

## 考虑多传感器故障的可重构机械臂主动取代分散容错控制

赵博<sup>1</sup>, 李元春<sup>1a, 2</sup>

(1. 吉林大学 a. 汽车仿真与控制国家重点实验室, b. 控制科学与工程系, 长春 130022; 2. 长春工业大学 控制工程系, 长春 130012)

**摘要:** 针对可重构机械臂系统位置传感器和速度传感器多故障, 提出一种主动取代分散容错控制方法. 基于可重构机械臂的模块化属性, 设计正常工作模式下的分散神经网络控制器. 利用微分同胚原理将子系统结构进行非线性变换, 将传感器故障转化成伪执行器故障, 设计分散滑模观测器以对多传感器故障进行实时检测, 并利用其输出信号取代故障传感器信号, 实现了多传感器故障情形下可重构机械臂的主动容错控制. 仿真结果表明了所设计的容错控制方法的有效性.

**关键词:** 可重构机械臂; 多传感器故障; 分散滑模观测器; 分散容错控制; 主动取代  
**中图分类号:** TP24 **文献标志码:** A

## Active substituting decentralized fault-tolerant control for reconfigurable manipulators with multi-sensor failures

ZHAO Bo<sup>1</sup>, LI Yuan-chun<sup>1a, 2</sup>

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

**Abstract:** An active substituting decentralized fault tolerant control scheme is established for reconfigurable manipulators with position and velocity multi-sensor failures. A decentralized neural network controller is presented at the normal working state based on the reconfigurable manipulators' modularity property. The sensor fault is transformed into the pseudo-actuator fault scenario by constructing a nonlinear transformation for subsystem structure with diffeomorphism theory, and decentralized sliding mode observers are designed for detecting multi-sensor failures in real time, then the fault signals are substituted with the output of the observers to realize active fault-tolerant control for reconfigurable manipulators under the multi-sensor fault state. Simulation results show the effectiveness of the proposed scheme.

**Key words:** reconfigurable manipulators; multi-sensor failures; decentralized sliding mode observer; decentralized fault-tolerant control; active substituting

### 0 引言

可重构机械臂系统<sup>[1]</sup>因其模块化的特点, 越来越多地应用于航空航天、敏捷制造、高危作业以及军事战场等人类无法完成的环境中. 长时间地工作在未知、恶劣的环境中, 对可重构机械臂系统的可靠性和安全性提出了更高的要求. 如果不能及时处理执行器、传感器及其他部件发生的故障, 该系统会以不可预知的方式工作, 甚至导致灾难性的后果, 因此进行故障诊断与容错控制已成为亟需研究的课题.

许多学者对传感器故障诊断与容错控制问题进

行了深入研究, 相继提出了若干容错控制方法, 这些方法大致可分为3类: 1) 信息冗余容错控制的方法. 如Romero等<sup>[2]</sup>将3组传感器-观测器中的最小估计误差应用于矢量控制中, 提出了多传感器切换策略实现容错控制; 曹祥宇等<sup>[3]</sup>利用姿态角和角速率信号功能上的冗余, 以重构信号代替故障信号实现了系统的主动容错控制. 2) 控制律重构容错控制方法. 如Yu等<sup>[4]</sup>通过估计误差检测变形仪传感器故障, 并利用估计值代替故障信号, 转换成容错模式的控制器以保证控制性能; Abbas等<sup>[5]</sup>利用滑模观测器得到残差, 当检测

收稿日期: 2012-10-23; 修回日期: 2013-04-16.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61374051, 60974010); 吉林省科技发展计划项目(20110705).

作者简介: 赵博(1987-), 男, 博士生, 从事可重构机械臂故障诊断与容错控制的研究; 李元春(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模、智能机械与机器人控制等研究.

到故障后将故障传感器隔离, 利用估计值代替故障值; Niemann<sup>[6]</sup>基于广义控制律参数化方法将故障检测与隔离部分和控制律重构部分有效结合. 3) 鲁棒容错控制方法. 如何静等<sup>[7]</sup>针对一类含有未知输入扰动的不确定非线性系统提出一种鲁棒故障重构方案; Huang等<sup>[8]</sup>通过引入故障矩阵, 调节PID误差反馈控制器使系统达到鲁棒稳定, 从而达到容错控制目的; 肖民卿<sup>[9]</sup>运用LMI方法及故障模型的结构信息, 得到Delta算子系统鲁棒稳定可靠控制器的存在条件; 陶洪峰等<sup>[10]</sup>将传感器故障阵归一化, 给出了鲁棒容错控制器存在的时滞相关性充分条件, 以保证闭环系统在传感器故障时稳定.

从目前国内外研究现状看, 大多针对单一传感器故障进行检测以及被动容错控制. 本文针对可重构机械臂的模块化属性, 设计针对多传感器故障的主动取代分散容错控制系统. 传感器工作在正常模式时, 采用分散神经网络控制系统逼近及补偿子系统非线性项, 利用微分同胚原理对子系统结构进行非线性变换, 将传感器故障转化为伪执行器故障, 基于Lyapunov稳定性理论设计分散滑模观测器以在线检测多传感器故障; 当传感器出现故障时, 采用分散滑模观测器的输出代替故障信号, 实现多传感器故障的容错控制. 此方法独立于故障信息, 符合模块化的设计思想, 并且不需要重新设计容错控制律.

## 1 问题描述

根据Newton-Euler方程得到的 $n$ 自由度可重构机械臂的动力学模型为<sup>[11]</sup>

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = u. \quad (1)$$

其中:  $q \in R^n$  为关节位置向量,  $M(q) \in R^{n \times n}$  为惯性矩阵,  $C(q, \dot{q}) \in R^n$  为哥氏力和离心力项,  $G(q) \in R^n$  为重力项,  $u \in R^n$  为关节力矩向量. 将模型(1)分解为

$$\sum_{j=1}^n M_{ij}(q)\ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n C_{ij}(q, \dot{q})\dot{q}_j + \bar{G}_i(q) = u_i. \quad (2)$$

其中:  $q_i$ 、 $\dot{q}_i$ 、 $\ddot{q}_i$ 、 $\bar{G}_i(q)$  和  $u_i$  分别为向量  $q$ 、 $\dot{q}$ 、 $\ddot{q}$ 、 $G(q)$  和  $u$  的第  $i$  个分量,  $M_{ij}(q)$  和  $C_{ij}(q, \dot{q})$  分别为矩阵  $M(q)$  和  $C(q, \dot{q})$  的第  $ij$  个分量.

将可重构机械臂的每个关节考虑为一个子系统, 从式(2)分离出局部变量  $(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i)$ , 则子系统的动力学模型可描述为

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + G_i(q_i) + Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = u_i, \quad (3)$$

$$Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) =$$

$$\left\{ \sum_{j=1, j \neq i}^n M_{ij}(q)\ddot{q}_j + [M_{ii}(q) - M_i(q_i)]\ddot{q}_i \right\} +$$

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

其中  $Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) \in R$  为子系统交联项.

设  $x_i = [x_{i1} \ x_{i2}]^T = [q_i \ \dot{q}_i]^T (i = 1, 2, \dots, n)$ , 则式(3)可以表示为如下状态空间方程:

$$S_i : \begin{cases} \dot{x}_i = A_i x_i + B_i [f_i(q_i, \dot{q}_i) + g_i(q_i)u_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})], \\ y_i = C_i x_i. \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $x_i$  和  $y_i$  分别为子系统  $S_i$  的状态向量和输出, 且

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$f_i(q_i, \dot{q}_i) = M_i^{-1}(q_i)[-C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i - G_i(q_i)],$$

$$g_i(q_i) = M_i^{-1}(q_i),$$

$$h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = -M_i^{-1}(q_i)Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}).$$

当子系统位置传感器或速度传感器发生故障时, 故障子系统的动力学模型为

$$S_{if} : \begin{cases} \dot{x}_i = A_i x_i + B_i [f_i(q_i, \dot{q}_i) + g_i(q_i)u_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})], \\ y_i = C_i x_i + D_i f_{si}. \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $D_i = \text{diag}(1, 1)$  为第  $i$  个关节模块传感器故障分布矩阵;  $f_{si} = [f_{si1} \ f_{si2}]^T$  为第  $i$  个关节模块的传感器故障函数矩阵, 且满足  $\|f_{si}(t)\| \leq \rho_i(t)$ ,  $\rho_i(t)$  为已知连续函数. 假设  $f_{si}(t)$  未知, 在  $t \in R^+$  中有定义.

本文的控制目标是: 针对子系统模型(5)设计主动取代分散容错控制器, 使可重构机械臂关节模块传感器发生故障时关节位置和速度跟踪期望轨迹.

## 2 控制器及观测器设计

### 2.1 分散神经网络控制器设计

利用李代数方法进行非线性变换<sup>[12]</sup>, 将传感器故障转化为“伪”执行器故障, 则对于子系统(3)和(4), 有

$$\begin{aligned} \dot{z}_{i1} &= \frac{\partial x_{i1}}{\partial x_i} x_{i2} = L_{x_{i2}} x_{i2} = z_{i2}, \\ \dot{z}_{i2} &= \frac{\partial z_{i2}}{\partial x_i} (f_i(q_i, \dot{q}_i) + g_i(q_i)u_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})) = \\ &L_{f_i(q_i, \dot{q}_i) + g_i(q_i)u_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})} z_{i2} = \\ &f_i(q_i, \dot{q}_i) + g_i(q_i)u_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}). \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)可表达为

$$\dot{z}_i = A_i z_i + B_i [f_i(q_i, \dot{q}_i) + g_i(q_i)u_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})]. \quad (7)$$

下面针对传感器正常工作模式下的可重构机械臂进行分散神经网络控制器设计.

**假设 1** 期望轨迹  $y_{ir}$ ,  $\dot{y}_{ir}$  和  $\ddot{y}_{ir}$  有界.

利用RBF神经网络对系统未知项  $f_i(q_i, \dot{q}_i)$  和不

确定项  $g_i(q_i)$  进行估计, 有

$$f_i(q_i, \dot{q}_i, W_{if}) = W_{if}^T \Phi_{if}(q_i, \dot{q}_i) + \varepsilon_{if}, \|\varepsilon_{if}\| \leq \varepsilon_1; \quad (8)$$

$$g_i(q_i, W_{ig}) = W_{ig}^T \Phi_{ig}(q_i) + \varepsilon_{ig}, \|\varepsilon_{ig}\| \leq \varepsilon_2. \quad (9)$$

其中:  $W_{if}$  和  $W_{ig}$  为理想神经网络权值,  $\Phi(\cdot)$  为神经网络基函数,  $\varepsilon_{if}$  和  $\varepsilon_{ig}$  为神经网络估计误差,  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  为已知正常数.

定义  $\hat{W}_{if}$  和  $\hat{W}_{ig}$  分别为  $W_{if}$  和  $W_{ig}$  的估计值,  $\hat{f}_i(q_i, \dot{q}_i, \hat{W}_{if})$  和  $\hat{g}_i(q_i, \hat{W}_{ig})$  分别为  $f_i(q_i, \dot{q}_i)$  和  $g_i(q_i)$  的估计值, 并可表示为

$$\hat{f}_i(q_i, \dot{q}_i, \hat{W}_{if}) = \hat{W}_{if}^T \hat{\Phi}_{if}(q_i, \dot{q}_i), \quad (10)$$

$$\hat{g}_i(q_i, \hat{W}_{ig}) = \hat{W}_{ig}^T \hat{\Phi}_{ig}(q_i). \quad (11)$$

定义估计误差  $\tilde{W}_{if} = W_{if} - \hat{W}_{if}$ ,  $\tilde{W}_{ig} = W_{ig} - \hat{W}_{ig}$ , 则有

$$f_i(q_i, \dot{q}_i, W_{if}) - \hat{f}_i(q_i, \dot{q}_i, \hat{W}_{if}) = \tilde{W}_{if}^T \hat{\Phi}_{if}(q_i, \dot{q}_i) + W_{if}^T \tilde{\Phi}_{if}(q_i, \dot{q}_i) + \varepsilon_{if}, \quad (12)$$

$$g_i(q_i, W_{ig}) - \hat{g}_i(q_i, \hat{W}_{ig}) = \tilde{W}_{ig}^T \hat{\Phi}_{ig}(q_i) + W_{ig}^T \tilde{\Phi}_{ig}(q_i) + \varepsilon_{ig}. \quad (13)$$

其中 RBF 神经网络基函数输出误差  $\tilde{\Phi}(\cdot)$  为

$$\tilde{\Phi}_{if}(q_i, \dot{q}_i) = \Phi_{if}(q_i, \dot{q}_i) - \hat{\Phi}_{if}(q_i, \dot{q}_i), \quad (14)$$

$$\tilde{\Phi}_{ig}(q_i) = \Phi_{ig}(q_i) - \hat{\Phi}_{ig}(q_i). \quad (15)$$

**假设 2** 交联项  $h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})$  有界且满足<sup>[13]</sup>

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

其中:  $d_{ij} \geq 0$ ,  $E_j = 1 + |e_j^T P_j B_j| + |e_j^T P_j B_j|^2$ , 并定义  $p_i(|e_i^T P_i B_i|) = n \max_j \{d_{ij}\} E_j$ .

利用如下神经网络补偿系统交联项影响:

$$\hat{p}_i(|e_i^T P_i B_i|, \hat{W}_{ip}) = \hat{W}_{ip}^T \hat{\Phi}_{ip}(|e_i^T P_i B_i|). \quad (17)$$

其中:  $\hat{W}_{ip}^T$  为  $W_{ip}^T$  的估计,  $\tilde{W}_{ip}^T = W_{ip}^T - \hat{W}_{ip}^T$  为权值估计误差, 并定义估计误差为

$$w_{i1} = W_{if}^T \tilde{\Phi}_{if}(q_i, \dot{q}_i) + W_{ig}^T \tilde{\Phi}_{ig}(q_i) u_i + \varepsilon_{if} + \varepsilon_{ig} u_i, \quad (18)$$

$$w_{i2} = p_i(|e_i^T P_i B_i|) - W_{ip}^T \hat{\Phi}_{ip}(|e_i^T P_i B_i|), \quad (19)$$

$$w_i = |w_{i1}| + |w_{i2}|. \quad (20)$$

设计子系统神经网络控制律为

$$u_i = -\frac{[\hat{f}_i(q_i, \dot{q}_i, \hat{W}_{if}) + \text{sgn}(e_i^T P_i B_i) \hat{p}_i - \ddot{y}_{ir}]}{\hat{g}_i(q_i, \hat{W}_{ig})}. \quad (21)$$

其中自适应更新律为

$$\dot{\hat{W}}_{if} = \Gamma_{if} e_j^T P_j B_j \hat{\Phi}_{if}(q_i, \dot{q}_i), \quad (22)$$

$$\dot{\hat{W}}_{ig} = \Gamma_{ig} e_j^T P_j B_j \hat{\Phi}_{ig}(q_i) u_i, \quad (23)$$

$$\dot{\hat{W}}_{ip} = \Gamma_{ip} |e_j^T P_j B_j| \hat{\Phi}_{ip}(|e_j^T P_j B_j|), \quad (24)$$

这里  $\Gamma_{if}$ 、 $\Gamma_{ig}$ 、 $\Gamma_{ip}$  均为正常数.

## 2.2 分散滑模观测器设计

本节设计分散滑模观测器以检测可重构机械臂子系统各传感器是否发生故障.

引入一阶滤波器

$$\dot{z}_{ai} = A_{ai} z_{ai} + B_{ai} y_i, \quad (25)$$

其中  $z_{ai} = [z_{ai1} \ z_{ai2}]^T$ .

令  $A_{ai} = \text{diag}(-1, -1)$ ,  $B_{ai} = \text{diag}(1, 1)$ , 则扩展后的子系统动力学方程为

$$\bar{S}_{if} : \begin{cases} \dot{z}_i = A_i z_i + B_i [f_i(q_i, \dot{q}_i) + g_i(q_i) u_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})], \\ \dot{z}_{ai} = A_{ai} z_{ai} + B_{ai} (C_i x_i + D_i f_{si}), \\ y_a = z_{ai}. \end{cases} \quad (26)$$

分散滑模观测器设计为

$$\hat{S}_{if} : \begin{cases} \dot{\hat{z}}_i = A_i \hat{z}_i + B_i [\hat{f}_i(q_i, \dot{q}_i) + \hat{g}_i(q_i) u_i + \hat{p}_i(|e_i^T P_i B_i|, \hat{W}_{ip})], \\ \dot{\hat{z}}_{ai} = A_{ai} \hat{z}_{ai} + B_{ai} (C_i x_i + v_i), \\ \hat{y}_a = \hat{z}_{ai}. \end{cases} \quad (27)$$

其中

$$v_i = -k_i \frac{y_a - \hat{y}_a}{\|y_a - \hat{y}_a\|}, \quad (28)$$

$\hat{f}_i(q_i, \dot{q}_i)$ ,  $\hat{g}_i(q_i)$  和  $\hat{p}_i(|e_i^T P_i B_i|, \hat{W}_{ip})$  由神经网络估计值得到.

## 2.3 稳定性分析

令

$$\begin{cases} e_i = z_i - \hat{z}_i, \\ e_{ai} = z_{ai} - \hat{z}_{ai}, \end{cases} \quad (29)$$

则子系统误差方程为

$$\begin{cases} \dot{e}_i = A_i e_i + B_i [f_i - \hat{f}_i + (g_i - \hat{g}_i) u_i + h_i - \hat{p}_i], \\ \dot{e}_{ai} = A_{ai} e_{ai} + B_{ai} (C_i e_i + D_i f_{si} - v_i). \end{cases} \quad (30)$$

选取 Lyapunov 函数

$$V_i = e_i^T P_i e_i + \tilde{W}_{if}^T \Gamma_{if}^{-1} \tilde{W}_{if} + \tilde{W}_{ig}^T \Gamma_{ig}^{-1} \tilde{W}_{ig} + \tilde{W}_{ip}^T \Gamma_{ip}^{-1} \tilde{W}_{ip}, \quad (31)$$

其对时间的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= \dot{e}_i^T P_i e_i + e_i^T P_i \dot{e}_i - \tilde{W}_{if}^T \Gamma_{if}^{-1} \dot{\tilde{W}}_{if} - \tilde{W}_{ig}^T \Gamma_{ig}^{-1} \dot{\tilde{W}}_{ig} - \tilde{W}_{ip}^T \Gamma_{ip}^{-1} \dot{\tilde{W}}_{ip} \leq \\ &e_i^T (A_i^T P_i + P_i A_i) e_i + \varepsilon_i^2 u_i^2 + \frac{1}{\varepsilon_i} (e_i^T P_i B_i)^T e_i^T P_i B_i. \end{aligned} \quad (32)$$

**假设 3** 估计误差的范数满足  $\|w_i\| \leq L_i(u_i) \times \|e_i\|$ . 根据 Young's 不等式, 满足 Riccati 方程

$$A_i^T P_i + P_i A_i + \frac{1}{\varepsilon_i} P_i B_i B_i^T P_i + \varepsilon_i^2 L_i^2(u_i) < 0. \quad (33)$$

此时系统 Lyapunov 方程

$$\dot{V}_i \leq e_i^T (A_i^T P_i + P_i A_i) e_i +$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\varepsilon_i} (e_i^T P_i B_i)^T e_i^T P_i B_i + \varepsilon_i^2 L_i^2(u_i) e_i^2 = \\ & e_i^T \left( A_i^T P_i + P_i A_i + \frac{1}{\varepsilon_i} P_i B_i B_i^T P_i + \right. \\ & \left. \varepsilon_i^2 L_i^2(u_i) \right) e_i \leq 0. \end{aligned} \quad (34)$$

**假设4** 子系统观测误差有界且  $\|e_i\| \leq b_i$ .

定义滑模面

$$s_i = \{ \text{col}(e_i, e_{ai}) | e_{ai} = 0 \}, \quad (35)$$

选取 Lyapunov 函数

$$V_{ai} = e_{ai}^T e_{ai}, \quad (36)$$

式(36)对时间的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ai} &= \dot{e}_{ai}^T e_{ai} + e_{ai}^T \dot{e}_{ai} = \\ & -2\|e_{ai}\|^2 + 2e_{ai}^T (C_i e_i + D_i f_{si} - v_i) \leq \\ & -2\|e_{ai}\|^2 + 2\|e_{ai}\|(b_i + \rho_i - k_i). \end{aligned} \quad (37)$$

**定义1** 若令  $k_i$  满足下式:

$$k_i \geq b_i + \rho_i + \eta_i, \quad (38)$$

其中  $\eta_i > 0$  为常数, 且假设4成立, 则子系统误差方程(30)可到达式(35)的滑模面, 并且有

$$\dot{V}_{ai} \leq -2\|e_{ai}\|^2 - 2\|e_{ai}\|\eta_i \leq 0. \quad (39)$$

根据 Barbalat 引理, 由式(34)和(39)可知, 分散滑模观测器是渐近稳定的.

### 2.4 分散主动容错控制策略

分散主动容错控制系统包括故障诊断、取代控制、反馈控制3个部分. 其策略为: 在正常情况下, 将各子系统位置传感器和速度传感器的输出信号作为可重构机械臂分散控制系统的反馈信号进行闭环控制, 同时采用基于分散滑模观测器的故障诊断子系统进行多传感器在线故障诊断; 当观测误差大于预先设定的阈值时, 可判断传感器发生故障, 立即利用该子系统相应传感器的观测器输出信号取代故障信号进行主动容错控制.

### 3 数值仿真

为了验证所设计主动取代分散容错控制器的有效性, 本文沿用文献[14]图1所示的两种不同的二自由度可重构机械臂构形以及动力学模型进行仿真研究, 且期望轨迹和初值选取不变.

对于构形a, 仿真采用神经网络控制补偿不确定项和关联项, 并且控制器参数和自适应参数分别取  $\Gamma_{if} = 0.0002$ ,  $\Gamma_{ig} = 0.0002$ ,  $\Gamma_{ip} = 6000$ ,  $\varepsilon_i = 0.0001$ ,  $\sigma_i = 0.0003$ ,  $k_i = 2$ ,  $f = 0.01$ . 在可重构机械臂系统跟踪性能稳定后, 分别在  $t = 6\text{s}$  和  $t = 8\text{s}$  时对关节2的位置传感器和关节1的速度传感器加入故障. 下面利用分散滑模观测器对关节模块位置和速度信息进行实时观测, 图1所示为观测误差.

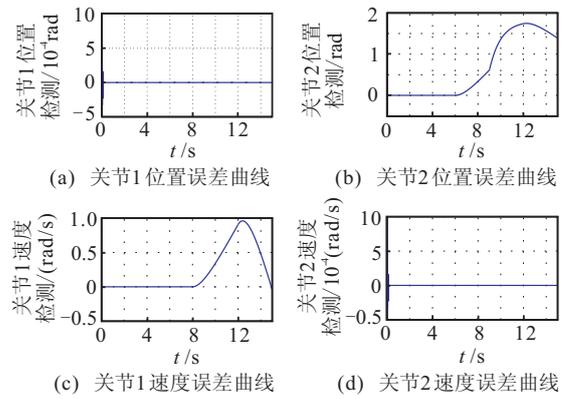


图1 多传感器故障观测误差(构型a)

从图1可以判断出, 关节1的位置传感器和关节2的速度传感器观测误差始终接近于零, 说明在此过程中二者均未发生故障; 而关节2的位置传感器和关节1的速度传感器的观测误差分别在  $t = 6\text{s}$  和  $t = 8\text{s}$  时超出给定阈值, 说明所设计的分散滑模观测器可以实时地检测出传感器故障, 且一个关节发生故障不会影响其他关节的控制性能.

图2为应用所设计的主动取代分散容错控制后各关节模块位置和速度轨迹跟踪曲线. 可以看出, 实际曲线能够精确地跟踪期望轨迹.

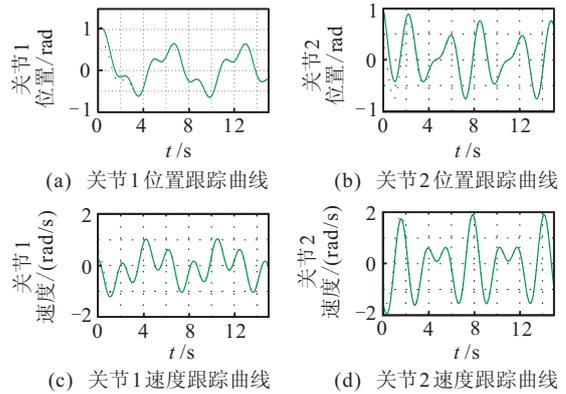


图2 容错控制后轨迹跟踪曲线(构型a)

为了验证所设计的方法在不需要改变控制参数的条件下对不同构形的可重构机械臂仍然有效, 下面针对构形b进行相同的仿真.

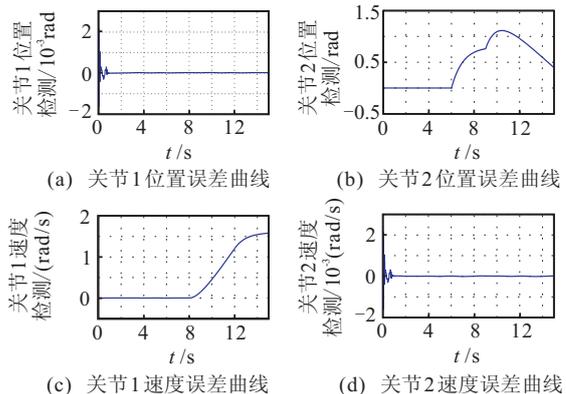


图3 多传感器故障观测误差(构型b)

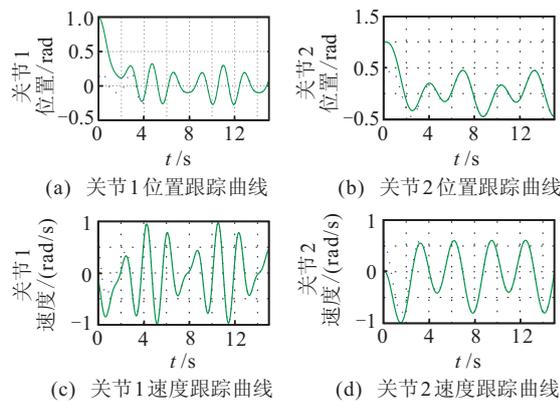


图4 容错控制后轨迹跟踪曲线(构型b)

从图3和图4曲线中可以得到与构型a相同的结论. 因此从上述仿真结果可知, 在不改变控制参数的条件下, 本文所设计的基于分散滑模观测器的多传感器故障主动容错控制是有效的. 相比于文献[11]所提出的方法, 本文方法不需要在故障发生之前进行容错设计.

## 4 结论

本文基于可重构机械臂模块化的特点, 针对每个关节模块设计分散滑模观测器, 对其多传感器故障进行检测, 并利用其输出信号代替故障传感器信号, 达到主动容错控制的目的. 利用神经网络对非线性函数高度的拟合能力, 对可重构机械臂子系统的非线性项进行逼近, 并且补偿子系统之间交联项的影响, 设计了正常工作状态下子系统控制律. 采用微分同胚原理对子系统结构进行非线性变换, 引入一阶滤波器将传感器故障转化成伪执行器故障, 设计分散滑模观测器以确定故障发生的位置和时间, 并利用观测器的输出取代故障传感器信号以实现主动容错控制. 仿真结果表明, 无论位置传感器还是速度传感器发生故障, 所设计的方法都能保证可重构机械臂关节运动精确跟踪期望轨迹.

## 参考文献(References)

[1] Paredis C J J, Brown H B, Khosla P K. Rapidly deployable manipulator system[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1997, 21(3): 289-304.

[2] Romero M E, Seron M M, De Dona J A. Sensor fault-tolerant vector control of induction motors[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2010, 4(9): 1707-1724.

[3] 曹祥宇, 胡昌华, 马清亮. 考虑传感器故障的导弹姿态控制系统主动容错控制研究[J]. *控制与决策*, 2012, 27(3): 379-382.  
(Cao X Y, Hu C H, Ma Q L. Research on active fault-tolerant control for sensor failures of missile attitude control systems[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(3): 379-382.)

[4] Yu Izumikawa, Kazuhiro Yubai, Junji Hirai. Fault-tolerant control system of flexible arm for sensor fault by using reaction force observer[J]. *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 2005, 10(4): 391-396.

[5] Abbas Chamseddine, Hassan Noura, Mustapha Ouladsine. Sensor fault detection, identification and fault tolerant control: Application to active suspension[C]. *Proc of the 2006 American Control Conf. Minneapolis*, 2006: 2351-2356.

[6] Niemann Hans Henrik. A model-based approach to fault-tolerant control[J]. *Int J of Applied Mathematics and Computer Science*, 2012, 22(1): 67-86.

[7] 何静, 邱静, 张昌凡. 基于微分同胚变换的故障重构算法[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(4): 481-487.  
(He J, Qiu J, Zhang C F. Fault reconstruction based on global diffeomorphic coordination transformation[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(4): 481-487.)

[8] Huang S T C, Davison E J, Kwong R H. Decentralized robust servomechanism problem for large flexible space structures under sensor and actuator failures[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2012, 57(12): 3219-3224.

[9] 肖民卿. 传感器有故障的Delta算子线性不确定系统的鲁棒D-稳定[J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(2): 183-185.  
(Xiao M Q. Robust D-stabilization for Delta operator systems with sensor failure[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(2): 183-185.)

[10] 陶洪峰, 胡寿松. 多故障并发不确定系统的鲁棒完整性容错控制[J]. *化工学报*, 2010, 61(8): 2002-2007.  
(Tao H F, Hu S S. Robust tolerant control possessing integrity for uncertain systems with concurrent faults[J]. *CIESC J*, 2010, 61(8): 2002-2007.)

[11] 李元春, 陆鹏, 赵博. 可重构机械臂反演时延分散容错控制[J]. *控制与决策*, 2012, 27(3): 446-450.  
(Li Y C, Lu P, Zhao B. Backstepping time delay decentralized fault-tolerant control for reconfigurable manipulators[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(3): 446-450.)

[12] Murray Richard, Li Zexiang, Sastry S Shankar. A mathematical introduction to robotic manipulation[M]. Boca Raton: CRC Press, 1994: 406-408.

[13] Mingchao Zhu, Yuanchun Li. Decentralized adaptive fuzzy sliding mode control for reconfigurable modular manipulators[J]. *Int J of Robust Nonlinear Control*, 2010, 20: 472-488.

[14] Bo Zhao, Zhiqian Wang, Yanfeng Qiao, et al. A combined backstepping terminal sliding mode algorithm based decentralized control scheme for reconfigurable manipulators[M]. *Advanced in Reconfigurable Mechanisms and Robot I*. London: Springer, 2012: 657-668.