

# 基于故障在线估计的可重构机械臂分散容错控制

赵 博<sup>1,3</sup>, 李成浩<sup>2,3</sup>, 李元春<sup>1,3</sup>

(1. 长春工业大学 电气与电子工程学院, 长春 130012; 2. 一汽轿车股份有限公司 产品部, 长春 130012;  
3. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130022)

**摘要:**为了降低可重构机械臂模块关节执行器和传感器故障对其控制性能的影响,提出了一种基于故障在线估计的分散容错控制方法。基于可重构机械臂的模块化属性和 Lyapunov 稳定性理论,设计了分散自适应滑模观测器以实现执行器和传感器故障的在线自适应估计。同时采用神经网络对子系统非线性项进行逼近和补偿,并结合非奇异快速 Terminal 滑模思想实现了分散容错控制。最后,采用两种不同构形的三自由度可重构机械臂进行了仿真试验,结果表明,所设计的容错控制方法是有效的。

**关键词:**自动控制技术;可重构机械臂;故障在线估计;分散滑模观测器;容错控制

**中图分类号:**TP24    **文献标志码:**A    **文章编号:**1671-5497(2014)06-1729-07

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb201406030

## Online fault estimation based on decentralized fault-tolerant control for reconfigurable manipulators

ZHAO Bo<sup>1,3</sup>, LI Cheng-hao<sup>2,3</sup>, LI Yuan-chun<sup>1,3</sup>

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China; 2. Product Development Department, FAW Car Co., Ltd, Changchun 130012, China; 3. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** To reduce the influence of module joint actuator and sensor failure on the controllability of the reconfigurable manipulator, an online fault estimation method based on the decentralized fault-tolerant control scheme was proposed. Based on the modularized property of the manipulator and Lyapunov stability theory, a decentralized adaptive sliding mode observer is constructed to estimate the actuator and sensor faults adaptively. Meanwhile, the nonlinear terms are approximated or compensated by neural networks. Then, the idea of non-singular fast terminal mode control was employed to achieve decentralized fault-tolerant control. Finally, numerical simulation was carried out for two 3-DOF reconfigurable manipulators with different configurations. The results demonstrate the effectiveness of the proposed fault-tolerant control scheme.

**Key words:** automatic control technique; reconfigurable manipulators; online fault estimation; decentralized adaptive sliding mode observer; fault tolerant control

收稿日期:2013-07-04.

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

作者简介:赵博(1987-),男,博士研究生.研究方向:智能机械与机器人控制. E-mail:zhaob09@mails.jlu.edu.cn

通信作者:李元春(1962-),男,教授,博士生导师.研究方向:智能机械与机器人控制. E-mail:liyc@mail.ccut.edu.cn

## 0 引言

可重构机械臂<sup>[1]</sup>因其易于对模块进行增减和互换,在航空航天、精密制造、高危作业以及军事战场等复杂环境中有着广泛的应用前景。长时间的工作会导致执行器和传感器不可避免地发生故障,若得不到及时处理,可重构机械臂会以不可预知的方式运行,给生产生活甚至生命安全带来巨大危害,因此亟需针对其进行故障诊断和容错控制的研究。目前,针对此问题,解决方法主要有基于解析模型<sup>[2-4]</sup>、基于信号处理<sup>[5-7]</sup>及基于知识挖掘<sup>[8-10]</sup>等。但是现有针对故障诊断和容错控制的研究一般只针对执行器或传感器单一元件故障进行,对二者同时故障的情况考虑不多。

基于此,本文提出了基于故障在线估计的分散控制方法,考虑了执行器和传感器同时故障的情况,将故障隔离在子系统中,使系统不论发生何种故障,故障关节性能的下降都不影响正常关节的控制性能,且可在不改变控制参数的条件下应用于不同构形的可重构机械臂中。

## 1 问题描述

可重构机械臂子系统动力学模型可描述为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{aligned} & \mathbf{M}_i(q_i)\ddot{q}_i + \mathbf{C}_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + \\ & \mathbf{G}_i(q_i) + \mathbf{Z}_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = u_i \quad (1) \\ & Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \\ & \left\{ \sum_{j=1, j \neq i}^n M_{ij}(q)\ddot{q}_j + [M_{ii}(q) - M_i(q_i)]\ddot{q}_i \right\} + \\ & \left\{ \sum_{j=1, j \neq i}^n C_{ij}(q, \dot{q})\dot{q}_j + [C_{ii}(q, \dot{q}) - \right. \\ & \left. C_i(q_i, \dot{q}_i)]\dot{q}_i \right\} + [\bar{G}_i(q) - G_i(q_i)] \quad (2) \end{aligned}$$

式中:  $\mathbf{Z}_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) \in \mathbb{R}$  为子系统交联项。

设  $\mathbf{x}_i = [x_{i1} \ x_{i2}]^T = [q_i \ \dot{q}_i]^T$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 则当第  $i$  个子系统执行器或传感器发生故障时,结合式(1)与子系统故障函数  $f_{ia}$  及  $f_{is}$ , 式(2)可表示为状态空间的形式:

$$S_{if}: \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{B}_i [g_i(q_i)(u_i + f_{ia}(q_i, \dot{q}_i, u_i)) + \\ f_i(q_i, \dot{q}_i) + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})] \\ \mathbf{y}_i = \mathbf{C}_i(\mathbf{x}_i + f_{is}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{x}_i$ 、 $\mathbf{y}_i$  分别为子系统  $S_{if}$  的状态向量和输出向量,且:

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \mathbf{C}_i = [1 \ 0]$$

$$\begin{cases} f_i(q_i, \dot{q}_i) = M_i^{-1}(q_i)[-C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i - G_i(q_i)] \\ g_i(q_i) = M_i^{-1}(q_i) \\ h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = -M_i^{-1}(q_i)Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) \\ f_{is}(q_i, \dot{q}_i, u_i) = \alpha(t - T_{ia})\psi_i(q_i, \dot{q}_i, u_i) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\alpha(t - T_{ia})$  为单位阶跃函数,  $T_{ia}$  为子系统  $i$  执行器故障发生时间;  $\psi_i(q_i, \dot{q}_i, u_i)$  为执行器故障函数; 本文仅考虑模块关节位置传感器故障,则  $f_{is} = [f_{is1} \ 0]^T$  为子系统传感器故障函数矩阵,且满足  $\|f_{is}(t)\| \leq \rho_i(t)$ , 其中  $\rho_i(t)$  为已知连续函数。

本文的控制目标是针对故障子系统模型(3)设计基于故障在线估计的分散容错控制律,使可重构机械臂关节模块无论执行器发生故障,还是传感器发生故障,关节位置均能跟踪期望轨迹。

## 2 分散容错控制器设计

### 2.1 分散自适应滑模观测器设计

假设 1 期望轨迹  $y_{ir}$ 、 $\dot{y}_{ir}$  和  $\ddot{y}_{ir}$  有界。

假设 2 子系统的执行器故障  $f_{ia}$  和传感器故障  $f_{is1}$  均有未知上界:  $\|f_{ia}\| \leq f_{ia}^*$ ;  $\|f_{is1}\| \leq f_{is1}^*$ 。

首先利用李代数方法进行线性变换<sup>[4]</sup>, 将关节传感器故障转化为伪执行器故障, 并引入一个一阶滤波器  $z_i$  作为新的状态变量, 即:

$$\dot{z}_i = -a_i z_i + b_i y_{il} \quad (5)$$

式中:  $y_{il}$  为关节位置传感器输出信号;  $a_i, b_i$  为常数, 且  $a_i > 0, b_i \neq 0$ 。

将式(3)中的输出方程代入式(5)中, 可得:

$$\dot{z}_i = -a_i z_i + b_i x_{il} + b_i f_{is1} \quad (6)$$

令  $\bar{x}_i = [x_{i1} \ x_{i2} \ x_{i3}]^T = [q_i \ \dot{q}_i \ z_i]^T$ , 则扩展后的故障子系统模型可描述为:

$$\begin{cases} \dot{x}_{i1} = x_{i2} \\ \dot{x}_{i2} = f_i(q_i, \dot{q}_i) + g_i(q_i)(u_i + \\ f_{ia}(q_i, \dot{q}_i, u_i)) + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) \\ \dot{x}_{i3} = b_i x_{i1} - a_i x_{i3} + b_i f_{is1} \\ y_i = x_{i3} \end{cases} \quad (7)$$

设计分散自适应滑模观测器如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_{i1} = \hat{x}_{i2} + v_{i1} \\ \dot{\hat{x}}_{i2} = \hat{f}_i(\hat{q}_i, \dot{\hat{q}}_i, \hat{\theta}_{if}) + \hat{g}_i(\hat{q}_i, \hat{\theta}_{ig}) u_i + \\ \nu_i(e_{i2}, \hat{\theta}_{ip}) + v_{i2} + \hat{\delta}_i \\ \dot{\hat{x}}_{i3} = b_i \hat{x}_{i1} - a_i \hat{x}_{i3} + b_i \hat{f}_{is1} + v_{i3} \\ \hat{y}_i = \hat{x}_{i3} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $v_{ij} = \kappa_{ij} \frac{x_{ij} - \hat{x}_{ij}}{\|x_{ij} - \hat{x}_{ij}\|}$ ,  $j = 1, 2, 3$ ;  $\hat{\delta}_i$  用于补偿神经网络估计误差对控制精度的影响。

定义观测误差为  $e_{ij} = x_{ij} - \hat{x}_{ij}$ ,  $j = 1, 2, 3$ 。由式(7)(8)可得相应的误差动力学方程为:

$$\begin{cases} \dot{e}_{i1} = e_{i2} - v_{i1} \\ \dot{e}_{i2} = (f_i - \hat{f}_i) + (g_i - \hat{g}_i) u_i + h_i - \nu_i + \\ g_i f_{ia} - v_{i2} - \hat{\delta}_i \\ \dot{e}_{i3} = b_i e_{i1} - a_i e_{i3} + b_i (f_{is1} - \hat{f}_{is1}) - v_{i3} \end{cases} \quad (9)$$

采用 RBF 神经网络  $\hat{f}_i(\hat{q}_i, \dot{\hat{q}}_i)$  和  $\hat{g}_i(\hat{q}_i)$  对系统的不确定项  $f_i(q_i, \dot{q}_i)$  和  $g_i(q_i)$  进行估计, 理想神经网络逼近如下所示:

$$f_i(q_i, \dot{q}_i) = \boldsymbol{\theta}_{if}^T \boldsymbol{\sigma}_{if}(q_i, \dot{q}_i) + \varepsilon_{if} \quad (10)$$

$$g_i(q_i) = \boldsymbol{\theta}_{ig}^T \boldsymbol{\sigma}_{ig}(q_i) + \varepsilon_{ig} \quad (11)$$

$$\hat{f}_i(\hat{q}_i, \dot{\hat{q}}_i) = \hat{\boldsymbol{\theta}}_{if}^T \hat{\boldsymbol{\sigma}}_{if}(\hat{q}_i, \dot{\hat{q}}_i) \quad (12)$$

$$\hat{g}_i(\hat{q}_i) = \hat{\boldsymbol{\theta}}_{ig}^T \hat{\boldsymbol{\sigma}}_{ig}(\hat{q}_i) \quad (13)$$

定义  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{if}$  和  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{ig}$  分别为理想神经网络权值  $\boldsymbol{\theta}_{if}$  和  $\boldsymbol{\theta}_{ig}$  的估计值;  $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_{if} = \hat{\boldsymbol{\theta}}_{if} - \boldsymbol{\theta}_{if}$  和  $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_{ig} = \hat{\boldsymbol{\theta}}_{ig} - \boldsymbol{\theta}_{ig}$  为估计误差。

假设 3 关联项  $h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})$  有界且满足<sup>[12]</sup>:

$$|h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})| \leq \sum_{j=1}^n d_{ij} E_j \quad (14)$$

式中:  $d_{ij} \geq 0$  为未知常数;  $E_j = 1 + |e_{i2}| + |e_{i2}|^2$ 。

采用 RBF 神经网络  $\nu_i(e_{i2}, \hat{\theta}_{ip})$  补偿交联项对系统的影响:

$$\nu_i(e_{i2}, \hat{\theta}_{ip}) = \text{sgn}(e_{i2}) \hat{\boldsymbol{\theta}}_{ip}^T \hat{\boldsymbol{\sigma}}_{ip}(|e_{i2}|) \quad (15)$$

式中:  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{ip}$  为权值  $\boldsymbol{\theta}_{ip}$  的估计值,  $\hat{\boldsymbol{\sigma}}_{ip}$  为神经网络基函数  $\boldsymbol{\sigma}_{ip}$  的估计值。定义  $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_{ip} = \hat{\boldsymbol{\theta}}_{ip} - \boldsymbol{\theta}_{ip}$  为权值估计误差;  $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}_{ip} = \hat{\boldsymbol{\sigma}}_{ip} - \boldsymbol{\sigma}_{ip}$  为估计误差。

定义神经网络最小估计误差如下:

$$\begin{aligned} \omega_{il} &= \boldsymbol{\theta}_{if}^T (\hat{\boldsymbol{\sigma}}_{if}(\hat{q}_i, \dot{\hat{q}}_i) - \boldsymbol{\sigma}_{if}(q_i, \dot{q}_i)) + \varepsilon_{if} + \varepsilon_{ig} u_i + \\ &\quad \boldsymbol{\theta}_{ig}^T (\hat{\boldsymbol{\sigma}}_{ig}(\hat{q}_i) - \boldsymbol{\sigma}_{ig}(q_i)) u_i + (g_i - \hat{g}_i) f_{ia} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\omega_{i2} = R_i(|e_{i2}|) - \boldsymbol{\theta}_{ip}^T \hat{\boldsymbol{\sigma}}_{ip}(|e_{i2}|) \quad (17)$$

式中:  $R_i(|e_{i2}|) = n \max_{ij} \{d_{ij}\} E_i$ , 逼近误差  $\varepsilon_{if}$  和  $\varepsilon_{ig}$  未知有界, 且满足:

$$\omega_i = |\omega_{il}| + |\omega_{i2}| \quad (18)$$

定理 1 当可重构机械臂子系统发生执行器或传感器故障时, 由分散自适应滑模观测器式(8)与子系统的状态空间方程式(7)得到误差动力学方程式(9), 结合假设 2 和假设 3, 并且采用式(19)~(23)所示的自适应更新律, 能够在线估计出执行器和传感器故障, 并且使状态观测误差  $e_i$  在有限时间内按指数规律收敛, 即估计状态  $\hat{x}_i$  漫近收敛到实际状态  $x_i$ 。

神经网络权值  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{if}, \hat{\boldsymbol{\theta}}_{ig}, \hat{\boldsymbol{\theta}}_{ip}$  和故障估计参数  $\hat{f}_{is1}, \hat{\delta}_i$  分别按下面的自适应律更新:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_{if} = -\eta_{if} e_{i2} \hat{\boldsymbol{\sigma}}_{if} \quad (19)$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_{ig} = -\eta_{ig} e_{i2} \hat{\boldsymbol{\sigma}}_{ig}(q_i) u_i \quad (20)$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_{ip} = -\eta_{ip} |e_{i2}| \hat{\boldsymbol{\sigma}}_{ip} \quad (21)$$

$$\dot{\hat{f}}_{is1} = \eta_{is} b e_{i3} \quad (22)$$

$$\dot{\hat{\delta}}_i = \lambda_i e_{i2} \quad (23)$$

式中:  $\eta_{if}, \eta_{ig}, \eta_{ip}, \eta_{is}, \lambda_i$  均为正的常数, 且子系统传感器故障可由式(22)自适应估计得到。

考虑式(8)中  $\nu_{i2}$  的表达结构, 选择合适的正常数  $\sigma_i$ , 使得当  $\kappa_{i2} > f_{ia}^*$  满足时, 输出等效误差可由式(24)任意精度估计<sup>[4]</sup>:

$$v_{i2\sigma} = \kappa_{i2} \frac{x_{i2} - \hat{x}_{i2}}{\|x_{i2} - \hat{x}_{i2}\| + \sigma_i} \quad (24)$$

则子系统执行器故障可由式(25)得到。

$$\dot{f}_{ia} = \bar{\tau}^{-1} v_{i2\sigma} \quad (25)$$

证明 选取 Lyapunov 函数如下:

$$V_i = V_{il} + V_{i2} + V_{i3} \quad (26)$$

步骤 1 选取 Lyapunov 函数:

$$V_{il} = \frac{1}{2} \dot{e}_{il}^2 \quad (27)$$

其对时间的导数为:

$$\dot{V}_{il} = e_{il} \dot{e}_{il} \leqslant |e_{il}| (|e_{il}| - \kappa_{il}) \quad (28)$$

当  $\kappa_{il} > \mu_{il} + |e_{il}|$  时, 则  $V_1 \leqslant \sum_{i=1}^n (-\mu_{il} |e_{il}|) < 0$ , 其中  $\mu_{il}$  为小的正常数。

步骤 2 令  $\tilde{f}_{is} = f_{is} - \hat{f}_{is}$ , 选取 Lyapunov 函数:

$$V_3 = \frac{1}{2} \dot{e}_{is}^2 + \frac{1}{2} \eta_{is}^2 \tilde{f}_{is1}^2 \quad (29)$$

其对时间的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= e_{is} \dot{e}_{is} + \eta_{is}^{-1} \tilde{f}_{is1} \dot{\tilde{f}}_{is1} = \\ &= e_{is} (-a_i e_{is} + b_i e_{il} + b_i e_{is} - v_{is}) - \eta_{is}^{-1} \dot{\tilde{f}}_{is1} \dot{\tilde{f}}_{is1} = \\ &\quad - a_i e_{is}^2 + b_i e_{il} e_{is} - \kappa_{is} e_{is} \operatorname{sgn}(e_{is}) + \\ &\quad e_{is} (b_i e_{is} - \eta_{is}^{-1} \dot{\tilde{f}}_{is1} \dot{\tilde{f}}_{is1}) \leqslant \\ &\quad - a_i e_{is}^2 + |e_{is}| (b_i |e_{il}| - \kappa_{is}) \end{aligned} \quad (30)$$

当  $\kappa_{is} > b_i |e_{il}| + \mu_{is}$  时,  $\dot{V}_3 \leqslant \sum_{i=1}^n (-a_i e_{is}^2 - \mu_{is} |e_{is}|) \leqslant 0$ , 其中  $\mu_{is}$  为正小常数。

步骤 3 令  $\tilde{f}_{ia} = f_{ia} - \hat{f}_{ia}$ , 选取 Lyapunov 函数:

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{1}{2} \dot{e}_{ia}^2 + \frac{1}{2} \eta_{if}^{-1} \tilde{\theta}_{if}^T \tilde{\theta}_{if} + \frac{1}{2} \eta_{ig}^{-1} \tilde{\theta}_{ig}^T \tilde{\theta}_{ig} + \\ &\quad \frac{1}{2} \eta_{ip}^{-1} \tilde{\theta}_{ip}^T \tilde{\theta}_{ip} + \frac{1}{2} \lambda_i \tilde{\delta}_i^T \tilde{\delta}_i \end{aligned} \quad (31)$$

其对时间的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= e_{ia} ((f_{ia} - \hat{f}_{ia}) + (g_{ia} - \hat{g}_{ia}) u_i + h_i - v_i + \\ &\quad g_i f_{ia} - v_{ia} - \tilde{\delta}_i) + \frac{1}{\eta_{if}} \dot{\tilde{\theta}}_{if}^T \dot{\theta}_{if} + \frac{1}{\eta_{ig}} \dot{\tilde{\theta}}_{ig}^T \dot{\theta}_{ig} + \\ &\quad \frac{1}{\eta_{ip}} \dot{\tilde{\theta}}_{ip}^T \dot{\theta}_{ip} - \frac{1}{\lambda_i} \tilde{\delta}_i^T \tilde{\delta}_i \leqslant \\ &\quad |e_{ia}| |\tilde{\theta}_{ip} \tilde{\theta}_{ip}| + |e_{ia}| |\omega_i| - e_{ia} \tilde{\delta}_i + \frac{1}{\eta_{ip}} \dot{\tilde{\theta}}_{ip}^T \dot{\theta}_{ip} - \\ &\quad \frac{1}{\lambda_i} \tilde{\delta}_i^T \tilde{\delta}_i + \max_{ij} \{d_{ij}\} \sum_{i=1}^n |e_{ia}| \sum_{j=1}^n E_j \end{aligned} \quad (32)$$

考虑假设 3, 并注意到  $|e_{ia}| \leqslant |e_{i2}| \Leftrightarrow E_i \leqslant E_j$ , 应用 Chebyshev 不等式, 可得:

$$\sum_{i=1}^n |e_{ia}| \sum_{j=1}^n E_j \leqslant n \sum_{i=1}^n |e_{ia}| E_i \quad (33)$$

定义  $\tilde{\delta}_i = \delta_i - \hat{\delta}_i$ , 将式(23)(33)代入式(32)可得:

$$\dot{V}_2 \leqslant \sum_{i=1}^n (|e_{ia}| (n \max_{ij} \{d_{ij}\} E_i - \tilde{\theta}_{ip}^T \tilde{\theta}_{ip}) +$$

$$\begin{aligned} &|e_{ia}| |\omega_i| - e_{ia} \hat{\delta}_i + \frac{1}{\eta_{ip}} \dot{\tilde{\theta}}_{ip}^T \dot{\theta}_{ip} - \frac{1}{\lambda_i} \tilde{\delta}_i^T \tilde{\delta}_i) \leqslant \\ &\sum_{i=1}^n (e_{ia} (\delta_i - \hat{\delta}_i) - \frac{1}{\lambda_i} \tilde{\delta}_i^T \tilde{\delta}_i) = 0 \end{aligned} \quad (34)$$

由上述各步骤结论及式(26)对时间的导数可知:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^n (\dot{V}_{il} + \dot{V}_{is} + \dot{V}_{ia}) < 0 \quad (35)$$

由 Lyapunov 稳定性理论和 Barbalat 引理可知: 状态观测误差  $e_i$  将在有限时间内按指数规律收敛到零点, 即估计状态  $\hat{x}_i$  将渐近收敛到实际状态  $x_i$ 。

## 2.2 基于非奇异快速 Terminal 滑模的分散容错控制

为了使可重构机械臂系统发生故障时关节轨迹仍能精确地跟踪期望轨迹, 本节设计了一种基于非奇异 Terminal 滑模的分散容错控制器。此方法可在系统发生故障时改善控制性能, 并且避免了传统 Terminal 滑模控制可能导致的奇异现象。

定义位置跟踪误差为:

$$e_i = \hat{x}_{il} - y_{il} \quad (36)$$

$$\text{则其导数为: } \dot{e}_i = \dot{\hat{x}}_{il} - \dot{y}_{il} \quad (37)$$

定义非奇异快速 Terminal 滑模面为:

$$s_i = e_i + \alpha_i^{-1} e_i^{k_i/l_i} + \beta_i^{-1} i^{p_i/q_i} \quad (38)$$

式中:  $\alpha_i > 0, \beta_i > 0; p_i, q_i, k_i, l_i$  为正奇数, 且满足  $1 < p_i/q_i < 2, k_i/l_i > p_i/q_i$ 。

式(38)对时间的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{s}_i &= \dot{e}_i + \frac{1}{\alpha_i} \frac{k_i}{l_i} e_i^{k_i/l_i-1} \dot{e}_i + \frac{1}{\beta_i} \frac{p_i}{q_i} i^{p_i/q_i-1} \ddot{e}_i = \\ &\quad \dot{e}_i + \frac{1}{\alpha_i} \frac{k_i}{l_i} e_i^{k_i/l_i-1} \dot{e}_i + \frac{1}{\beta_i} \frac{p_i}{q_i} i^{p_i/q_i-1} [\hat{f}_i(\hat{q}_i, \dot{\hat{q}}_i) + \\ &\quad \hat{g}_i(\hat{q}_i) u_i + v_i(e_{i2}, \hat{\theta}_{ip}) + v_{il} + \hat{\delta}_i - \ddot{y}_{il}] \end{aligned} \quad (39)$$

基于非奇异快速 Terminal 滑模的分散容错控制律设计为:

$$\begin{aligned} u_i &= -\frac{1}{\hat{g}_i(\hat{q}_i)} (\hat{f}_i(\hat{q}_i, \dot{\hat{q}}_i) + v_{il} + v_i(e_{i2}, \hat{\theta}_{ip}) + \\ &\quad \hat{\delta}_i - \ddot{y}_{il} + \beta_i \frac{q_i}{p_i} e_i^{k_i/l_i-1} (1 + \frac{k_i}{\alpha_i l_i} e_i^{k_i/l_i-1}) + \\ &\quad \zeta_i s_i + \eta_i \operatorname{sgn}(s_i)) \end{aligned} \quad (40)$$

定理 2 考虑含有故障的子系统动力学模型式(7), 设计了如式(8)所示的基于 RBF 神经网络的分散自适应滑模观测器, 应用式(40)所示的基

于非奇异 Terminal 滑模分散容错控制律、式(19)~(23)所示的自适应更新律以及式(25)所示的故障辨识函数, 则可重构机械臂的轨迹跟踪误差将在有限时间收敛到零, 从而实现故障容错的目的。

证明 选取 Lyapunov 函数如下:

$$V_i = \frac{1}{2} s_i^2 \quad (41)$$

式(41)对时间的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= s_i \dot{s}_i = \\ &s_i \left\{ \dot{e}_i + \frac{1}{\alpha_i} \frac{k_i}{l_i} e_i^{k_i/l_i-1} \dot{e}_i + \frac{1}{\beta_i} \frac{p_i}{q_i} e_i^{p_i/q_i-1} [\hat{f}_i(\hat{q}_i, \dot{\hat{q}}_i) + \right. \\ &\left. \hat{g}_i(\hat{q}_i) u_i + v_i(e_{i2}, \hat{\theta}_{ig}) + v_{i2} + \hat{\delta}_i - \ddot{y}_{id}] \right\} \end{aligned} \quad (42)$$

将式(40)代入式(42), 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= \frac{1}{\beta_i} \frac{p_i}{q_i} e_i^{p_i/q_i-1} s_i (-\zeta_i s_i - \eta_i \operatorname{sgn}(s_i)) = \\ &\frac{1}{\beta_i} \frac{p_i}{q_i} e_i^{p_i/q_i-1} (-\zeta_i s_i^2 - \eta_i |s_i|) \end{aligned} \quad (43)$$

可见, 当  $s_i \neq 0$  时, 由于  $1 < \frac{p_i}{q_i} < 2$ , 则  $0 < \frac{p_i}{q_i} - 1 < 1$ , 又由于  $\beta_i > 0$ ,  $p_i$  和  $q_i$  为正奇数, 因此:

(1) 当  $\dot{e}_i \neq 0$  时,  $\xi_i = \frac{1}{\beta_i} \frac{p_i}{q_i} e_i^{p_i/q_i-1} > 0$ ,  $\dot{V}_i \leq -\xi_i (\zeta_i s_i^2 + \eta_i |s_i|) \leq 0$ 。

这表明  $V_i(t) \leq V_i(0)$ , 因此  $s_i$  是有界的。设函数  $\Phi_i(t) = \xi_i (\zeta_i s_i^2 + \eta_i |s_i|) \leq -\dot{V}_i$ , 对  $\Phi_i(t)$  从 0 到  $t$  积分得  $\int_0^t \Phi_i(\tau) d\tau \leq \int_0^t -\dot{V}_i d\tau = V_i(0) - V_i(t)$ 。由于  $V_i(0)$  有界,  $V_i(t)$  非增, 有下界, 可得  $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \Phi_i(\tau) d\tau < \infty$ , 因此可知  $\Phi_i(t) \in L_2$ , 由于  $\Phi_i(t) \in L_\infty$ , 根据 Barbalat 引理可得  $\lim_{t \rightarrow \infty} \Phi_i(t) = 0$ , 进而得到  $\lim_{t \rightarrow \infty} s_i = 0$ , 即跟踪误差  $e_i = \hat{x}_{il} - y_{id}$  也将在有限时间内收敛到零。

(2) 当  $\dot{e}_i = 0$  时,  $\dot{V}_i = 0$ 。但  $\dot{e}_i = 0$ ,  $e_i \neq 0$ , 易证明其并不是稳定的状态,  $\dot{V}_i = 0$  不能一直保持, 因此根据 Lyapunov 稳定性定理, 系统将在有限时间到达并保持在非奇异终端滑模面  $s_i = 0$  上, 跟踪误差  $e_i$  也将收敛到零, 因此定理 2 成立。

### 3 数值仿真

为了验证本文所设计的分散容错控制方法的

有效性, 采用如图 1 所示的两种不同构形的三自由度可重构机械臂进行数值仿真。

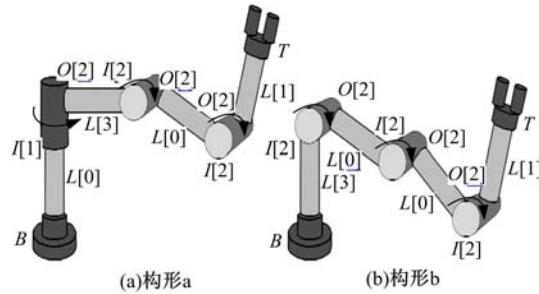


图 1 三自由度可重构机械臂构形

Fig. 1 Configurations of 3-DOF reconfigurable manipulators

仿真中设初始位置为  $\hat{q}_1(0) = \hat{q}_2(0) = \hat{q}_3(0) = 1$ , 初始速度为  $\dot{\hat{q}}_1(0) = \dot{\hat{q}}_2(0) = \dot{\hat{q}}_3(0) = 0$ , 观测器参数为  $\kappa_{i1} = \kappa_{i2} = \kappa_{i3} = 10$ ,  $\sigma_i = 0.02$ ; 控制器参数为  $p_i = 5$ ,  $q_i = 3$ ,  $k_i = 7$ ,  $l_i = 3$ ,  $\alpha_i = 0.05$ ,  $\beta_i = 0.5$ ,  $\zeta_i = 10$ ,  $\eta_i = 0.001$ ; 自适应增益系数为  $\eta_{if} = 0.02$ ,  $\eta_{ig} = 0.01$ ,  $\eta_{ip} = 0.01$ ,  $\eta_{is} = 10^5$ ,  $\lambda_i = 1$ ; 滤波器参数为  $a_i = 1$ ,  $b_i = 1$ 。

对于构形 a, 分别于  $t=2$  s 和  $t=3$  s 对关节 1 执行器、关节 2 传感器加入故障, 故障函数如下:

$$f_{1a} = \begin{cases} 0, & t < 2 \\ 10, & t \geq 2 \end{cases}, f_{2s} = \begin{cases} 0, & t < 3 \\ -0.5 q_2, & t \geq 3 \end{cases}$$

图 2 为利用所设计分散自适应滑模观测器得到的故障估计曲线, 可以看出此方法可精确地在线估计故障。

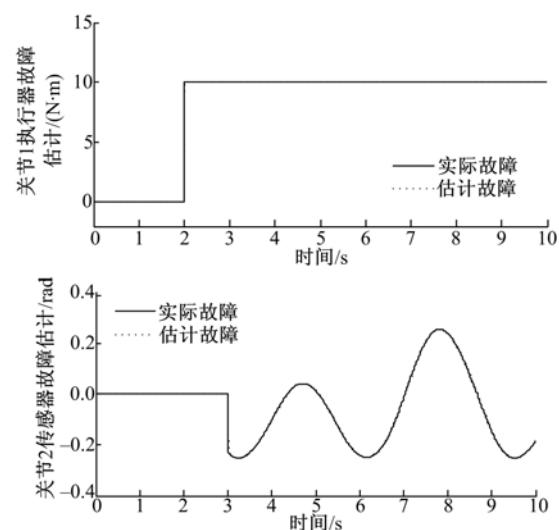


图 2 构形 a 故障在线估计曲线

Fig. 2 Online fault estimation curves of configuration a

图 3 为在发生故障时, 采用所设计的非奇异

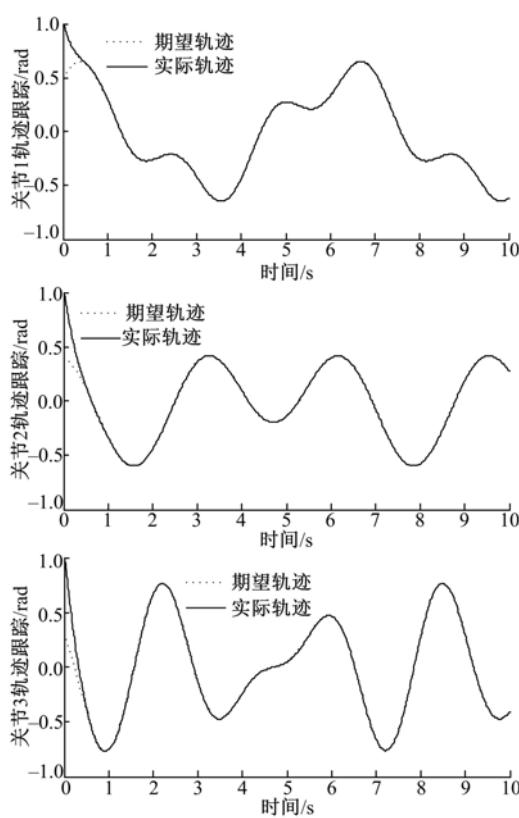


图 3 构形 a 应用所设计容错控制律关节跟踪曲线

Fig. 3 Joints tracking curves applied the proposed fault tolerant control of configuration a

Terminal 分散容错控制律得到的轨迹跟踪曲线,从图中可知,各子系统得到了满意的跟踪性能。

图 4 和图 5 是在不改变控制参数的条件下应用构形 b 进行相同的数值仿真的结果,其中故障函数如式(44)所示。

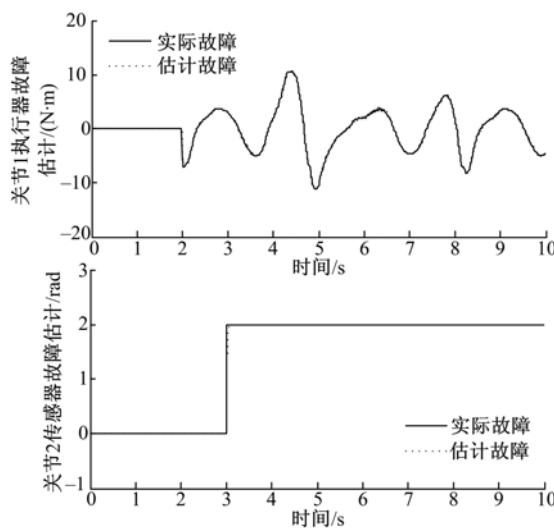


图 4 构形 b 故障在线估计曲线

Fig. 4 Online fault estimation curves of configuration b

$$\begin{cases} f_{1a} = \begin{cases} 0, t < 2 \\ 10 \sin(2q_1) q_1, t \geq 2 \end{cases} \\ f_{2s} = \begin{cases} 0, t < 3 \\ 2, t \geq 3 \end{cases} \end{cases} \quad (44)$$

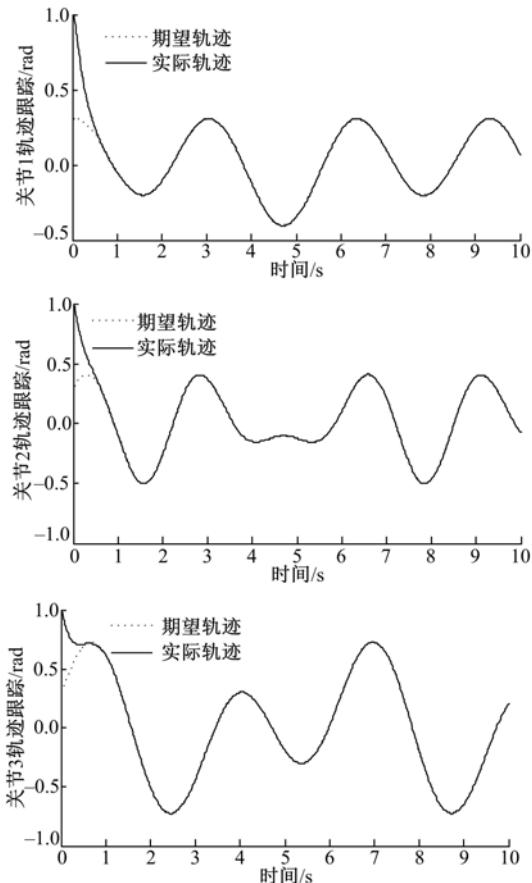


图 5 构形 b 应用所设计容错控制律关节跟踪曲线

Fig. 5 Joints tracking curves applied the proposed fault tolerant control of configuration b

从图 4 和图 5 可以看出:在不改变参数的条件下,所设计的控制方法仍然适用,因此所提方法可应用于具有不同构形、不同自由度的可重构机械臂。

#### 4 结束语

针对由于可重构机械臂模块关节执行器和传感器故障而导致控制系统性能下降的问题,提出了一种基于故障在线隔离的分散容错控制方法。基于可重构机械臂的模块化属性,设计了分散自适应滑模观测器以实现执行器和传感器故障隔离,并结合非奇异 Terminal 滑模控制方法对子系统故障进行容错处理。此方法将故障隔离在子系统内,且可在不修改控制参数的条件下对不同构

形的可重构机械臂实现容错控制。

### 参考文献:

- [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] Brambilla D, Capisani L M, Ferrara A, et al. Fault detection for robot manipulators via second-order sliding modes[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(11): 3954-3963.
- [3] Yoo S J. Actuator fault detection and adaptive accommodation control of flexible-joint robots[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2012, 6 (10): 1497-1507.
- [4] Zhao B, Li Y C. Multisensor fault identification scheme based on decentralized sliding mode observers applied to reconfigurable manipulators [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013. DOI: 10.1155/2013/327916.
- [5] Zhang Y W, Ma C. Decentralized fault diagnosis using multiblock kernel independent component analysis[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2012, 90(5): 667-676.
- [6] Yan R Q, Gao R X, Chen X F. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications[J]. *Signal Processing*, 2014, 96 (Part A): 1-15.
- [7] Subrahmanyam N, Shin Y C. A data-based framework for fault detection and diagnostics of non-linear systems with partial state measurement[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26 (1):446-455.
- [8] Zhao C L, Sun X B, Sun S L, et al. Fault diagnosis of sensor by chaos particle swarm optimization algorithm and support vector machine[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(8): 9908-9912.
- [9] Silva J C D, Saxena A, Balaban E, et al. A knowledge-based system approach for sensor fault modeling, detection and mitigation[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 39(12): 10977-10989.
- [10] Milena P, Rapaic M R, Jelicic Z D, et al. On-line adaptive clustering for process monitoring and fault detection[J]. *Expert System with Applications*, 2012, 39(11): 10226-10235.
- [11] 李英, 朱明超, 李元春. 可重构机械臂模糊神经补偿控制[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(1): 206-211.  
Li Ying, Zhu Ming-chao, Li Yuan-chun. Neuro-fuzzy compensation control for reconfigurable manipulator[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2007, 37(1):206-211.
- [12] Zhu M, Li Y. Decentralized adaptive fuzzy sliding mode control for reconfigurable modular manipulators[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2010, 20(4): 472-488.