义第 i 个子系统的跟踪误差 $e_{i1} = x_{i1} - x_{i1}^d, x_{i1}^d = y_{ir}$, 则有

$$\dot{e}_{i1} = \dot{x}_{i1} - \dot{x}_{i1}^d = x_{i2} - \dot{x}_{i1}^d. \quad (4)$$

定义虚拟控制量

$$\alpha_i = \dot{x}_{i1}^d - k_{i1}e_{i1}, \quad (5)$$

其中 $k_{i1} > 0$. 有

$$\dot{V}_{i1} = e_{i1}e_{i2} - k_{i1}e_{i1}. \quad (6)$$

若 $e_{i2} = 0$, 则 $\dot{V}_{i1} \leq 0$. 此时考虑 e_{i2} 的误差方程

$$\begin{aligned} \dot{e}_{i2} &= M_{i0}^{-1}(q_i)(-C_{i0}(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i - G_{i0}(q_i) + u_i) + \rho_i + h_i - \dot{x}_{i2}^d. \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $\rho_i(q_i, \dot{q}_i, W_{i\rho}^*)$ 简写为 $\rho_i, h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 简写为 h_i .

当不考虑可重构机械臂参数不确定性和关联项影响时, 其动力学参数是精确的, 理想控制律为

$$\begin{aligned} u_i &= M_{i0}(q_i)(\dot{x}_{i2}^d - e_{i1} - k_{i2}e_{i2}) + C_{i0}(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + G_{i0}(q_i). \end{aligned} \quad (8)$$

将式 (8) 代入 (7) 中得到

$$\dot{e}_{i2} = -k_{i2}e_{i2} - e_{i1}. \quad (9)$$

定义 Lyapunov 函数

$$V_{i2} = V_{i1} + e_{i2}^2/2, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i2} &= -k_{i1}e_{i1}^2 + e_{i1}e_{i2} + e_{i2}\dot{e}_{i2} = \\ &= -k_{i1}e_{i1}^2 - k_{i2}e_{i2}^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (11)$$

通过控制律的设计, 使得系统满足了李亚普诺夫稳定性理论条件.

实际应用中, 可重构机械臂系统存在参数不确定

性, 并受到各个子系统之间关联项的影响, 所以本文在考虑关联项和不确定项的同时, 设计了一个反演神经网络分散控制器, 使可重构机械臂能够按照期望的轨迹运行.

利用神经网络的通用逼近属性, 加入一个神经网络补偿控制器 (RBF) 来补偿系统中的不确定项 $\rho_i(q_i, \dot{q}_i, W_{i\rho}^*)$, 有

$$\rho_i(q_i, \dot{q}_i, W_{i\rho}^*) = W_{i\rho}^{*\text{T}} \Phi_{i\rho}(q_i, \dot{q}_i) + \varepsilon_{i\rho}. \quad (12)$$

其中: $\varepsilon_{i\rho}$ 为模糊逻辑系统的逼近误差; $W_{i\rho}^*$ 为最优权值参数向量; $\Phi_{i\rho}(q_i, \dot{q}_i)$ 为神经网络基函数, 本文应用高斯型基函数 $\Phi_{i\rho}(q_i, \dot{q}_i) = \exp(-(x_i - c_i)^2 / (2\sigma_i^2))$, c_i 和 σ_i 分别为中心和宽度; $\rho_i(q_i, \dot{q}_i)$ 的估计值为 $\hat{\rho}_i(q_i, \dot{q}_i, \hat{W}_{i\rho})$, 描述为

$$\hat{\rho}_i(q_i, \dot{q}_i, \hat{W}_{i\rho}) = \hat{W}_{i\rho}^{\text{T}} \hat{\Phi}_{i\rho}(q_i, \dot{q}_i), \quad (13)$$

$$\tilde{\rho}_i(q_i, \dot{q}_i, \hat{W}_{i\rho}) = \rho_i(q_i, \dot{q}_i) - \hat{\rho}_i(q_i, \dot{q}_i, \hat{W}_{i\rho}) = \tilde{W}_{i\rho}^{\text{T}} \hat{\Phi}_{i\rho}(q_i, \dot{q}_i) + W_{i\rho}^{*\text{T}} \tilde{\Phi}_{i\rho}(q_i, \dot{q}_i) + \varepsilon_{i\rho}. \quad (14)$$

采用神经网络系统 $\hat{\rho}_i(|e_{i2}|, \hat{W}_{i\rho})$ 补偿关联项的影响, $\hat{p}_i(|e_{i2}|, \hat{W}_{i\rho})$ 可以表示为

$$\hat{p}_i(|e_{i2}|, \hat{W}_{i\rho}) = \hat{W}_{i\rho}^{\text{T}} \hat{\Phi}_{i\rho}(|e_{i2}|), \quad (15)$$

其中 $\hat{W}_{i\rho}$ 为 $W_{i\rho}$ 的估计值, 权值估计误差为 $\tilde{W}_{i\rho} = W_{i\rho} - \hat{W}_{i\rho}$.

假设 2 关联项 $h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 有界且满足^[8]

$$|h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})| \leq \sum_{j=1}^n d_{ij} E_j. \quad (16)$$

其中: $d_{ij} \geq 0$, $E_j = 1 + |e_j| + |e_j|^2$.

定义 $p(|e_{i2}|) = n \max_{ij} \{d_{ij}\} E_i$, 并定义最小逼近误差为

$$w_{i1} = W_{i\rho}^{*\text{T}} \tilde{\Phi}_{i\rho}(q_i, \dot{q}_i) + \varepsilon_{i\rho}, \quad (17)$$

$$w_{i2} = p_i(|e_{i2}|) - \hat{W}_{i\rho}^{\text{T}} \tilde{\Phi}_{i\rho}(|e_{i2}|), \quad (18)$$

$$w_i = w_{i1} + w_{i2}. \quad (19)$$

假设 3 逼近误差 w_i 有界, 且满足 $\|w_i\| \leq \beta_i$, $\beta_i \geq 0$ 为未知常数.

采用自适应更新律估计逼近误差的界 β_i . 分散控制律设计为

$$u_i = M_{i0}[\dot{x}_{i2}^d - \hat{\rho}_i(q_i, \dot{q}_i, \hat{W}_{i\rho}) - e_{i1} - k_{i2}e_{i2} - \text{sgn}(e_{i2})\hat{p}_i(|e_{i2}|, \hat{W}_{i\rho})] + C_{i0}q_i + G_{i0} + u_{ic}. \quad (20)$$

其中: $C_{i0}(q_i, \dot{q}_i)$ 简写为 C_{i0} , $M_{i0}(q_i)$ 简写为 M_{i0} , $G_{i0}(q_i)$ 简写为 G_{i0} . 鲁棒项为

$$u_{ic} = -M_{i0}\hat{\beta}_i. \quad (21)$$

将式 (20) 和 (21) 代入 (7), 可得到系统误差方程为

$$\begin{aligned} \dot{e}_{i2} &= \tilde{W}_{i\rho}^{\text{T}} \hat{\Phi}_{i\rho}(q_i, \dot{q}_i) + W_{i\rho}^{*\text{T}} \tilde{\Phi}_{i\rho}(q_i, \dot{q}_i) + \varepsilon_{i\rho} - \\ &e_{i1} - k_{i2}e_{i2} + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) - \\ &\text{sgn}(e_{i2})\hat{p}_i(|e_{i2}|, \hat{W}_{i\rho}) - \hat{\beta}_i. \end{aligned} \quad (22)$$

自适应更新律为

$$\dot{\hat{W}}_{i\rho} = \eta_{i\rho} e_{i2} \hat{\Phi}_{i\rho}(q_i, \dot{q}_i), \quad (23)$$

$$\dot{\hat{W}}_{ip} = \eta_{ip} |e_{i2}| \hat{\Phi}_{ip}(|e_{i2}|), \quad (24)$$

$$\dot{\hat{\beta}}_i = K_o e_{i2}, \quad (25)$$

其中 $\eta_{i\rho}, \eta_{ip}, K_o$ 为正常数.

定理 1 考虑可重构模块机械臂的子系统动力学 (1) 和假设 1~假设 3, 设计反演神经网络分散控制律 (20) 和 (21), 自适应更新律 (23)~(25), 则闭环系统稳定且轨迹跟踪误差最终一致有界.

证明 定义 Lyapunov 函数

$$V = \sum_{i=1}^n V_i, \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{e_{i1}^2}{2} + \frac{e_{i2}^2}{2} + \frac{1}{2\eta_{i\rho}} \tilde{W}_{i\rho}^{\text{T}} \tilde{W}_{i\rho} + \frac{1}{2\eta_{ip}} \tilde{W}_{ip}^{\text{T}} \tilde{W}_{ip} + \frac{1}{2K_o} \tilde{\beta}_i^{\text{T}} \tilde{\beta}_i \right),$$

$$\sum_{i=1}^n \dot{V}_i = \sum_{i=1}^n \left(e_{i1} \dot{e}_{i1} + e_{i2} \dot{e}_{i2} - \frac{1}{\eta_{i\rho}} \tilde{W}_{i\rho}^{\text{T}} \dot{\tilde{W}}_{i\rho} - \frac{1}{\eta_{ip}} \tilde{W}_{ip}^{\text{T}} \dot{\tilde{W}}_{ip} - \frac{1}{K_o} \tilde{\beta}_i^{\text{T}} \dot{\tilde{\beta}}_i \right), \quad (27)$$

其中 $\hat{\Phi}(q_i, \dot{q}_i)$ 简写为 $\hat{\Phi}$. 将式 (22) 代入 (27), 根据假设 2 可以得到

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \dot{V}_i &\leq \sum_{i=1}^n \left[\tilde{W}_{i\rho}^{\text{T}} \left(e_{i2} \hat{\Phi}_{i\rho} - \frac{1}{\eta_{i\rho}} \dot{\tilde{W}}_{i\rho} \right) - k_{i1} e_{i1}^2 - \right. \\ &k_{i2} e_{i2}^2 + e_{i2} w_{i1} - |e_{i2}| \hat{W}_{i\rho}^{\text{T}} \tilde{\Phi}_{i\rho} - \\ &\left. \frac{1}{K_o} \tilde{\beta}_i^{\text{T}} \dot{\tilde{\beta}}_i - e_{i2} \hat{\beta}_i - \frac{1}{\eta_{ip}} \tilde{W}_{ip}^{\text{T}} \dot{\tilde{W}}_{ip} \right] + \\ &\max_{ij} \{d_{ij}\} \sum_{i=1}^n |e_{i2}| \sum_{j=1}^n E_j. \end{aligned} \quad (28)$$

注意到 $|e_{i2}| \leq |e_{j2}| \Leftrightarrow E_i \leq E_j$, 应用 Chebyshev 不等式可得

$$\sum_{i=1}^n |e_{i2}| \sum_{j=1}^n E_j \leq n \sum_{i=1}^n \|e_{i2}\| E_i. \quad (29)$$

将式 (23) 代入 (28), 再综合式 (28) 和 (29), 可得

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \dot{V}_i &\leq \sum_{i=1}^n \left[-k_{i1} e_{i1}^2 - k_{i2} e_{i2}^2 + e_{i2} (w_{i1} + w_{i2}) - \right. \\ &e_{i2} \hat{\beta}_i - \frac{1}{K_o} \tilde{\beta}_i^{\text{T}} \dot{\tilde{\beta}}_i - \frac{1}{\eta_{ip}} \tilde{W}_{ip}^{\text{T}} \dot{\tilde{W}}_{ip} - \\ &|e_{i2}| \hat{W}_{i\rho}^{\text{T}} \tilde{\Phi}_{i\rho} + |e_{i2}| n \max_{ij} \{d_{ij}\} E_i \left. \right] \leq \\ &\sum_{i=1}^n \left[-k_{i1} e_{i1}^2 - k_{i2} e_{i2}^2 + \tilde{\beta}_i^{\text{T}} \left(e_{i2} - \frac{1}{K_o} \dot{\tilde{\beta}}_i \right) + \right. \\ &\left. \tilde{W}_{ip}^{\text{T}} \left(|e_{i2}| \hat{\Phi}_{ip} - \frac{1}{\eta_{ip}} \dot{\tilde{W}}_{ip} \right) \right]. \end{aligned} \quad (30)$$

将式 (24) 和 (25) 代入 (30), 可得

$$\sum_{i=1}^n \dot{V}_i = (-k_{i1}e_{i1}^2 - k_{i2}e_{i2}^2) \leq 0. \quad (31)$$

由此定理1得证. □

4 时延反演分散容错控制

在实际运行中, 可重构模块机械臂不可避免地会发生一些故障, 因此在控制律的设计中, 执行器的容错策略是非常重要的. 执行机构发生故障时的可重构机械臂动力学模型为

$$M_i \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + G_i + F_i + Z_i = \beta_i u_i, \quad (32)$$

其中 β_i 为第 i 个执行器的有效因子, 满足 $0 \leq \beta_i \leq 1$, $i = 1, 2, \dots, N$. 考虑模型参数受不确定性影响, 式(32)可改写为

$$\beta_i u_i = M_{i0} \ddot{q}_i + C_{i0} \dot{q}_i + G_{i0} - (\Delta M_i \ddot{q}_i + \Delta C_i \dot{q}_i + \Delta G_i + F_i) + Z_i. \quad (33)$$

取

$$v_i(t) = M_{i0} \rho_i + \beta_i u_i - u_i - Z_i, \quad (34)$$

则有

$$M_{i0} \ddot{q}_i = -C_{i0} \dot{q}_i - G_{i0} + v_i(t) + u_i. \quad (35)$$

如果选取控制律

$$u_i = u_{id} - v_i(t), \quad (36)$$

其中 u_{id} 为前文得到的理想控制律, 满足式(8), 则容易证明闭环系统是全局渐近稳定的. 然而, 实际过程中 $v_i(t)$ 很难确定, 使得控制律(36)很难应用.

可重构机械臂的变化姿态较慢, 属于慢变系统, 因此采用时延控制技术^[7], 即采用 $v_i(t)$ 的估计值

$$\hat{v}_i(t) = v_i(t - T) = M_{i0} \ddot{q}_i(t - T) + C_{i0} \dot{q}_i(t - T) + G_{i0} - u_i(t - T). \quad (37)$$

利用式(37)替代(36)中的未知函数 $v_i(t)$, 则式(36)可以改写为

$$u_i(t) = u_i(t - T) - M_{i0} \ddot{q}_i(t - T) - C_{i0} \dot{q}_i(t - T) - G_{i0} + u_{id}. \quad (38)$$

由此得到如下结论:

定理2 对于可重构模块机械臂的子系统动力学(1)和(32), 如果选取 T 足够小, 使得

$$\|\dot{q}_i(t) - \dot{q}_i(t - T)\| \ll 1, \quad (39)$$

则由式(1), (32)和(39)构成的闭环系统的稳定条件需满足 $M_{i0}^{-1} \beta_i M_{i0}$ 非奇异, 且有如下不等式成立:

$$\|I - M_{i0}^{-1} \beta_i M_{i0}\| < 1. \quad (40)$$

证明 为了证明系统的稳定性, 忽略模型参数不确定性和各个子系统之间的相互影响. 考虑标称系统

$$\ddot{q}_i = M_{i0}^{-1} (-C_{i0} \dot{q}_i - G_{i0}) + M_{i0}^{-1} \beta_i u_i. \quad (41)$$

相应地, 有

$$M_{i0}^{-1} \beta_i u_i(t - T) = \ddot{q}_i(t - T) + M_{i0}^{-1} C_{i0} \dot{q}_i(t - T) + M_{i0}^{-1} G_{i0}. \quad (42)$$

将式(39)和(42)代入(41), 可得

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i - \ddot{q}_i(t - T) = & -M_{i0}^{-1} \beta_i M_{i0} \ddot{q}_i(t - T) + M_{i0}^{-1} \beta_i u_{di} - \\ & M_{i0}^{-1} \beta_i C_{i0} \dot{q}_i(t - T) - M_{i0}^{-1} \beta_i G_{i0}. \end{aligned} \quad (43)$$

本文选取 T 足够小, 且满足式(39), 则有

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i(t) - \ddot{q}_i(t - T) = & (\ddot{q}_i(t - T) - \ddot{q}_i(t - 2T))(I - M_{i0}^{-1} \beta_i M_{i0}). \end{aligned} \quad (44)$$

根据定理2, 若约束条件(40)成立, 则有 $\ddot{q}_i(t) \rightarrow \ddot{q}_i(t - T)$, 能够得到

$$\underbrace{\ddot{q}_i(t) - \ddot{q}_i(t - T)}_{\approx 0} = -M_{i0}^{-1} \beta_i (-u_{di} + M_{i0} \ddot{q}_i(t - T) + C_{i0} \dot{q}_i(t - T) + G_{i0}). \quad (45)$$

由此, 定理2得证. □

5 数值仿真

为了验证本文所提出方法的有效性, 将其应用于图1所示的两个不同构形的二自由度可重构模块机器人当中. 模块参数和动力学建模过程参见文献[8].

构形 a 的期望轨迹为

$$\begin{aligned} q_1^d &= 0.5 \cos(t) - 0.2 \sin(3t), \\ q_2^d &= 0.3 \cos(3t) - 0.5 \sin(2t). \end{aligned}$$

构形 b 的期望轨迹为

$$\begin{aligned} q_1^d &= 0.2 \sin(3t) + 0.1 \cos(4t), \\ q_2^d &= 0.3 \sin(2t) + 0.2 \cos(t). \end{aligned}$$

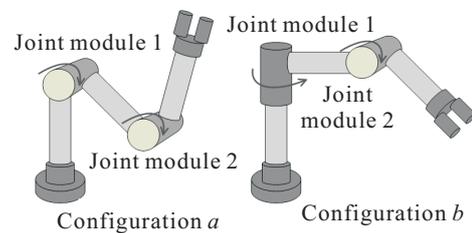


图1 仿真构形

在仿真过程中, 取 $\Delta M, \Delta C, \Delta G$ 的变化量为名义值的20%. 两种构形的初始位置设置为 $q_1(0) = q_2(0) = 2$, 初始速度设置为 $\dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0) = 0$. 采用神经网络控制补偿不确定项和关联项, 控制器参数和自适应参数分别取 $k_{i1} = [9, 9]$, $k_{i2} = [30, 40]$, $\eta_{ip} = 10$, $\eta_{ip} = 25$, $K_o = 1000$, $f = 0.01$. 高斯基函数的中心值和宽度值分别取

$$c_\rho = \begin{bmatrix} -3 & -2 & -1 & 0 & 1 & 2 & 3 \\ -3 & -2 & -1 & 0 & 1 & 2 & 3 \end{bmatrix},$$

$$c_p = [0 \ 0.5 \ 1 \ 1.5 \ 2 \ 2.5 \ 3], \quad b = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1].$$

当执行机构发生故障时, 控制器采用反演技术结合时延控制的方法进行控制, 控制算法为式(39), 控制器参数进行如下适当的调整:

$$k_{i1} = [15, 15], k_{i2} = [20, 30].$$

图2~图5分别为构型a和构型b的跟踪轨迹. 仿真结果表明, 本文所提出的控制方法能够很好地实现

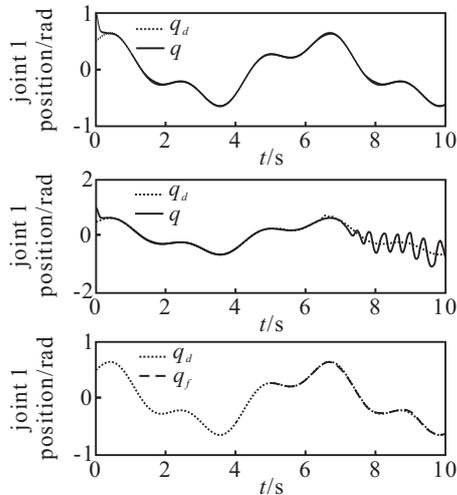


图2 构型a中关节1的跟踪轨迹

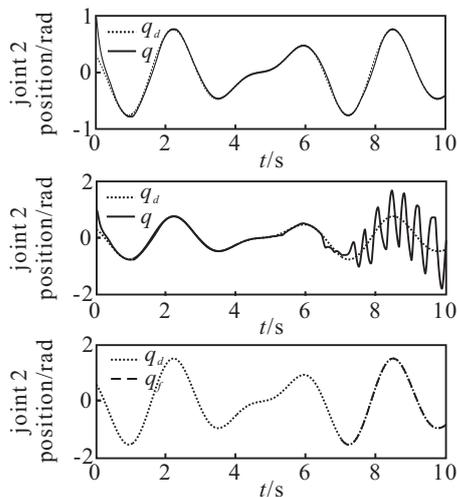


图3 构型a中关节2的跟踪轨迹

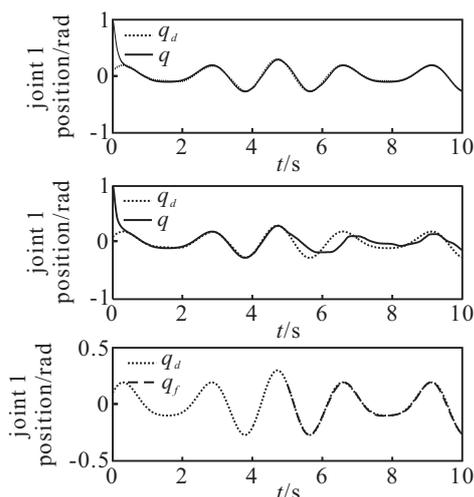


图4 构型b中关节1的跟踪轨迹

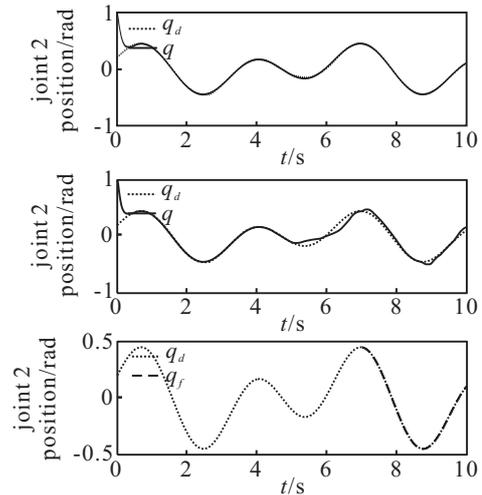


图5 构型b中关节2的跟踪轨迹

容错控制, 并可以在不修改任何控制参数的情况下实现对不同机械臂构型的控制.

6 结 论

针对执行器部分失效故障, 提出了一种适用于不同可重构机械臂构型的分散容错控制方案, 其控制器由反演神经网络控制器和时延控制器组成. 这种容错控制不需要进行故障的实时在线估计, 避免了常规容错控制系统发生故障误诊断的可能性. 此外, 控制器中加入了神经网络控制, 提高了控制律对于参数不确定性和关联项的自适应能力, 控制器中自适应参数的更新基于Lyapunov稳定性理论设计, 可以保证整个系统的稳定性和轨迹跟踪性能. 最后, 利用两个不同构型的二自由度可重构机械臂验证了所提出的分散容错控制方案的可行性.

参考文献(References)

- [1] Vemuri A T, Polycarpou M M, Diakourts S A. Neural network based fault detection in robotic manipulators[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1998, 14(2): 12-24.
- [2] Song Q, Hu W J, Yin L, Soh Y C. Robust adaptive dead zone technology for fault-tolerant control of robot manipulators using neural networks[J]. J of Intelligent and Robotic Systems, 2002, 33(2): 113-137.
- [3] Boškovic J D, Lis M, Mehra R K. Intelligent control of spacecraft in the presence of actuator failures[C]. Proc of the 38th IEEE Conf on Decision & Control. Phoenix, 1999, 5: 4472-4477.
- [4] 朱明超, 李元春. 可重构模块机器人分散容错控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(8): 1247-1251.
(Zhu M C, Li Y C. Decentralized fault tolerant control for reconfigurable modular robots[J]. Control and Decision, 2009, 24(8): 1247-1251.)