

文章编号: 1001-0920(2009)08-1247-05

## 可重构模块机器人分散容错控制

朱明超<sup>a</sup>, 李元春<sup>a</sup>, 姜日花<sup>b</sup>

(吉林大学 a. 通信工程学院, b. 中日联谊医院, 长春 130033)

**摘要:** 针对可重构模块机器人的执行器故障, 提出一种基于自适应模糊系统的分散被动容错控制方法. 该方法不需要机器人动力学模型与模块之间的信息交换, 模块控制器分别采用间接和直接自适应方法设计, 自适应参数的更新律基于 Lyapunov 稳定性理论设计, 保证了系统的稳定性和  $H_\infty$  跟踪性能. 数值仿真结果表明了所提出方法的有效性.

**关键词:** 分散控制; 容错控制; 模糊控制; 自适应控制; 模块机器人

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

## Decentralized fault tolerant control for reconfigurable modular robots

ZHU Ming-chao<sup>a</sup>, LI Yuan-chun<sup>a</sup>, JIANG Ri-hua<sup>b</sup>

(a. College of Communication Engineering, b. China-Japan Union Hospital, Jilin University, Changchun 130033, China. Correspondent: JIANG Ri-hua, E-mail: jrh1963@163.com)

**Abstract:** A passive decentralized fault tolerant control scheme is proposed for tolerating actuator degradation at each joint module. The fault tolerance is achieved at each joint module without requiring sub-dynamics or information about the other modules. Both indirect and direct adaptive controllers are designed for each joint module. All adaptive algorithms in the subsystem controller are derived from the sense of Lyapunov stability analysis, so that resulting closed-loop system is stable and the  $H_\infty$  tracking performance is guaranteed. The simulation results show the effectiveness of the proposed scheme.

**Key words:** Decentralized control; Fault tolerant control; Fuzzy control; Adaptive control; Modular robots

### 1 引言

为了提高可靠性和自修复能力, 容错控制成为可重构模块机器人技术的研究方向之一. 早期的文献主要采用硬件冗余, 如何改良系统的冗余性, 系统需要多少个自由度, 这些自由度如何在机器人系统中分布, 成为主要的研究问题<sup>[1]</sup>. 为了减少成本、降低系统的复杂性, 解析冗余在机器人容错控制中得到广泛的重视和研究.

文献[2]提出一种基于非线性观测器的故障检测和诊断方法; [3]提出一种基于神经网络的故障检测和诊断方法; [4]提出一种基于 Markovian 跳变系统的输出反馈  $H_\infty$  容错控制; [5]提出一种针对执行器故障的最优鲁棒容错控制. 上述方法大体上属于集中控制方案, 需要采集系统的所有状态. 受模块之间通讯能力的限制, 这些方法很难直接应用于可

重构模块机器人. 目前, 分散控制在机器人的研究中越来越引起重视<sup>[6-8]</sup>, 它不仅结构简单且具柔性, 而且适合软件模块化的设计思想.

本文针对执行器故障提出一种被动分散容错控制方法. 该方法不需要根据机器人构形的变化而改变关节模块的控制器参数, 当执行器发生故障后, 仍能保证跟踪的精确性和系统的稳定性.

### 2 问题描述

执行器发生故障后,  $n$  自由度可重构模块机器人的动力学模型为

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

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,  $C(q, \dot{q})\dot{q} \in R^n$  为哥氏力和离心力项,  $G(q) \in R^n$  为重力项,  $F(q, \dot{q}) \in R^n$  为摩擦项,  $u \in R^n$  为关节力矩向量,  $\rho = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$  为执行器故障失

收稿日期: 2008-09-27; 修回日期: 2009-01-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60674091).

作者简介: 朱明超(1980—), 男, 长春人, 博士生, 从事机器人控制的研究; 李元春(1962—), 男, 长春人, 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.

效因子矩阵.

将每个关节模块考虑为一个子系统. 从式(1)分离出局部变量 $(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i)$ , 则子系统模型可描述为

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + G_i(q_i) + F_i(q_i, \dot{q}_i) + Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \rho_i u_i, \quad (2)$$

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

$$\left\{ \sum_{j=1}^n M_{ij}(q)\ddot{q}_j + [M_{ii}(q) - M_i(q_i)]\ddot{q}_i \right\} + \left\{ \sum_{j=1}^n C_{ij}(q, \dot{q})\dot{q}_j + [C_{ii}(q, \dot{q}) - C_i(q_i, \dot{q}_i)]\dot{q}_i \right\} + [\bar{G}_i(q) - G_i(q_i)], \quad j \neq i. \quad (3)$$

其中: $q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i, \bar{G}_i(q), F_i(q_i, \dot{q}_i)$  和  $u_i$  分别为向量  $q, \dot{q}, \ddot{q}, G(q), F(q, \dot{q})$  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.

设  $x_i = [q_i, \dot{q}_i]^T, i = 1, 2, \dots, n$ . 则式(2)可表示为

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

其中

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

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

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

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

$x_i$  为子系统  $S_i$  的状态变量,  $y_i$  为子系统  $S_i$  的输出. 控制目标是设计分散容错控制律, 使可重构模块机器人系统跟踪期望轨迹  $y_{ir}$ , 保证所有变量有界, 并使系统满足  $H_\infty$  跟踪性能.

### 3 基于自适应模糊系统的分散容错控制

#### 3.1 间接自适应方法

定义第  $i$  个子系统的跟踪误差  $e_{i1} = y_i - y_{ir}, e_{i2} = \dot{y}_i - \dot{y}_{ir}$ , 跟踪误差向量定义为  $e_i = [e_{i1}, e_{i2}]^T$ . 则整个系统的误差向量  $e = [e_1^T, e_2^T, \dots, e_n^T]^T$ .

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

由式(4)可得到如下误差方程:

$$\dot{e}_i = \Lambda_i e_i + B_i [f_i(q_i, \dot{q}_i) + g_i(q_i)u_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) + K_i^T e_i - \ddot{y}_{ir}]. \quad (5)$$

其中:  $\Lambda_i = A_i - B_i K_i^T, K_i = [k_{i1}, k_{i2}]^T$  为增益向量.

采用模糊系统  $\hat{f}_i(q_i, \dot{q}_i, \theta_{if})$  和  $\hat{g}_i(q_i, \theta_{ig})$  对  $f_i(q_i, \dot{q}_i)$  和  $g_i(q_i)$  进行逼近, 有

$$\hat{f}_i(q_i, \dot{q}_i, \theta_{if}) = \theta_{if}^T \xi_{if}(q_i, \dot{q}_i), \quad (6)$$

$$\hat{g}_i(q_i, \theta_{ig}) = \theta_{ig}^T \xi_{ig}(q_i). \quad (7)$$

其中:  $\theta_{if}$  和  $\theta_{ig}$  为可调参数向量,  $\xi_{if}(q_i, \dot{q}_i)$  和  $\xi_{ig}(q_i)$  为模糊基函数向量.

定义最优参数向量

$$\theta_{if}^* = \arg \min_{\theta_{if} \in \Omega_{if}} \left\{ \sup_{q_i \in U_{if}} | \hat{f}_i(q_i, \dot{q}_i, \theta_{if}) - f_i(q_i, \dot{q}_i) | \right\},$$

$$\theta_{ig}^* = \arg \min_{\theta_{ig} \in \Omega_{ig}} \left\{ \sup_{q_i \in U_{ig}} | \hat{g}_i(q_i, \theta_{ig}) - g_i(q_i) | \right\}.$$

其中  $\Omega_{if}, \Omega_{ig}, U_{if}$  和  $U_{ig}$  分别为  $\theta_{if}, \theta_{ig}, x_i$  和  $q_i$  的约束集.

定义最小逼近误差

$$w_i = [f_i(q_i, \dot{q}_i) - \hat{f}_i(q_i, \dot{q}_i, \theta_{if}^*)] + [g_i(q_i) - \hat{g}_i(q_i, \theta_{ig}^*)]u_i. \quad (8)$$

**假设 2** 逼近误差  $w_i \in L_{2T}$ , 即  $\int_0^T w_i^2 dt < \infty$ .

**假设 3** 交联项  $h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})$  有界且满足

$$|h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})| \leq \sum_{j=1}^n d_{ij} E_j. \quad (9)$$

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

分散控制律设计为

$$u_i = \frac{1}{g_i(q_i, \theta_{ig})} [-\hat{f}_i(q_i, \dot{q}_i, \theta_{if}) - K_i^T e_i + \ddot{y}_{ir} - \text{sgn}(e_i^T P_i B_i) \delta_i E_i + u_{ia}]. \quad (10)$$

其中:  $u_{ia} = -\frac{1}{r_i} B_i^T P_i e_i; \delta_i$  为  $\delta_i^* = n \max\{d_{ij}\}$  的估计值;  $\theta_{if}, \theta_{ig}$  和  $\delta_i$  按以下自适应律更新:

$$\dot{\theta}_{if} = \eta_{if} e_i^T P_i B_i \xi_{if}(q_i, \dot{q}_i), \quad (11)$$

$$\dot{\theta}_{ig} = \eta_{ig} e_i^T P_i B_i \xi_{ig}(q_i) u_i, \quad (12)$$

$$\dot{\delta}_i = \eta_{\delta} |e_i^T P_i B_i| E_i. \quad (13)$$

式中:  $\eta_{if}, \eta_{ig}$  和  $\eta_{\delta}$  为正常数; 矩阵  $P_i = P_i^T > 0$  为如下 Riccati 方程的解:

$$\Lambda_i^T P_i + P_i \Lambda_i - P_i B_i \left( \frac{2}{r_i} - \frac{1}{\rho^2} \right) B_i^T P_i + Q_i = 0. \quad (14)$$

其中:  $Q_i \in R^{2 \times 2}$  为任意正定矩阵,  $\rho > 0$  为预先设定的抑制水平,  $r_i > 0$  为满足  $r_i \leq 2\rho^2$  的正常数.

定义参数误差  $\tilde{\theta}_{if} = \theta_{if}^* - \theta_{if}, \tilde{\theta}_{ig} = \theta_{ig}^* - \theta_{ig}, \tilde{\delta}_i = \delta_i^* - \delta_i$ . 则误差动力学(5)可重写为

$$\dot{e}_i = \Lambda_i e_i + B_i [\tilde{\theta}_{if}^T \xi_{if}(q_i, \dot{q}_i) + \tilde{\theta}_{ig}^T \xi_{ig}(q_i) u_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) - \text{sgn}(e_i^T P_i B_i) \delta_i E_i + u_{ia} + w_i]. \quad (15)$$

**定理 1** 考虑子系统(2)和所有假设条件, 设计型如式(10)的控制律, 式(11)~(13)的自适应律, 则闭环系统稳定且满足  $H_\infty$  跟踪性能.

**证明** 考虑 Lyapunov 函数

$$V = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{2} e_i^T P_i e_i + \frac{1}{2\eta_{if}} \tilde{\theta}_{if}^T \tilde{\theta}_{if} + \right.$$

$$\frac{1}{2\eta_{ig}}\bar{\theta}_{ig}^T\bar{\theta}_{ig} + \frac{1}{2\eta_{\bar{\delta}}}\bar{\delta}_i^2). \quad (16)$$

求式(16)对时间的导数,可得

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^n (e_i^T P_i \dot{e}_i + \frac{1}{\eta_{if}} \bar{\theta}_{if}^T \dot{\bar{\theta}}_{if} + \frac{1}{\eta_{ig}} \bar{\theta}_{ig}^T \dot{\bar{\theta}}_{ig} + \frac{1}{\eta_{\bar{\delta}}} \bar{\delta}_i \dot{\bar{\delta}}_i). \quad (17)$$

式(15)代入式(17),得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{2} e_i^T (\Lambda_i^T P_i + P_i \Lambda_i) e_i + e_i^T P_i B_i u_{ia} + \right. \\ & \bar{\theta}_{if}^T (e_i^T P_i B_i \xi_{if}(q_i, \dot{q}_i) - \frac{1}{\eta_{if}} \dot{\bar{\theta}}_{if}) + e_i^T P_i B_i \tau_i + \\ & \bar{\theta}_{ig}^T (e_i^T P_i B_i \xi_{ig}(q_i) u_i - \frac{1}{\eta_{ig}} \dot{\bar{\theta}}_{ig}) + \\ & \left. e_i^T P_i B_i h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) - |e_i^T P_i B_i| \delta_i E_i - \frac{1}{\eta_{\bar{\delta}}} \bar{\delta}_i \dot{\bar{\delta}}_i \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

式(11)和(12)代入式(18),得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{2} e_i^T (\Lambda_i^T P_i + P_i \Lambda_i) e_i + \right. \\ & e_i^T P_i B_i h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) + e_i^T P_i B_i u_{ia} - \\ & \left. |e_i^T P_i B_i| \delta_i E_i + e_i^T P_i B_i \tau_i - \frac{1}{\eta_{\bar{\delta}}} \bar{\delta}_i \dot{\bar{\delta}}_i \right] \leq \\ & \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{2} e_i^T (\Lambda_i^T P_i + P_i \Lambda_i) e_i + e_i^T P_i B_i u_{ia} - \right. \\ & \left. |e_i^T P_i B_i| \delta_i E_i + e_i^T P_i B_i \tau_i - \frac{1}{\eta_{\bar{\delta}}} \bar{\delta}_i \dot{\bar{\delta}}_i \right] + \\ & \max_{ij} \{d_{ij}\} \sum_{i=1}^n |e_i^T P_i B_i| \sum_{j=1}^n E_j. \end{aligned} \quad (19)$$

注意到  $|e_i^T P_i B_i| \leq |e_j^T P_j B_j| \Leftrightarrow E_i \leq E_j$ , 应用 Chebyshev 不等式,得到

$$\sum_{i=1}^n |e_i^T P_i B_i| \sum_{j=1}^n E_j \leq n \sum_{i=1}^n |e_i^T P_i B_i| E_i. \quad (20)$$

综合式(19)和(20),可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{2} e_i^T (\Lambda_i^T P_i + P_i \Lambda_i - \frac{2}{r_i} P_i B_i B_i^T P_i) e_i + \right. \\ & \left. e_i^T P_i B_i \tau_i - \bar{\delta}_i \left( \frac{1}{\eta_{\bar{\delta}}} \dot{\bar{\delta}}_i - |e_i^T P_i B_i| E_i \right) \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

式(13)代入式(21),得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{2} e_i^T (\Lambda_i^T P_i + P_i \Lambda_i - \right. \\ & \left. \frac{2}{r_i} P_i B_i B_i^T P_i) e_i + |e_i^T P_i B_i| |\tau_i| \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

由 Riccati 方程(14)可得

$$\dot{V} \leq \sum_{i=1}^n \left[ -\frac{1}{2\rho^2} e_i^T P_i B_i B_i^T P_i e_i - \right.$$

$$\left. \frac{1}{2} e_i^T Q_i e_i + |e_i^T P_i B_i| |\tau_i| \right] =$$

$$\sum_{i=1}^n \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{\rho} |e_i^T P_i B_i| - \rho |\tau_i| \right)^2 - \right.$$

$$\left. \frac{1}{2} e_i^T Q_i e_i + \frac{1}{2} \rho^2 \tau_i^2 \right] \leq$$

$$\sum_{i=1}^n \left[ -\frac{1}{2} e_i^T Q_i e_i + \frac{1}{2} \rho^2 \tau_i^2 \right]. \quad (23)$$

定义  $Q = \text{diag}(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ ,  $w = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$ . 则式(23)可重写为

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} e^T Q e + \frac{1}{2} \rho^2 w^T w. \quad (24)$$

设  $\lambda_{\min}(Q)$  为  $Q$  的最小特征值,则有

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} \lambda_{\min}(Q) \|e\|^2 + \frac{1}{2} \rho^2 \|w\|^2. \quad (25)$$

从上面不等式可以看出,在闭集  $\Omega_e = \{e: 0 \leq \|e\| \leq \sqrt{\frac{1}{\lambda_{\min}(Q)} \rho \|w\|}\}$  之外,  $\dot{V}$  是负定的. 因此闭环系统中的所有变量都是有界的.

对式(24)从  $t = 0$  到  $t = T$  积分,得

$$2V(T) + \int_0^T e^T Q e dt \leq 2V(0) + \rho^2 \int_0^T \|w\|^2 dt. \quad (26)$$

由式(26)可知,系统达到  $H_\infty$  跟踪性能.  $\square$

### 3.2 直接自适应方法

将式(4)变换为如下方程:

$$S_i: \begin{cases} \dot{x}_i = A_i x_i + B_i [F_i(q_i, \dot{q}_i) + \\ g_{i0} u_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})], \\ y_i = C_i x_i \end{cases} \quad (27)$$

其中:  $F_i(q_i, \dot{q}_i) = f_i(q_i, \dot{q}_i) + [g_i(q_i) - g_{i0}] u_i$ ,  $g_{i0}$  为常数增益.

子系统的控制变量可描述为

$$\hat{u}_i(q_i, \dot{q}_i, \theta_{iu}) = \theta_{iu}^T \xi_{iu}(q_i, \dot{q}_i). \quad (28)$$

其中:  $\theta_{iu}$  为可调参数向量,  $\xi_{iu}(q_i, \dot{q}_i)$  为模糊基函数向量.

分散控制律设计为

$$\begin{aligned} u_i = & \hat{u}_i(q_i, \dot{q}_i, \theta_{iu}) + \\ & \frac{1}{g_{i0}} [u_{ia} - \text{sgn}(e_i^T P_i B_i) \delta_i E_i]. \end{aligned} \quad (29)$$

其中:  $u_{ia} = -\frac{1}{r_i} B_i^T P_i e_i$ ,  $\delta_i$  为  $\delta_i^* = n \max_{ij} \{d_{ij}\}$  的估计值,  $\theta_{iu}$  和  $\delta_i$  按如下自适应律更新:

$$\dot{\theta}_{iu} = -\eta_{iu} g_{i0} e_i^T P_i B_i \xi_{iu}(q_i, \dot{q}_i), \quad (30)$$

$$\dot{\delta}_i = \eta_{\bar{\delta}} |e_i^T P_i B_i| E_i. \quad (31)$$

其中:  $\eta_{iu}$  和  $\eta_{\bar{\delta}}$  为正常数, 矩阵  $P_i = P_i^T > 0$  为 Riccati 方程(14)的解.

定义子系统的理想控制

$$u_i^* = \frac{1}{g_{i0}} [-F_i(q_i, \dot{q}_i) + \ddot{y}_{ir} - K_i^T e_i]. \quad (32)$$

式(29)代入式(27),得

$$\begin{aligned} \dot{e}_i = & \Lambda_i e_i + B_i \{ g_{i0} [\hat{u}_i(q_i, \dot{q}_i, \theta_{iu}) - u_i^*] + \\ & h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) - \text{sgn}(e_i^T P_i B_i) \delta_i E_i + u_{ia} \}. \end{aligned} \quad (33)$$

定义最优参数向量

$$\theta_{iu}^* = \arg \min_{\theta_{iu} \in \Omega_{iu}} \left\{ \sup_{x_i \in U_{iu}} |\hat{u}_i(q_i, \dot{q}_i, \theta_{iu}) - u_i^*| \right\}, \quad (34)$$

其中  $\Omega_{iu}$  和  $U_{iu}$  分别为  $\theta_{iu}$  和  $x_i$  的约束集.

定义最小逼近误差

$$\omega_i = g_{i0} [\hat{u}_i(q_i, \dot{q}_i, \theta_{iu}^*) - u_i^*]. \quad (35)$$

设参数误差  $\tilde{\theta}_{iu} = \theta_{iu}^* - \theta_{iu}$ ,  $\tilde{\delta}_i = \delta_i^* - \delta_i$ . 则误差动力学(33)可重写为

$$\begin{aligned} \dot{e}_i = & \Lambda_i e_i + B_i [-g_{i0} \tilde{\theta}_{iu}^T \xi_m(q_i, \dot{q}_i) + \\ & h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) + \omega_i - \text{sgn}(e_i^T P_i B_i) \delta_i E_i + u_{ia}]. \end{aligned} \quad (36)$$

**定理2** 考虑子系统(2)和所有假设条件,设计型如式(29)的控制律,式(30)和(31)的自适应律,则闭环系统稳定且满足  $H_\infty$  跟踪性能.

**证明** 考虑 Lyapunov 函数

$$V = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{2} e_i^T P_i e_i + \frac{1}{2\eta_{iu}} \tilde{\theta}_{iu}^T \tilde{\theta}_{iu} + \frac{1}{2\eta_{\delta i}} \tilde{\delta}_i^2 \right), \quad (37)$$

求式(37)对时间的导数,得

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^n \left( e_i^T P_i \dot{e}_i + \frac{1}{\eta_{iu}} \tilde{\theta}_{iu}^T \dot{\tilde{\theta}}_{iu} + \frac{1}{\eta_{\delta i}} \tilde{\delta}_i \dot{\tilde{\delta}}_i \right). \quad (38)$$

式(33)代入式(38),得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{2} e_i^T (\Lambda_i^T P_i + P_i \Lambda_i) e_i + e_i^T P_i B_i u_{ia} - \right. \\ & \tilde{\theta}_{iu}^T (g_{i0} e_i^T P_i B_i \xi_m(q_i, \dot{q}_i) - \frac{1}{\eta_{iu}} \dot{\tilde{\theta}}_{iu}) + \\ & e_i^T P_i B_i \omega_i + e_i^T P_i B_i h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) - \\ & \left. |e_i^T P_i B_i| \delta_i E_i - \frac{1}{\eta_{\delta i}} \tilde{\delta}_i \dot{\tilde{\delta}}_i \right]. \end{aligned} \quad (39)$$

式(30)代入式(39),得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{2} e_i^T (\Lambda_i^T P_i + P_i \Lambda_i) e_i + e_i^T P_i B_i u_{ia} - \right. \\ & |e_i^T P_i B_i| \delta_i E_i + e_i^T P_i B_i \omega_i - \frac{1}{\eta_{\delta i}} \tilde{\delta}_i \dot{\tilde{\delta}}_i + \\ & \left. |e_i^T P_i B_i| n \max_{ij} \{d_{ij}\} E_i \right] = \\ & \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{2} e_i^T (\Lambda_i^T P_i + P_i \Lambda_i - \frac{2}{r_i} P_i B_i B_i^T P_i) e_i + \right. \\ & \left. e_i^T P_i B_i \omega_i - \tilde{\delta}_i \left( \frac{1}{\eta_{\delta i}} \dot{\tilde{\delta}}_i - |e_i^T P_i B_i| E_i \right) \right]. \end{aligned} \quad (40)$$

式(31)和(14)代入式(40),可得式(23). 使用与定理1相同的方法,可证明定理2成立.  $\square$

**注1** 在控制输入有界的情况下,可采用与文献[6]中引理1类似的方法,证明假设2成立.

**注2** 由式(25)可知,选择较小的  $\rho$  和较大的  $Q$ ,可使误差  $e$  收敛到较小的水平.

**注3** 现有的直接自适应控制方法通常假设输入增益  $g_i(q_i)$  为已知常数,本文提出的直接自适应方法不需要这一假设条件.

## 4 数值仿真

将本文提出的方法应用于图1所示的四自由度模块机器人. 模块参数和动力学建模过程参见文献[9].

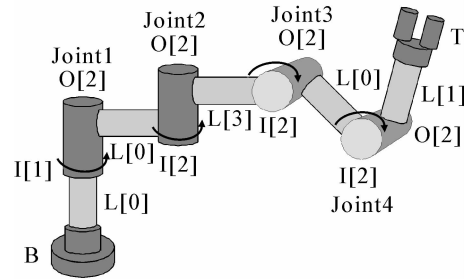


图1 四自由度模块机器人仿真构形

在仿真过程中,设置关节模块的期望轨迹为

$$\begin{aligned} y_{1r} &= 0.5 \cos(t) - 0.2 \sin(3t), \\ y_{2r} &= 0.3 \cos(3t) - 0.5 \sin(2t), \\ y_{3r} &= 0.2 \sin(3t) + 0.1 \cos(4t), \\ y_{4r} &= 0.3 \sin(2t) + 0.2 \cos(t). \end{aligned}$$

初始位置设置为2,初始速度设置为0. 假设关节模块1和3分别在第5s和第6s发生故障,失效因子分别为  $\rho_1 = 0.2$  和  $\rho_2 = 0.5$ . 定义模糊集合  $F_{i1}^l$  和  $F_{i2}^l$ , 相应的隶属度函数如下:

$$\begin{aligned} \mu_{F_{ik}^1}(x) &= \exp[-(x+3)^2/0.3607], \\ \mu_{F_{ik}^2}(x) &= \exp[-(x+2)^2/0.3607], \\ \mu_{F_{ik}^3}(x) &= \exp[-(x+1)^2/0.3607], \\ \mu_{F_{ik}^4}(x) &= \exp[-x^2/0.3607], \\ \mu_{F_{ik}^5}(x) &= \exp[-(x-1)^2/0.3607], \\ \mu_{F_{ik}^6}(x) &= \exp[-(x-2)^2/0.3607], \\ \mu_{F_{ik}^7}(x) &= \exp[-(x-3)^2/0.3607], \quad k = 1, 2. \end{aligned}$$

模糊规则基定义如下:

$f_i(q_i, \dot{q}_i)$ : 若  $q_i$  是  $F_{i1}^l$ , 且  $\dot{q}_i$  是  $F_{i2}^l$ , 则  $f_i(q_i, \dot{q}_i)$  是  $Y_{if}^l, l = 1, 2, \dots, 7$ ;

$g_i(q_i)$ : 若  $q_i$  是  $F_{i1}^l$ , 则  $\hat{g}_i(q_i)$  是  $Y_{ig}^l, l = 1, 2, \dots, 7$ ;

$u_i(q_i, \dot{q}_i)$ : 若  $q_i$  是  $F_{i1}^l$ , 且  $\dot{q}_i$  是  $F_{i2}^l$ , 则  $\hat{u}_i(q_i, \dot{q}_i)$  是  $Y_{iu}^l, l = 1, 2, \dots, 7$ .

其中  $Y_{if}^l, Y_{ig}^l$  和  $Y_{iu}^l$  分别为  $\hat{f}_i(q_i, \dot{q}_i), \hat{g}_i(q_i)$  和  $\hat{u}_i(q_i, \dot{q}_i)$  的模糊单点.

对于间接自适应方法,  $\theta_{if}$ ,  $\theta_{ig}$  和  $\delta_i$  分别通过自适应律(11) ~ (13) 更新. 控制器参数设置为

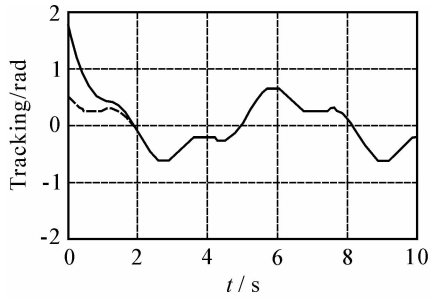
$$K_i^T = [4, 10], r_i = 2\rho^2, Q_i = \text{diag}(10, 10),$$

$$\rho = 0.01, \eta_{if} = 5, \eta_{ig} = 0.05, \eta_{\delta} = 10.$$

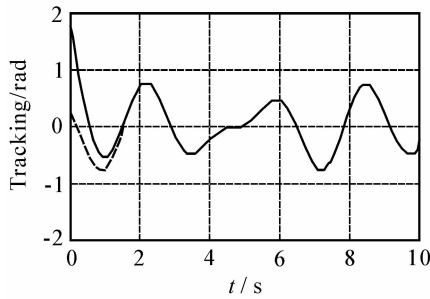
对于直接自适应方法,  $\theta_m$  和  $\delta_i$  分别通过自适应律(30) 和(31) 更新. 控制器参数设置为

$$K_i^T = [4, 10], g_{i0} = 1, r_i = 2\rho^2, \rho = 0.01,$$

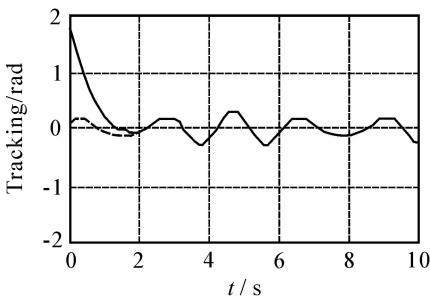
$$Q_i = \text{diag}(10, 10), \eta_m = 10, \eta_{\delta} = 100.$$



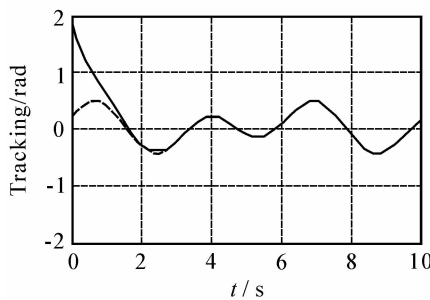
(a) 关节 1



(b) 关节 2



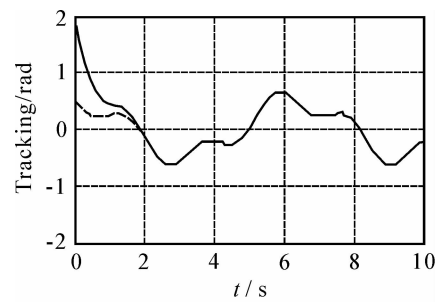
(c) 关节 3



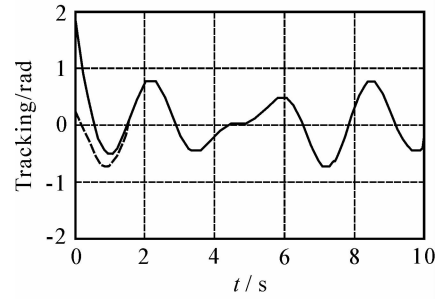
(d) 关节 4

图 2 间接自适应方法的跟踪性能

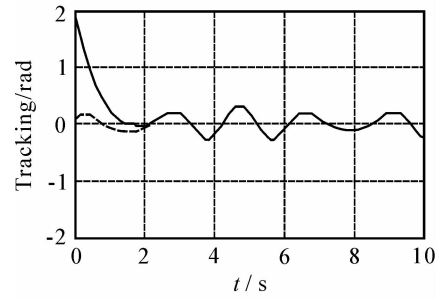
间接和直接自适应方法的轨迹跟踪性能分别如图 2 和图 3 所示. 图中虚线和实线分别表示期望轨迹和实际轨迹.



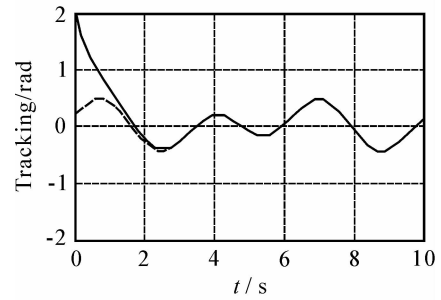
(a) 关节 1



(b) 关节 2



(c) 关节 3



(d) 关节 4

图 3 直接自适应方法的跟踪性能

令不等式(25) 右侧为零, 可得  $\|w\| = \sqrt{\lambda_{\min}(Q)} \|e\| / \rho$ . 因此, 可用系统进入稳态时的  $\sqrt{\lambda_{\min}(Q)} \|e\|_{\max} / \rho$  来近似模糊逼近性能. 对于间接和直接自适应方法, 计算  $\sqrt{\lambda_{\min}(Q)} \|e\|_{\max} / \rho$ , 其结果分别为 1.2608 和 1.4675.

仿真结果表明, 自适应模糊系统具有较好的逼近性能. 在执行器发生故障的情况下, 间接和直接自适应方法均能实现高精度的轨迹跟踪, 且有很强的容错能力.

(下转第 1256 页)