

文章编号: 1001-0920(2009)03-0429-06

基于观测器的可重构机械臂分散自适应模糊控制

朱明超^a, 李英^a, 李元春^a, 姜日花^b

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

摘要: 提出一种基于观测器的可重构机械臂分散自适应模糊控制方案. 将可重构机械臂的动力学描述为一个交联子系统的集合, 子系统控制器由自适应模糊系统和鲁棒控制项组成. 基于状态观测器观测值构建的自适应模糊系统用于逼近子系统动力学模型和交联项, 鲁棒控制项用于抵消模糊逼近误差对轨迹跟踪的影响. 数值仿真证明了所提出的分散控制方案的有效性.

关键词: 模糊控制; 自适应控制; 观测器; 可重构机械臂

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Observer-based decentralized adaptive fuzzy control for reconfigurable manipulator

ZHU Ming-chao^a, LI Ying^a, LI Yuan-chun^a, JIANG Ri-hua^b

(a. College of Communication Engineering, b. China-Japan Union Hospital, Jilin University, Changchun 130033, China. Correspondent: JIANG Ri-hua, E-mail: jrhl963@163.com)

Abstract: An observer based decentralized adaptive fuzzy controller for reconfigurable manipulator is proposed. The dynamics of reconfigurable manipulators is represented as a set of interconnected subsystems. The subsystem controller consists of adaptive fuzzy systems and robust term. By designing the state observer, the adaptive fuzzy systems which are used to model the unknown dynamics of subsystem and the interconnection term can be constructed by using the state estimations. The effect of fuzzy approximation error is removed by employing the robust term. Simulation examples illustrate the effectiveness of the proposed decentralized controller.

Key words: Fuzzy control; Adaptive control; Observer; Reconfigurable manipulator

1 引言

可重构机械臂是由一组具有标准接口且可互换的关节模块和连杆模块组成. 这些模块能快速装配成适合不同任务的几何构形^[1]. 与固定结构的工业机械臂相比, 可重构机械臂适应的工作范围更加广泛, 并且成本低, 易修改, 易维护, 便于携带.

一些文献给出了几种可重构机械臂的控制方案. 文献[2]提出一种基于递阶结构的模糊神经网络控制; [3]针对建模过程中产生的模型不确定性, 设计了基于计算力矩的鲁棒模糊神经网络控制; [4]设计出一种由 PID 控制器和鲁棒控制单元组成的独立关节控制; [5]提出一种基于关节力矩传感器的可重构模块机器人分布式控制. 这些方法或需要采集所有模块的状态信息, 或需要引入额外的传感器, 不利于模块化控制器的设计. 最近, 分散控制在机械臂

中的应用引起人们的重视^[6,7]. 分散控制不仅结构简单, 而且更具柔性, 适合于软件模块化的思想.

本文提出一种基于观测器的可重构机械臂分散自适应模糊控制方案. 该方案不需要根据机械臂构形的变化改变子系统控制器参数, 可以方便地应用于不同的机械臂构形.

2 问题描述

n 自由度可重构机械臂的动力学模型为

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

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, $F(q, \dot{q}) \in R^n$ 为摩擦项, $u \in R^n$ 为关节力矩向量.

为了分解模型, 将式(1)改写为

收稿日期: 2008-02-15; 修回日期: 2008-05-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60375030, 60674091).

作者简介: 朱明超(1980—), 男, 长春人, 博士生, 从事模块机器人运动学、动力学与控制方法的研究; 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.

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

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

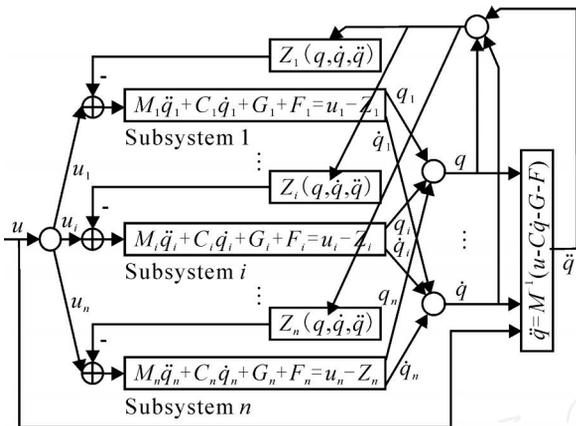


图1 系统结构框图

将每个关节模块考虑为一个子系统,如图1所示.从式(2)分离出局部变量 $(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i)$,子系统的动力学模型可描述为^[7]

$$\begin{aligned}
 & M_i(q_i) \ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i) \dot{q}_i + \bar{G}_i(q_i) + \\
 & F_i(q_i, \dot{q}_i) + Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = u_i, \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \\
 & \left\{ \sum_{j=1, j \neq i}^n M_{ij}(q) \ddot{q}_j + [M_{ii}(q) - M_i(q_i)] \ddot{q}_i \right\} + \\
 & \left\{ \sum_{j=1, j \neq i}^n C_{ij}(q, \dot{q}) \dot{q}_j + [C_{ii}(q, \dot{q}) - C_i(q_i, \dot{q}_i)] \dot{q}_i \right\} + \\
 & [\bar{G}_i(q) - G_i(q_i)]. \quad (4)
 \end{aligned}$$

设 $x_i = [q_i, \dot{q}_i]^T, i = 1, 2, \dots, n$, 则式(3)可表示为如下状态空间的形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = A_i x_i + B_i [f_i(q_i, \dot{q}_i) + \\ S_i \{ g_i(q_i) u_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) \}, \\ y_i = C_i x_i. \end{cases} \quad (5)$$

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, $h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 为子系统交联项,且

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

$$\begin{aligned}
 f_i(q_i, \dot{q}_i) &= M_i^{-1}(q_i) [-C_i(q_i, \dot{q}_i) \dot{q}_i - \\
 & G_i(q_i) - F_i(q_i, \dot{q}_i)], \\
 g_i(q_i) &= M_i^{-1}(q_i), \\
 h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) &= -M_i^{-1}(q_i) Z_i(q, \dot{q}, \ddot{q}).
 \end{aligned}$$

控制目标是在关节速度不可测的情况下设计分散控制律,使可重构机械臂跟踪期望轨迹 y_{ir} , 保证闭环系统稳定,并且轨迹跟踪误差最终一致有界.

3 基于观测器的分散自适应模糊控制

定义第 i 个子系统的跟踪误差为 $e_{i1} = y_i - y_{ir}$, $e_{i2} = \dot{y}_i - \dot{y}_{ir}$, 跟踪误差向量为 $e_i = [e_{i1}, e_{i2}]^T$.

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

定义滤波误差

$$s_i = e_{i2} + c_i e_{i1}, \quad (6)$$

其中 c_i 为一个正常数.

假设2 交联项 $h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 有界,且满足

$$|h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})| \leq \alpha + \sum_{j=1}^n \beta_{ij} (|s_j|). \quad (7)$$

其中: $\alpha > 0$ 为未知常数, $\beta_{ij} (|s_j|) \geq 0$ 为未知的光滑 Lipschitz 函数.

由式(5)可得误差方程

$$\begin{aligned}
 \dot{e}_i &= A_i e_i + B_i [f_i(q_i, \dot{q}_i) + g_i(q_i) u_i + \\
 & h_i(q, \dot{q}, \ddot{q}) - \ddot{y}_{ir}]. \quad (8)
 \end{aligned}$$

设 \hat{e}_{i1} 和 \hat{e}_{i2} 分别为 e_{i1} 和 e_{i2} 的观测值, $\hat{e}_i = [\hat{e}_{i1}, \hat{e}_{i2}]^T$ 为误差向量 e_i 的观测值, $\hat{q}_i = \hat{e}_{i2} + \dot{y}_{ir}$ 为 \dot{q}_i 的观测值.采用模糊系统 $f_i(q, \hat{q}_i, \hat{\Delta}_{if})$ 和 $g_i(q_i, \hat{\Delta}_{ig})$ 逼近未知项 $f_i(q_i, \dot{q}_i)$ 和 $g_i(q_i)$, 有

$$f_i(q_i, \hat{q}_i, \hat{\Delta}_{if}) = \Delta_{if}^T \varphi_{if}(q_i, \hat{q}_i), \quad (9)$$

$$g_i(q_i, \hat{\Delta}_{ig}) = \Delta_{ig}^T \varphi_{ig}(q_i). \quad (10)$$

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

采用模糊系统 $\hat{p}_i(|\hat{s}_i|, \hat{\Delta}_{ip})$ 补偿交联项的影响,有

$$\hat{p}_i(|\hat{s}_i|, \hat{\Delta}_{ip}) = \Delta_{ip}^T \varphi_{ip}(|\hat{s}_i|). \quad (11)$$

其中: Δ_{ip} 为可调参数向量, $\varphi_{ip}(|\hat{s}_i|)$ 为模糊基函数向量, $\hat{s}_i = \hat{e}_{i2} + c_i \hat{e}_{i1}$ 为滤波误差 s_i 的估计值.

定义最优参数向量如下:

$$\begin{aligned}
 \hat{\Delta}_{if}^* &= \\
 & \arg \min_{\hat{\Delta}_{if}} \{ \sup_{x_i} \inf_{\hat{\Delta}_{if}} | f_i(q_i, \dot{q}_i, \hat{\Delta}_{if}) - f_i(q_i, \dot{q}_i) | \}, \\
 \hat{\Delta}_{ig}^* &= \\
 & \arg \min_{\hat{\Delta}_{ig}} \{ \sup_{q_i} \inf_{\hat{\Delta}_{ig}} | g_i(q_i, \hat{\Delta}_{ig}) - g_i(q_i) | \}, \\
 \hat{\Delta}_{ip}^* &= \\
 & \arg \min_{\hat{\Delta}_{ip}} \{ \sup_{\hat{s}_i} \inf_{\hat{\Delta}_{ip}} | \hat{p}_i(|\hat{s}_i|, \hat{\Delta}_{ip}) - p_i(|\hat{s}_i|) | \}.
 \end{aligned}$$

其中 $\hat{\Delta}_{if}, \hat{\Delta}_{ig}, \hat{\Delta}_{ip}$ 和 U_{if}, U_{ig}, U_{ip} 分别为 $\hat{\Delta}_{if}, \hat{\Delta}_{ig}, \hat{\Delta}_{ip}$ 和 x_i, q_i, \hat{s}_i 的约束集.

假设3 $\hat{\Delta}_{if}^*, \hat{\Delta}_{ig}^*$ 和 $\hat{\Delta}_{ip}^*$ 满足 $\hat{\Delta}_{if}^T M_{if}, \hat{\Delta}_{ig}^T M_{ig}, \hat{\Delta}_{ip}^T M_{ip}$. 其中 M_{if}, M_{ig} 和 M_{ip} 为未知常数.

定义最小逼近误差

$$\begin{aligned}
 w_{i1} &= [f_i(q_i, \dot{q}_i) - f_i(q_i, \dot{q}_i, \hat{\Delta}_{if}^*)] + \\
 & [g_i(q_i) - g_i(q_i, \hat{\Delta}_{ig}^*)] u_i, \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$w_{2} = p_i(|\hat{s}_i|) - \hat{p}_i(|\hat{s}_i|, \hat{i}_p). \quad (13)$$

其中 $p_i(|\hat{s}_i|)$ 为未知函数,将在后面定义.

假设 4 模糊逼近误差 w_{n1} 和 w_{n2} 有界,即 $|w_{n1}| \leq \delta_i^*$, $|w_{n2}| \leq \delta_i^*$. 其中 δ_i^* 和 δ_i^* 为未知常数.

设计误差观测器

$$\begin{aligned} \dot{\hat{e}}_i &= A_i \hat{e}_i + \lambda_i(e_{n1} - \hat{e}_{n1}) + \\ & B_i[f_i(q_i, \hat{q}_i, \hat{\Delta}_{if}) + g_i(q_i, \hat{\Delta}_{ig}) u_i - \ddot{y}_{ir}]. \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $0 < \lambda_i \ll 1$, $\lambda_i(\cdot) = [\lambda_{i1}/s, \lambda_{i2}/s^2]^T$.

分散控制律设计为

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{1}{g_i(q_i, \hat{\Delta}_{ig})} [-f_i(q_i, \hat{q}_i, \hat{\Delta}_{if}) + \\ & \ddot{y}_{ir} - k_i \hat{s}_i - c_i \hat{e}_{n1} - \hat{s}_i \hat{p}_i(|\hat{s}_i|, \hat{\Delta}_{ip}) + \\ & u_{ic} - \frac{\delta_i}{2}(e_{n1} - \hat{e}_{n1})], \end{aligned} \quad (15)$$

$$u_{ic} = -\lambda_i^2 \frac{\hat{s}_i}{\lambda_i/|\hat{s}_i| + \vartheta} - \hat{\Delta}_{is}. \quad (16)$$

其中 $\hat{\Delta}_{if}, \hat{\Delta}_{ig}, \hat{\Delta}_{ip}$ 和 $\hat{\Delta}_i, \hat{\Delta}_i$ 分别为 $\hat{\Delta}_{if}^*, \hat{\Delta}_{ig}^*, \hat{\Delta}_{ip}^*$ 和 $\hat{\Delta}_i^*, \hat{\Delta}_i^*$ 的估计值; $\vartheta > 0$ 为设计参数. 估计误差定义为

$$\begin{aligned} \tilde{\Delta}_{if} &= \hat{\Delta}_{if} - \Delta_{if}^*, \quad \tilde{\Delta}_{ig} = \hat{\Delta}_{ig} - \Delta_{ig}^*, \quad \tilde{\Delta}_{ip} = \hat{\Delta}_{ip} - \Delta_{ip}^*, \\ \tilde{\Delta}_i &= \hat{\Delta}_i - \Delta_i^*, \quad \tilde{\Delta}_i = \hat{\Delta}_i - \Delta_i^*. \end{aligned}$$

$\hat{\Delta}_{if}, \hat{\Delta}_{ig}, \hat{\Delta}_{ip}$ 和 $\hat{\Delta}_i, \hat{\Delta}_i$ 按如下自适应律更新:

$$\dot{\hat{\Delta}}_{if} = \lambda_{if} \hat{s}_i \tilde{\Delta}_{if}(q_i, \hat{q}_i), \quad (17)$$

$$\dot{\hat{\Delta}}_{ig} = \lambda_{ig} \hat{s}_i \tilde{\Delta}_{ig}(q_i) u_i, \quad (18)$$

$$\dot{\hat{\Delta}}_{ip} = \lambda_{ip} \hat{s}_i^2 \tilde{\Delta}_{ip}(|\hat{s}_i|), \quad (19)$$

$$\dot{\hat{\Delta}}_i = \lambda_i |\hat{s}_i|, \quad (20)$$

$$\dot{\hat{\Delta}}_i = \lambda_i \hat{s}_i^2. \quad (21)$$

其中 $\lambda_{if}, \lambda_{ig}, \lambda_{ip}, \lambda_i$ 和 λ_i 为正常数.

将 u_i 代入观测器方程(14),可得

$$\begin{aligned} \dot{\hat{e}}_i &= -k_i \hat{s}_i - \hat{s}_i \hat{p}_i(|\hat{s}_i|, \hat{\Delta}_{ip}) + u_{ic} + \\ & \tilde{\Delta}_{if}^T \tilde{f}_i(q_i, \hat{q}_i) + \tilde{\Delta}_{ig}^T \tilde{g}_i(q_i) u_i + \Phi_i, \end{aligned} \quad (22)$$

其中

$$\Phi_i = -\tilde{\Delta}_{if}^T \tilde{f}_i(q_i, \hat{q}_i) - \tilde{\Delta}_{ig}^T \tilde{g}_i(q_i) u_i.$$

假设 5 Φ_i 为有界信号,即满足 $|\Phi_i| \leq \delta_i^*$.

定义观测误差

$$\begin{aligned} \tilde{e}_i &= e_i - \hat{e}_i, \quad \tilde{e}_{n1} = e_{n1} - \hat{e}_{n1}, \quad \tilde{e}_{n2} = e_{n2} - \hat{e}_{n2}. \end{aligned} \quad (23)$$

则观测误差动力学可表示为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{e}}_i &= A_i \tilde{e}_i - \lambda_i(\cdot) \tilde{e}_{n1} + B_i\{[f_i(q_i, \dot{q}_i) - \\ & f_i(q_i, \hat{q}_i, \hat{\Delta}_{if})] + [g_i(q_i) - \\ & g_i(q_i, \hat{\Delta}_{ig})] u_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})\}. \end{aligned} \quad (24)$$

设

$$v_i = \tilde{e}_i^T \tilde{M}_i^{-1} \tilde{e}_i = \tilde{e}_i^T [\tilde{f}_i(q_i, \dot{q}_i) - \tilde{f}_i(q_i, \hat{q}_i)].$$

由假设 3 可知, $|v_i| \leq \delta_i^* \tilde{M}_i^{-1} M_{if} b_{if}$, 其中 b_{if} 为有界正常数. 重写观测误差动力学

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{e}}_i &= A_i \tilde{e}_i - \lambda_i(\cdot) \tilde{e}_{n1} + B_i[w_{n1} + \\ & v_i - \Phi_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})]. \end{aligned} \quad (25)$$

设

$$\tilde{u}_j = \frac{1}{2} \tilde{e}_j^T \tilde{u}_j, \quad \tilde{u}_i = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{i1} \\ \tilde{u}_{i2} \end{bmatrix}, \quad j = 1, 2.$$

则式(25) 可变为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{e}}_i &= A_i \tilde{e}_i - \text{diag}(\lambda_{i1}, \lambda_{i2}) \tilde{e}_{n1} + \\ & B_i[w_{n1} + v_i - \Phi_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})]. \end{aligned} \quad (26)$$

选择 \tilde{u}_{i1} 和 \tilde{u}_{i2} , 使矩阵

$$P_i = \begin{bmatrix} -\lambda_{i1} & 1 \\ -\lambda_{i2} & 0 \end{bmatrix}$$

满足 Riccati 方程

$$P_i^T P_i + P_i A_i = -I_2 \otimes \delta_i, \quad (27)$$

其中 $P_i = P_i^T > 0$. 于是式(26) 可变为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{e}}_i &= \tilde{A}_i \tilde{e}_i + B_i[w_{n1} + v_i - \\ & \Phi_i + h_i(q, \dot{q}, \ddot{q})]. \end{aligned} \quad (28)$$

定理 1 考虑可重构机械臂的子系统动力学

(3) 和所有假设条件, 如果设计式(15) 和(16) 的分散控制律, 式(17) ~ (21) 的自适应律, 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 $V = \sum_{i=1}^n (V_{n1} + V_{n2})$. 其中

$$\begin{aligned} V_{n1} &= \frac{1}{2} \hat{s}_i^2 + \frac{1}{2} \tilde{\Delta}_{if}^T \tilde{\Delta}_{if} + \frac{1}{2} \tilde{\Delta}_{ig}^T \tilde{\Delta}_{ig} + \\ & \frac{1}{2} \tilde{\Delta}_{ip}^T \tilde{\Delta}_{ip} + \frac{1}{2} \tilde{\Delta}_i^2 + \frac{1}{2} \tilde{\Delta}_i^2, \end{aligned}$$

$$V_{n2} = \tilde{e}_i^T P_i \tilde{e}_i.$$

求 V_{n1} 对时间的导数, 应用自适应律(17), (18) 和(20), 并进行简单的数学操作, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{n1} &= k_i \hat{s}_i^2 - \hat{s}_i^2 \hat{\Delta}_{ip}^T \tilde{\Delta}_{ip}(|\hat{s}_i|) + |\hat{s}_i| \hat{\Delta}_i - \\ & \frac{\lambda_i^2 \hat{s}_i^2}{\lambda_i/|\hat{s}_i| + \vartheta} - \hat{\Delta}_{is}^2 - \frac{1}{\lambda_{ip}} \tilde{\Delta}_{ip}^T \tilde{\Delta}_{ip} - \frac{1}{\lambda_i} \tilde{\Delta}_i^2 \\ & - k_i \hat{s}_i^2 - \hat{s}_i^2 \hat{\Delta}_{ip}^T \tilde{\Delta}_{ip}(|\hat{s}_i|) + \vartheta - \hat{\Delta}_{is}^2 - \\ & \frac{1}{\lambda_{ip}} \tilde{\Delta}_{ip}^T \tilde{\Delta}_{ip} - \frac{1}{\lambda_i} \tilde{\Delta}_i^2. \end{aligned} \quad (29)$$

求 V_{n2} 对时间的导数, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{n2} &= -\frac{1}{2} \tilde{e}_i^T \tilde{e}_i^2 + 2 \tilde{e}_i^T P_i B_i / (|w_{n1}| + |v_i| + \\ & |\Phi_i| + \delta_0) + 2 \sum_{j=1}^n \tilde{e}_i^T P_i B_i / \tilde{u}_j(|s_j|). \end{aligned} \quad (30)$$

由于 $\| \dot{y}_j / s_j \|$ 是 Lipschitz 的, 可知

$$\| \dot{y}_j / s_j \| - \dot{y}_j / \hat{s}_j \| \leq L_{ij} \| s_j - \hat{s}_j \|, \quad (31)$$

其中 $L_{ij} > 0$ 为 Lipschitz 常数.

综合式(30)和(31)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i2} &\leq -\frac{1}{2} \dot{e}_i^2 + 2 \| P_i B_i \|^T (\| w_{i1} \| + \| v_i \| + \\ &\| \phi_i \| + \delta_0) + 2 \| P_i B_i \|^T \sum_{j=1}^n [\dot{y}_j / \hat{s}_j \| + \\ &L_{ij} \| s_j - \hat{s}_j \|]. \end{aligned} \quad (32)$$

并有

$$\begin{aligned} \| s_j - \hat{s}_j \| &= \\ \| \tilde{s}_j \| &= [c_j, 1]^T \mu_j \quad j = 1, \dots, n, \end{aligned} \quad (33)$$

其中 $\mu_j = [c_j, 1]^T$.

因为 $\| \dot{y}_j / \hat{s}_j \|$ 是光滑函数, 所以存在函数

\dot{y}_j / \hat{s}_j , 使如下等式成立:

$$\dot{y}_j / \hat{s}_j = \| \dot{y}_j / \hat{s}_j \| \mu_j. \quad (34)$$

由式(32)~(34)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i2} &\leq -\frac{1}{2} \dot{e}_i^2 + \\ &\sum_{j=1}^n [2 \| P_i B_i \|^T \| \mu_j \| \| \dot{y}_j / \hat{s}_j \| + \\ &2 \| P_i B_i \|^T L_{ij} \mu_j^T \mu_j + 2 \| P_i B_i \|^T \delta_0], \end{aligned} \quad (35)$$

其中

$$\mu_j = [P_i B_i \|^T (\dot{e}_i^* + M_{if} b_{if} + \dot{e}_i^* + \delta_0)]^T.$$

使用 Young 不等式 $2ab \leq a^2/\gamma + b^2(\gamma > 0)$, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i2} &\leq \sum_{i=1}^n \left[-\left(\frac{1}{2} - 2n \| P_i B_i \|^2 - \right. \right. \\ &\left. \sum_{j=1}^n L_{ji}^2 \mu_i^T \mu_i \right) \dot{e}_i^2 + 2 \delta_0^2 + \\ &\left. \sum_{j=1}^n \frac{2}{j} (\| \dot{y}_j / \hat{s}_j \| \delta_0^2) \right]. \end{aligned} \quad (36)$$

令

$$\frac{2}{j} (\| \dot{y}_j / \hat{s}_j \|) = p_i (\| \dot{y}_j / \hat{s}_j \|) = \hat{p}_i (\| \dot{y}_j / \hat{s}_j \|, \dot{e}_i^*),$$

综合式(29)和(36), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \sum_{i=1}^n \left[-k \dot{e}_i^2 + \delta_i^T \tilde{\Lambda}_{ip}^T (\| \dot{y}_j / \hat{s}_j \|) + \delta + \right. \\ &\tilde{\delta}_i^2 - \frac{1}{ip} \tilde{\Lambda}_{ip}^T \dot{\Lambda}_{ip} - \frac{1}{i} \tilde{\Lambda}_{ip}^T \dot{\Lambda}_{ip} + 2 \delta_0^2 - \\ &\left. \left(\frac{1}{2} - 2n \| P_i B_i \|^2 - \sum_{j=1}^n L_{ji}^2 \mu_i^T \mu_i \right) \dot{e}_i^2 \right]. \end{aligned} \quad (37)$$

将式(19)和(21)代入不等式(37), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \sum_{i=1}^n \left[-k \dot{e}_i^2 - \left(\frac{1}{2} - 2n \| P_i B_i \|^2 - \right. \right. \\ &\left. \sum_{j=1}^n L_{ji}^2 \mu_i^T \mu_i \right) \dot{e}_i^2 + \delta + 2 \delta_0^2 \right]. \end{aligned} \quad (38)$$

设

$$\alpha_i^* = \frac{1}{2 \max \{ 2n \| P_i B_i \|^2 + \sum_{j=1}^n L_{ji}^2 \mu_i^T \mu_i + \min \{ k_i \} \}},$$

对于 $\forall i$, 满足 $0 < \alpha_i^* < 1$, 有

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \sum_{i=1}^n \left[-\min \{ k_i \} \dot{e}_i^2 - \min \{ k_i \} \dot{e}_i^2 + \delta + 2 \delta_0^2 \right] \\ &- \min \{ k_i \} \dot{e}_i^2 - \min \{ k_i \} \dot{e}_i^2 + n\delta + 2 \sum_{i=1}^n \delta_0^2. \end{aligned} \quad (39)$$

其中

$$\delta = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n]^T, \quad \alpha_i = [\alpha_1^T, \alpha_2^T, \dots, \alpha_n^T]^T.$$

因此在紧集

$$\Omega = \left\{ \delta, \dot{e}_i^2 + \frac{n\delta + 2 \sum_{i=1}^n \delta_0^2}{\min \{ k_i \}} \right\}$$

之外, \dot{V} 是负定的. 根据 Lyapunov 稳定性理论, 闭环系统是稳定的. 因为 $\dot{e}_{i1} = -c_i e_{i1} + \delta_i + \tilde{e}_{i1}$, $\tilde{e}_{i1} = \frac{1}{c_i} \dot{e}_{i1}$, 所以跟踪误差 $e_{i1} = \hat{e}_{i1} + \tilde{e}_{i1}$ 最终一致有界, 且收敛于紧集

$$\begin{aligned} e_{i1} &= \left\{ e_{i1} \mid e_{i1} \leq \right. \\ &\left. \left(\frac{1}{c_i} + \frac{1}{c_i} + \right) \sqrt{\frac{n\delta + 2 \sum_{i=1}^n \delta_0^2}{\min \{ k_i \}}} \right\}. \end{aligned} \quad (40)$$

由此定理得证.

注1 在控制输入有界的情况下, 可采用与文献[7]中引理1类似的方法证明假设2成立.

注2 在实际应用中, 可对自适应律(17)~(19)应用投影算法, 保证 $\hat{\Lambda}_{if}^*$, $\hat{\Lambda}_{ig}^*$ 和 $\hat{\Lambda}_{ip}^*$ 有界. 由假设3可知, $\tilde{\Lambda}_{if}^* = \Lambda_{if}^* - \hat{\Lambda}_{if}^*$ 和 $\tilde{\Lambda}_{ig}^* = \Lambda_{ig}^* - \hat{\Lambda}_{ig}^*$ 有界. 因为模糊基函数向量有界, 所以在控制输入有界的情况下, 假设5是成立的.

4 数值仿真

为验证本文提出的基于观测器的分散自适应模糊控制的有效性, 将其应用于图2所示的两个不同构形的二自由度可重构机械臂. 模块参数和动力学建模过程参见文献[8].

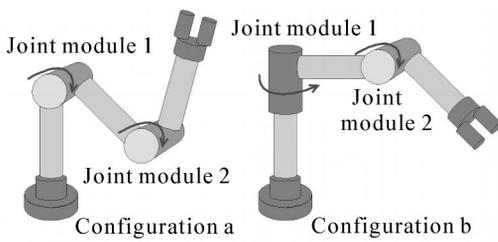


图 2 仿真构形

构形 a 的期望轨迹为

$$y_{1r} = 0.5\cos(t) - 0.2\sin(3t),$$

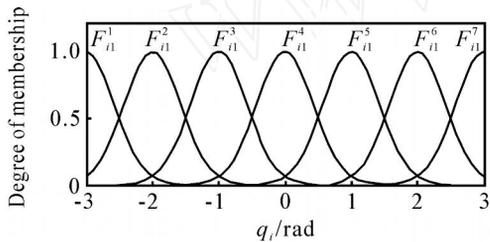
$$y_{2r} = 0.3\cos(3t) - 0.5\sin(2t).$$

构形 b 的期望轨迹为

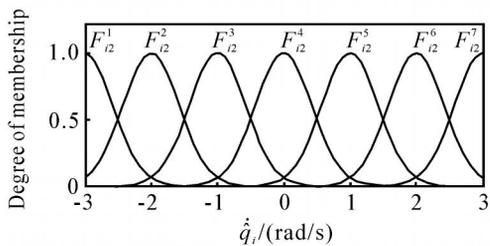
$$y_{1r} = 0.2\sin(3t) + 0.1\cos(4t),$$

$$y_{2r} = 0.3\sin(2t) + 0.2\cos(t).$$

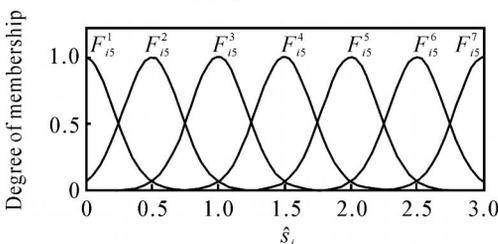
两种构形的初始位置设置为 $q_1(0) = q_2(0) = 2$, 初始速度设置为 $\dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0) = 0$, 观测器的初始状态设置为 $\hat{e}_{i1}(0) = \hat{e}_{i2}(0) = 0$. 对于各个子系统, 分别用图 3 的 7 个模糊集合对变量 q_i, \dot{q}_i 和 \hat{s}_i 进行模糊化.



(a) q_i 的模糊集合



(b) \dot{q}_i 的模糊集合



(c) \hat{s}_i 的模糊集合

图 3 模糊控制器隶属度函数

相应的模糊规则基定义如下:

$f_i(q_i, \dot{q}_i)$: 如果 q_i 是 F_{i1}^l , 且 \dot{q}_i 是 F_{i2}^l , 则 $f_i(q_i,$

$\dot{q}_i)$ 是 $Y_{if}^l, l = 1, 2, \dots, 7;$

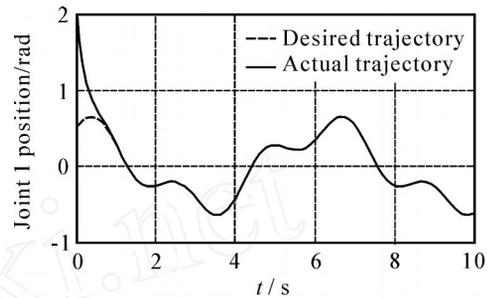
$g_i(q_i)$: 如果 q_i 是 F_{i1}^l , 则 $g_i(q_i)$ 是 $Y_{ig}^l, l = 1, 2,$

$\dots, 7;$

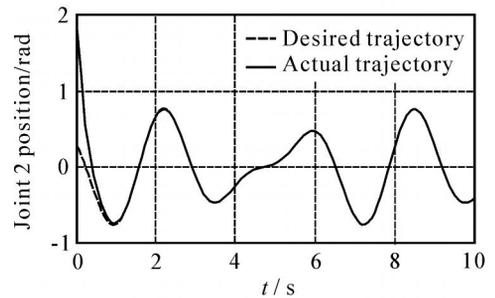
$p_i(|\hat{s}_i|)$: 如果 $|\hat{s}_i|$ 是 F_{i5}^l , 则 $p_i(|\hat{s}_i|)$ 是 $Y_{ip}^l, l = 1, 2, \dots, 7.$

其中: F_{i1}^l, F_{i2}^l 和 F_{i5}^l 为模糊集合, 它们的隶属度函数示于图 3; Y_{if}^l, Y_{ig}^l 和 Y_{ip}^l 为 $f_i(q_i, \dot{q}_i), g_i(q_i)$ 和 $p_i(|\hat{s}_i|)$ 的模糊单点.

$\hat{\alpha}_{if}^l, \hat{\alpha}_{ig}^l$ 和 $\hat{\alpha}_{ip}^l$ 的初始值设置为 1; $\hat{\alpha}_i$ 和 $\hat{\alpha}_i$ 的初始值设置为 0. 自适应增益为 $\alpha_{if} = 5, \alpha_{ig} = 0.05, \alpha_{ip} = 100, \alpha_i = 50, \alpha_i = 5.$ 由理论分析可知, 观测器参数

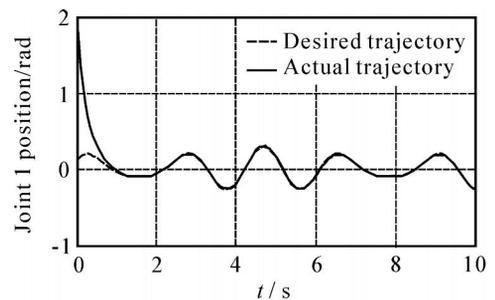


(a) 关节 1 位置

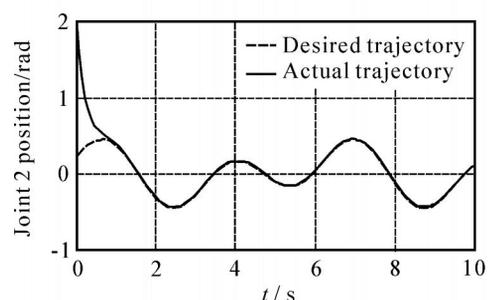


(b) 关节 2 位置

图 4 构形 a 的跟踪性能



(a) 关节 1 位置



(b) 关节 2 位置

图 5 构形 b 的跟踪性能

应选很小的数值, a_1 和 a_2 应使矩阵 A_i 满足 Riccati 方程(27). 控制器参数的选择应满足 $k_i > 0, c_i > 0, \delta > 0$. 仿真中, 观测器和控制器参数设置如下:

$$\begin{aligned} &= 0.005, \quad a_1 = 10, \quad a_2 = 25, \\ &k_i = 5, \quad c_i = 5, \quad \delta = 0.01. \end{aligned}$$

两种构形的轨迹跟踪性能分别示于图4和图5. 仿真结果表明, 所提出的分散控制方案在不修改任何控制参数的情况下, 可实现对不同机械臂构形的控制.

5 结 论

本文提出一种基于观测器的可重构机械臂分散自适应模糊控制方案. 该控制方案不需要机械臂的动力学模型, 可应用于不同的机械臂构形. 控制器中自适应参数的更新基于 Lyapunov 稳定性理论设计, 可保证整个系统的稳定性和轨迹跟踪性能. 通过两个不同构形的二自由度可重构机械臂的数值仿真, 验证了所提出的分散控制方案的可行性.

参考文献(References)

- [1] Paredis C J J, Brown H B, Khosla P K. A rapidly deployable manipulator system [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1997, 21: 289-304.
- [2] Melek W W, Goldenberg A A. Neurofuzzy control of modular and reconfigurable robots [J]. *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 2003, 8(3): 381-389.
- [3] 李英, 朱明超, 李元春. 可重构机械臂鲁棒模糊神经补偿控制仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(22): 5169-5174.
(Li Y, Zhu M C, Li Y C. Simulation on robust neurofuzzy compensator for reconfigurable manipulator motion control [J]. *J of System Simulation*, 2007, 19(22): 5169-5174.)
- [4] Kirchoff S, Melek W W. A saturation-type robust controller for modular manipulators arms [J]. *Mechatronics*, 2007, 17: 175-190.
- [5] Liu G J, Abdul S, Goldenberg A A. Distributed control of modular and reconfigurable robot with torque sensing [J]. *Robotica*, 2008, 26: 75-84.
- [6] Hsu S, Fu L. A fully adaptive decentralized control of robot manipulators [J]. *Automatica*, 2006, 42: 1761-1767.
- [7] Tang Y, Tomizuka M, Guerrero G, et al. Decentralized robust control of mechanical systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(4): 771-775.
- [8] Zhu M C, Li Y, Li Y C. A new distributed control scheme of modular and reconfigurable robots [C]. *Proc of the IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation*. Harbin, 2007: 2622-2627.
- [1] Paredis C J J, Brown H B, Khosla P K. A rapidly deployable manipulator system [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1997, 21: 289-304.
- [2] Melek W W, Goldenberg A A. Neurofuzzy control of modular and reconfigurable robots [J]. *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 2003, 8(3): 381-389.
- [3] Dawson D W, Askin R G. Optimal new product design using quality function deployment with empirical value functions [J]. *Quality and Reliability Engineering*, 1999, 15(1): 17-32
- [4] 汪峥, 严洪森, 刘霞岭, 等. 并行工程产品开发过程定量建模与计划制订[J]. *管理科学学报*, 2000, 3(4): 46-59.
(Wang Z, Yan H S, Liu X L, et al. Quantitative modeling and planning of the product development process in concurrent engineering [J]. *J of Management Sciences*, 2000, 3(4): 46-59.)
- [5] Tareghian R H, Taheri S H. On the discrete time, cost and quality trade-off problem [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 181(2): 1305-1312.
- [6] 刘士新, 王梦光, 聂义勇. 多执行模式资源受限工程调度问题的优化算法[J]. *系统工程学报*, 2001, 16(1): 55-60.
(Liu S X, Wang M G, Nie Y Y. Optimization algorithm for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problem [J]. *J of Systems Engineering*, 2001, 16(1): 55-60.)
- [7] 唐加福, 庞士宗, 汪定伟, 等. 利用品质功能展开进行产品优化设计[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(3): 105-109.
(Tang J F, Pang S Z, Wang D W, et al. Product optimization design using quality function deployment [J]. *J of Mechanical Engineering*, 2003, 39(3): 105-109.)
- [8] Kis T. A branch-and-cut algorithm for scheduling of projects with variable-intensity activities [J]. *Mathematical Programming*, 2005, 103(3): 519-539.
- [9] Kolisch R. Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: Theory and computation [J]. *European J of Operational Research*, 1996, 90(2): 320-333.

(上接第428页)