

空间三关节机器人自适应双模糊滑模控制

胡盛斌^{1,2}, 陆敏恂¹

(1. 同济大学 机械工程学院, 上海 201804; 2. 上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201620)

摘要: 为了提高空间三关节机器人轨迹跟踪控制性能, 提出了一种带双模糊自适应控制的滑模控制新方法. 该方法将滑模控制器分为等效控制和切换控制两部分. 采用一个模糊自适应控制器, 根据滑模到达条件对切换增益进行有效估计. 采用另一个模糊自适应控制器, 根据滑模面来调整切换控制项. 这些控制器结合起来消除了抖振, 提高了控制性能. 系统的稳定性通过李亚普诺夫定理证明. 最后进行了仿真实验, 并与其他方法进行了对比分析. 结果表明所提方法是有效的.

关键词: 机器人; 滑模控制; 模糊控制; 抖振

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Adaptive Double Fuzzy Sliding Mode Control for Three-links Spatial Robot

HU Shengbin^{1,2}, LU Minxun¹

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to improve the performance of tracking controller of three-links spatial robot, a new adaptive double fuzzy sliding mode controller is proposed. The controller is divided into two parts: equivalent controller and corrective controller. A fuzzy controller is designed to estimate the magnitude of switching gain of corrective controller based on sliding mode reaching conditions. Another fuzzy controller is designed to adjust corrective controller based on sliding mode surface. These controllers are then combined in order to eliminate the chattering, and enhance the performance. Lyapunov theorem is used to prove the stability of control system. Finally, simulation experiment and comparative analysis are carried out. The results show that the proposed control scheme is effective.

Key words: robot; sliding mode control; fuzzy control; chattering

机器人系统是一个复杂的多输入多输出非线性系统, 具有时变、强耦合和非线性动力学特性, 其控制非常复杂. 滑模控制本质上是一类特殊的非线性控制, 因具有强鲁棒性而成为一种有效的控制方法^[1]. 模糊控制不需要被控对象的数学模型, 能充分应用控制专家的知识, 并具有较好的鲁棒性, 在相关控制领域表现出较多的优势. 模糊滑模控制结合了模糊控制和滑模控制的优点, 是目前滑模控制方面的研究热点, 并广泛应用于机器人、飞行器、伺服系统等领域中^[2-8]. 文献[6]提出了一种模糊滑模控制方法, 该方法结合了传统滑模控制和模糊控制的优点, 提高了系统的性能. 文献[7]针对多输入多输出非线性系统, 提出了一种自适应模糊终端滑模控制方法, 模糊控制用于有效减弱抖振和提高控制性能. 文献[8]针对空间三关节机器人轨迹跟踪控制, 提出了一种双模糊滑模控制方法, 采用2个模糊控制器根据跟踪误差分别调整切换增益和滑模面的斜率, 从而提高了控制性能.

本文在此研究的基础上, 提出了一种带双模糊自适应控制的滑模控制新方法. 该方法将滑模控制器分为等效控制和切换控制两部分. 采用一个模糊自适应控制器, 根据滑模到达条件对切换增益进行有效估计. 采用另一个模糊自适应控制器, 根据滑模面来调整切换控制项. 与文献[8]所设计的双模糊滑模控制方法相比, 本文所设计的方法缩短了调整时间, 提高了控制精度和鲁棒性.

1 空间三关节机器人动力学模型

空间三关节机器人如图1所示, 利用拉格朗日方法, 可求出其动力学模型如下^[9]:

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) + \tau_d = \tau \quad (1)$$

收稿日期: 2011-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(51175321); 上海市科委科研计划(09170502400)

第一作者: 胡盛斌(1973—), 男, 博士生, 主要研究方向为机器人滑模控制及智能控制. E-mail: hushbin@sohu.com

通讯作者: 陆敏恂(1949—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为工程机械液压系统和液压振动技术.

E-mail: luminxun@tongji.edu.cn

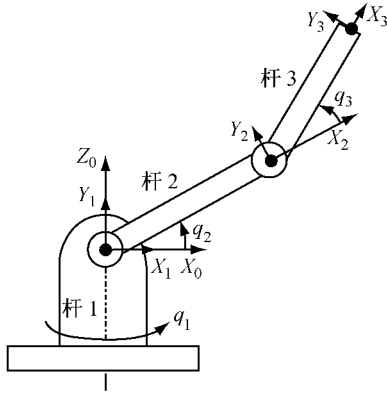


图1 空间三关节机器人

Fig.1 Three-links spatial robot

其中,

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\tau}_d = \begin{bmatrix} \tau_{d1} \\ \tau_{d2} \\ \tau_{d3} \end{bmatrix}$$

$$h_{11} = I_{1y} + (I_{2z} - 2m_2 r_2 l_2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_2^2) \cos^2(q_2) + (I_{3z} - 2m_3 r_3 l_3 + m_3 l_3^2) \cos^2(q_2 + q_3) + (2m_3 l_2 l_3 - 2m_3 l_2 r_3) \cos q_2 \cos(q_2 + q_3),$$

$$h_{12} = h_{21} = h_{13} = h_{31} = 0,$$

$$h_{22} = I_{2x} - 2m_2 r_2 l_2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_2^2 \sin^2 q_2 + (I_{3z} - 2m_3 l_3 + m_3 l_3^2) \sin^2(q_2 + q_3) + (2m_3 l_2 l_3 - 2m_3 l_2) \sin q_2 \sin(q_2 + q_3),$$

$$h_{23} = h_{32} = (I_{3z} - 2m_3 r_3 l_3 + m_3 l_3^2) \sin^2(q_2 + q_3) + (m_3 l_3 l_2 - m_3 r_3 l_2) \sin q_2 \sin(q_2 + q_3),$$

$$h_{33} = I_{3z} - 2m_3 r_3 l_3 + m_3 l_3^2,$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix},$$

$$c_{11} = -(I_{2x} - 2m_2 r_2 l_2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_2^2) \cdot \cos q_2 \sin q_2 - (I_{3z} - 2m_3 r_3 l_3 + m_3 l_3^2) \cdot \cos(q_2 + q_3) \sin(q_2 + q_3) - (m_3 l_2 l_3 - m_3 l_2 r_3) (\sin q_2 \cos(q_2 + q_3) + \cos q_2 \sin(q_2 + q_3)) \dot{q}_2 + (- (I_{3z} - 2m_3 r_3 l_3 + m_3 l_3^2) \cos(q_2 + q_3) \sin(q_2 + q_3) - (m_3 l_2 l_3 - m_3 l_2 r_3) \cos q_2 \sin(q_2 + q_3)) \dot{q}_3,$$

$$c_{12} = -(I_{2x} - 2m_2 r_2 l_2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_2^2) \cos q_2 \cdot \sin q_2 - (I_{3z} - 2m_3 r_3 l_3 + m_3 l_3^2) \cos(q_2 + q_3) \sin(q_2 + q_3) - (m_3 l_2 l_3 - m_3 l_2 r_3) \cdot (\sin q_2 \cos(q_2 + q_3) + \cos q_2 \sin(q_2 + q_3)) \dot{q}_1,$$

$$c_{13} = -(I_{3z} - 2m_3 r_3 l_3 + m_3 l_3^2) \cos(q_2 + q_3) \cdot$$

$$\sin(q_2 + q_3) - (m_3 l_2 l_3 - m_3 l_2 r_3) \cos q_2 \cdot \sin(q_2 + q_3) \dot{q}_1,$$

$$c_{21} = -c_{12},$$

$$c_{22} = (m_3 l_2^2 \sin q_2 \cos q_2 + (I_{3z} - 2m_3 l_3 + m_3 l_3^2) \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3) + (m_3 l_2 l_3 - m_3 l_2) (\cos q_2 \sin(q_2 + q_3) + \sin q_2 \cos(q_2 + q_3))) \dot{q}_2 + ((I_{3z} - 2m_3 l_3 + m_3 l_3^2) \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3) + (m_3 l_2 l_3 - m_3 l_2) \sin q_2 \cos(q_2 + q_3)) \dot{q}_3,$$

$$c_{23} = ((I_{3z} - 2m_3 l_3 + m_3 l_3^2) \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3) + (m_3 l_2 l_3 - m_3 l_2) \sin q_2 \cos(q_2 + q_3)) \dot{q}_2 + (2(I_{3z} - 2m_3 r_3 l_3 + m_3 l_3^2) \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3) + (m_3 l_3 l_2 - m_3 r_3 l_2) \sin q_2 \cos(q_2 + q_3)) \dot{q}_3,$$

$$c_{31} = -c_{13},$$

$$c_{32} = (2(I_{3z} - 2m_3 r_3 l_3 + m_3 l_3^2) \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3) + (m_3 l_3 l_2 - m_3 r_3 l_2) (\cos q_2 \sin(q_2 + q_3) + \sin q_2 \cos(q_2 + q_3))) \dot{q}_2 + (- (I_{3z} - 2m_3 l_3 + m_3 l_3^2) \sin(q_2 + q_3) \cos(q_2 + q_3) - (m_3 l_2 l_3 - m_3 l_2) \sin q_2 \cos(q_2 + q_3)) \dot{q}_2,$$

$$c_{33} = 0,$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} 0.5 \operatorname{sgn} \dot{q}_1 \\ 0.5 \operatorname{sgn} \dot{q}_2 \\ 0.5 \operatorname{sgn} \dot{q}_3 \end{bmatrix},$$

$$g_1 = 0,$$

$$g_2 = -(m_2 g r_2 - m_2 g l_2 - m_3 g l_2) \cos q_2 - m_3 g (r_3 - l_3) \cos(q_2 + q_3),$$

$$g_3 = -m_3 g (r_3 - l_3) \cos(q_2 + q_3).$$

式中: $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ 为机器人的惯性矩阵; $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为机器人的离心力和哥氏力构成的矩阵; $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 为重力项构成的矩阵; $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}})$ 表示摩擦力项构成的矩阵; $\boldsymbol{\tau}$ 为控制力矩构成的矩阵; $\boldsymbol{\tau}_d$ 为建模误差和外加扰动等不确定项组成的矩阵; q_i 为第 i 杆的角位移; m_i, l_i 分别为第 i 杆的质量和杆长; $(0, -r_1, 0), (-r_2, 0, 0), (-r_3, 0, 0)$ 分别为杆 l_1, l_2, l_3 在各自坐标系中的质心坐标; I_{1y}, I_{2x}, I_{3z} 为杆 l_1, l_2, l_3 关于坐标轴 Y_1, Z_2, Z_3 的转动惯量; τ_1, τ_2 和 τ_3 分别为施加在杆 l_1, l_2, l_3 上的控制力矩。

2 自适应双模糊滑模控制

2.1 滑模控制

机器人轨迹跟踪的控制目标就是要求关节角位移向量 \mathbf{q} 尽可能好地跟踪指令关节角位移向量 \mathbf{q}_d 。

定义跟踪误差为

$$\mathbf{e} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q} \quad (2)$$

设计滑模面为

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{A}\mathbf{e} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{q}_d = [q_{d1} \ q_{d2} \ q_{d3}]^T$; $\mathbf{A} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 为正的对角矩阵, $\lambda_i > 0, i=1, 2, 3$.

通过取 $\dot{\mathbf{s}} = 0$, 同时令式(1)中 $\tau_d = 0$, 可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}} &= \ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{A}\dot{\mathbf{e}} = \ddot{\mathbf{q}}_d - \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{A}\dot{\mathbf{q}}_d - \mathbf{A}\dot{\mathbf{q}} = \\ &\ddot{\mathbf{q}}_d - \mathbf{H}^{-1}(\mathbf{C}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{G} + \mathbf{F} - \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{A}\dot{\mathbf{e}} = 0 \end{aligned}$$

可推出等效控制部分为

$$\boldsymbol{\tau}_{eq} = \mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{H}\mathbf{A}\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G} + \mathbf{F} \quad (4)$$

为补偿建模误差和外界干扰作用等不确定项, 同时满足滑模到达条件 $s_i \dot{s}_i \leq -k_i |s_i|$, 需要设计切换控制部分为

$$\boldsymbol{\tau}_{sw} = \mathbf{H}\mathbf{K}\text{sgn } \mathbf{s} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{K} = \text{diag}(k_1, k_2, k_3)$, k_i 为切换控制部分的增益, $k_i > 0, i=1, 2, 3$.

$$\text{sgn } \mathbf{s} = \begin{bmatrix} \text{sgn } s_1 \\ \text{sgn } s_2 \\ \text{sgn } s_3 \end{bmatrix}, \text{sgn } s_i = \begin{cases} 1, & s_i > 0 \\ 0, & s_i = 0 \\ -1, & s_i < 0 \end{cases} \quad (6)$$

由等效控制部分和切换控制部分可组成滑模控制器

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{eq} + \boldsymbol{\tau}_{sw} \quad (7)$$

2.2 切换增益的模糊控制

在滑模控制器(7)中, 切换增益 k_i 值是造成抖振的主要原因. k_i 用于补偿建模误差和外界干扰作用等不确定项, 以保证滑模存在性条件得到满足. 如果 k_i 随着建模误差和外界干扰作用等不确定项的变化而变化, 则可以降低抖振和减小系统稳态误差.

本文采用模糊推理来建立 k_i 值的调整方法, 具体模糊规则如下^[10]: 如果 $s_i \dot{s}_i > 0$, 则 k_i 值应增大; 如果 $s_i \dot{s}_i < 0$, 则 k_i 值应减小.

定义如下模糊集:

$$s_i \dot{s}_i = \{\text{NB} \ \text{NM} \ \text{NS} \ \text{ZO} \ \text{PS} \ \text{PM} \ \text{PB}\}$$

$$\Delta k_i = \{\text{NB} \ \text{NM} \ \text{NS} \ \text{ZO} \ \text{PS} \ \text{PM} \ \text{PB}\}$$

式中: NB 为负大, NM 负中, NS 负小, ZO 为零, PS 为正小, PM 正中, PB 正大. 模糊系统输入量的隶属度函数如图 2a 所示, 输出量的隶属度函数如图 2b 所示.

具体的模糊规则为:

规则 1, 若 $s_i \dot{s}_i$ 为 NB, 则 Δk_i 为 NB;

规则 2, 若 $s_i \dot{s}_i$ 为 NM, 则 Δk_i 为 NM;

规则 3, 若 $s_i \dot{s}_i$ 为 NS, 则 Δk_i 为 NS;

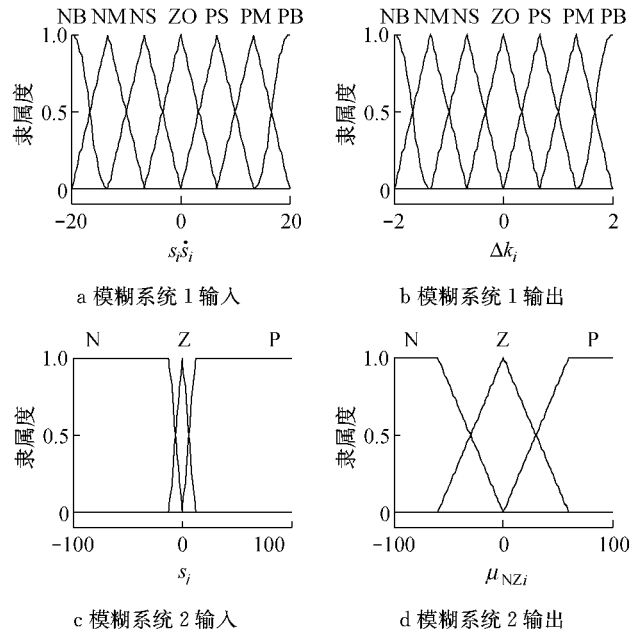


图 2 模糊系统的隶属度函数

Fig. 2 The membership function of the fuzzy system

规则 4, 若 $s_i \dot{s}_i$ 为 ZO, 则 Δk_i 为 ZO;

规则 5, 若 $s_i \dot{s}_i$ 为 PS, 则 Δk_i 为 PS;

规则 6, 若 $s_i \dot{s}_i$ 为 PM, 则 Δk_i 为 PM;

规则 7, 若 $s_i \dot{s}_i$ 为 PB, 则 Δk_i 为 PB.

利用积分的方法对 Δk_i 的上界进行估计

$$\hat{k}_i = w_i \int_0^t \Delta k_i dt \quad (8)$$

其中, w_i 为调整系数, $w_i > 0, i=1, 2, 3$, 则

$$\hat{\mathbf{k}} = \boldsymbol{\eta} + \text{diag}(|\hat{k}_1|, |\hat{k}_2|, |\hat{k}_3|) \quad (9)$$

其中, $\boldsymbol{\eta} = \text{diag}(\eta_1, \eta_2, \eta_3)$ 为正的调整系数对角阵, $\eta_i > 0, i=1, 2, 3$.

则切换控制器设计为

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}_{sw} = \mathbf{H}\hat{\mathbf{k}}\text{sgn } \mathbf{s} \quad (10)$$

则模糊滑模控制器为

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{eq} + \hat{\boldsymbol{\tau}}_{sw} \quad (11)$$

2.3 切换项的模糊控制

为了进一步减弱抖振, 优化系统性能, 根据滑模控制的原理, 针对控制律(11), 对切换项进行模糊调整, 规则如下^[10]:

若 s_i 为 ZO, 则 τ_i 为 τ_{eqi} ;

若 s_i 为 NZ, 则 τ_i 为 $\tau_{eqi} + \hat{\tau}_{swi}$.

其中, $\boldsymbol{\tau}_{eq} = [\tau_{eq1} \ \tau_{eq2} \ \tau_{eq3}]^T$, $\hat{\boldsymbol{\tau}}_{sw} = [\hat{\tau}_{sw1} \ \hat{\tau}_{sw2} \ \hat{\tau}_{sw3}]^T$, 模糊集 ZO 和 NZ 分别表示零和非零. 上面模糊规则表示, 当 s_i 为零时, 滑模控制只采用等效控制, 当 s_i 为非零时, 滑模控制采用等效控制和切换控制的结合.

定义如下模糊集:

$$s_i = \{N \quad ZO \quad P\}, \mu_{NZi} = \{N \quad ZO \quad P\}$$

其中, $\mu_{NZ} = \text{diag}(\mu_{NZ1} \quad \mu_{NZ2} \quad \mu_{NZ3})$, 模糊集 N, ZO 和 P 分别表示为负、零和正。模糊系统输入量的隶属度函数如图 2c 所示, 输出量的隶属度函数如图 2d 所示。

则具体的模糊规则为:

规则 1, 若 s_i 为 N, 则 μ_{NZi} 为 P;

规则 2, 若 s_i 为 ZO, 则 μ_{NZi} 为 ZO;

规则 3, 若 s_i 为 P, 则 μ_{NZi} 为 P。

采用反模糊化方法, 针对控制律(11), 则模糊控制器设计为

$$\tau_i = \frac{\mu_{ZOi}(s_i)\tau_{eqi} + \mu_{NZi}(s_i)(\tau_{eqi} + \hat{\tau}_{swi})}{\mu_{ZOi}(s_i) + \mu_{NZi}(s_i)} = \tau_{eqi} + \mu_{NZi}\hat{\tau}_{swi} \quad (12)$$

$$\mu_{ZOi}(s_i) + \mu_{NZi}(s_i) = 1 \quad (13)$$

当 $\mu_{NZi}(s_i) = 1$ 时, 则 $\tau_i = \tau_{eqi} + \hat{\tau}_{swi}$, 此时控制律采用前面的模糊滑模控制律(11)。

当 $\mu_{NZi}(s_i) \neq 1$ 时, 通过隶属函数 $\mu_{NZi}(s_i)$ 的变化来实现消弱抖振, 则 $\tau_i = \tau_{eqi} + (\mu_{NZi} + \epsilon_i)\hat{\tau}_{swi}$, 即采用如下双模糊滑模控制律:

$$\tau = \tau_{eq} + (\mu_{NZ} + \epsilon)\hat{\tau}_{sw} \quad (14)$$

其中, $\epsilon = \text{diag}(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ 为正的调整系数对角阵, $\epsilon_i > 0, i=1, 2, 3$ 。

整个控制系统的结构如图 3 所示。

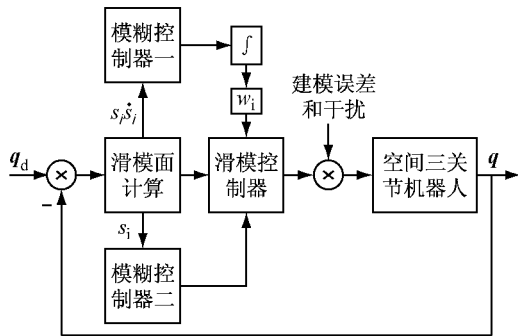


图3 双模糊滑模控制系统结构图

Fig.3 The structure block diagram of double fuzzy sliding mode control system

2.4 稳定性分析

先作如下定义: 对于一般实值函数 $V(x)$, 如果 $V(0)=0$, 且对 $x \neq 0$ 有 $V(x) > 0$, 则称 $V(x)$ 是正定的; 如果 $V(0)=0$, 且对 $x \neq 0$ 有 $V(x) \geq 0$, 则称 $V(x)$ 是半正定的; 如果 $V(0)=0$, 且对 $x \neq 0$ 有 $V(x) < 0$, 则称 $V(x)$ 是负定的; 如果 $V(0)=0$, 且对 $x \neq 0$ 有 $V(x) \leq 0$, 则称 $V(x)$ 是半负定的。

李亚普诺夫稳定性判别定理^[11]: 如果有一连续可微正定函数 $V(x)$, 其导数 $\dot{V}(x)$ 是半负定的, 则原点是稳定的, 其导数 $\dot{V}(x)$ 是负定的, 则原点是渐近稳定的。

自适应双模糊滑模控制稳定性证明, 取李雅普诺夫函数为

$$V(s) = \frac{1}{2} s^T s \quad (15)$$

显然 $V(0)=0$, 且对 $s \neq 0$ 有 $V(s) > 0$, 则

$$\begin{aligned} \dot{V}(s) &= \frac{1}{2} (\dot{s}^T s + s^T \dot{s}) = s^T \dot{s} = s^T (\ddot{e} + \Lambda \dot{e}) = \\ &= s^T (\ddot{q}_d - \ddot{q} + \Lambda \dot{e}) = \\ &= s^T (\ddot{q}_d + H^{-1}(C\dot{q} + G + F + \tau_d - \tau) + \Lambda \dot{e}) \end{aligned} \quad (16)$$

将式(14)代入式(16)得

$$\begin{aligned} \dot{V}(s) &= s^T (H^{-1} \tau_d - (\mu_{NZ} + \epsilon) \hat{k} \text{sgn } s) = \\ &= s^T H^{-1} \tau_d - s^T (\mu_{NZ} + \epsilon) \hat{k} \text{sgn } s \end{aligned} \quad (17)$$

根据上面的双模糊滑模控制设计可知, $\mu_{NZi} |\hat{k}_i|$ 为不确定项 $(H^{-1} \tau_d)_i$ 的逼近, 其中, 记 $(H^{-1} \tau_d)_i$ 表示向量 $H^{-1} \tau_d$ 中第 i 个元素, 下同。由模糊系统万能逼近定理可知^[12], 存在 $\beta_i > 0$, 有

$$|(H^{-1} \tau_d)_i - \mu_{NZi} |\hat{k}_i|| \leq \beta_i \quad (18)$$

则, $\mu_{NZi} |\hat{k}_i| \geq |(H^{-1} \tau_d)_i| - \beta_i$

记 \hat{K}_i 为对角矩阵 \hat{K} 的第 i 个对角元素, 下同, 则, $\hat{K}_i = \hat{k}_i + \eta_i$, 得

$$((\mu_{NZ} + \epsilon) \hat{K})_i - |(H^{-1} \tau_d)_i| \geq$$

$$\mu_{NZi} \eta_i + \epsilon_i |\hat{k}_i| + \epsilon_i \eta_i - \beta_i$$

由模糊设计规则可保证 $\mu_{NZi} \geq 0$, 且由已知条件有 $\mu_{NZi} \eta_i \geq 0, \epsilon_i |\hat{k}_i| \geq 0$, 当取 $\epsilon_i \eta_i > \beta_i$, 则可保证

$$((\mu_{NZ} + \epsilon) \hat{K})_i > |(H^{-1} \tau_d)_i| \quad (19)$$

由式(17)和式(19)可得 $\dot{V}(s) \leq 0$ 。

由李亚普诺夫稳定性判别定理可得系统是稳定的。

3 仿真实验

空间三关节机器人的物理参数如下: $l_2 = 0.3 \text{ m}, l_3 = 0.3 \text{ m}, r_2 = 0.15 \text{ m}, r_3 = 0.15 \text{ m}, m_2 = 9.032 \text{ kg}, m_3 = 9.032 \text{ kg}, I_{1y} = 0.059 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, I_{2z} = 0.104 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, I_{3z} = 0.104 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

期望的跟踪轨迹为: $q_{d1} = \sin 2t, q_{d2} = \cos 2t$,

$$q_{d3} = \sin 2t.$$

初始条件为: $\mathbf{q}=[1,0,1]^T, \dot{\mathbf{q}}=[0,0,0]^T$.

假设建模误差和外界干扰作用等不确定项可以表示为如下高斯扰动函数:

$$\boldsymbol{\tau}_d = [\tau_{d1}, \tau_{d2}, \tau_{d3}]^T$$

$$\tau_{d1} = a_1 \exp(-(t-c_1)^2/2b_1^2)$$

$$\tau_{d2} = a_2 \exp(-(t-c_2)^2/2b_2^2)$$

$$\tau_{d3} = a_3 \exp(-(t-c_3)^2/2b_3^2)$$

其中,扰动的大小由参数 a_i 确定, a_i 越大,扰动越大. 参数 c_i 表征扰动的中心, 参数 b_i 表征扰动作用的时间范围大小.

在仿真过程中,考虑到 3 个关节的不确定项不一样,对三关节机器人按照物理参数进行估算,确定一般扰动参数为: $c_i=4, b_i=0.01, a_1=2.4, a_2=6, a_3=1.8$.

为便于控制方法对比分析,需要加大扰动. 大扰动的参数设置为: $c_i=4, b_i=0.01, a_1=40, a_2=120, a_3=20$.

滑模控制 SMC(sliding mode control)的参数设置为: $\mathbf{A}=\text{diag}(4,4,4), \mathbf{K}=\text{diag}(30,30,30)$.

模糊滑模控制 FSMC(fuzzy sliding mode control)的参数设置为: $\mathbf{A}=\text{diag}(4,4,4), w_1=w_2=w_3=120, \boldsymbol{\eta}=\text{diag}(0.001,0.001,0.001)$.

双模糊滑模控制 DFSMC(double fuzzy sliding mode control)的参数设置为: $\mathbf{A}=\text{diag}(4,4,4), w_1=w_2=w_3=120, \boldsymbol{\eta}=\text{diag}(0.001,0.001,0.001), \boldsymbol{\varepsilon}=\text{diag}(0.0002,0.0002,0.0002)$.

为方便说明本文所设计的控制方法的有效性,采用传统反馈线性化控制方法和文献[8]中所设计的相关双模糊滑模控制方法作对比分析.

传统反馈线性化控制方法的控制器设计为

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{H}\dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{G} + \mathbf{F} +$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{p}_1 \mathbf{e} + \mathbf{p}_2 \dot{\mathbf{e}}) - \mathbf{C}\dot{\mathbf{e}}$$

其中参数: $p_1=30, p_2=11$. 反馈线性化控制方法的详细情况可参考文献[11].

另一用于对照分析的相关双模糊滑模控制方法的详细设计情况可参考文献[8].

在 MATLAB R2009a 中编写程序进行仿真实验. 仿真结果如图 4—7 所示. 图 4 为一般滑模控制的仿真结果. 图 5 为模糊滑模控制的仿真结果. 图 6 为双模糊滑模控制的仿真结果. 图 7 为大扰动情况下,本文所设计的双模糊滑模控制,一般传统反馈线性化控制和文献[8]所设计的双模糊滑模控制 3 种方法的仿真结果对比图.

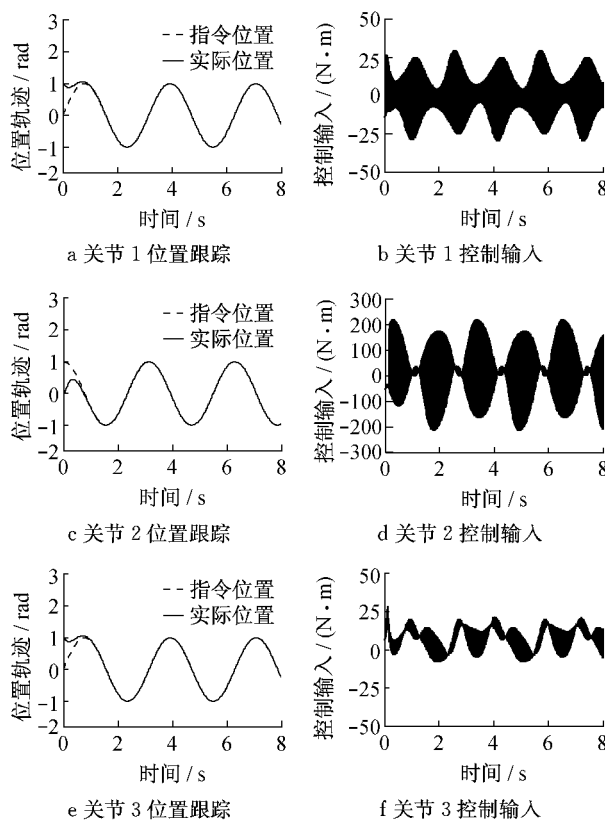


图 4 一般滑模控制的仿真结果
Fig.4 Simulation results of SMC

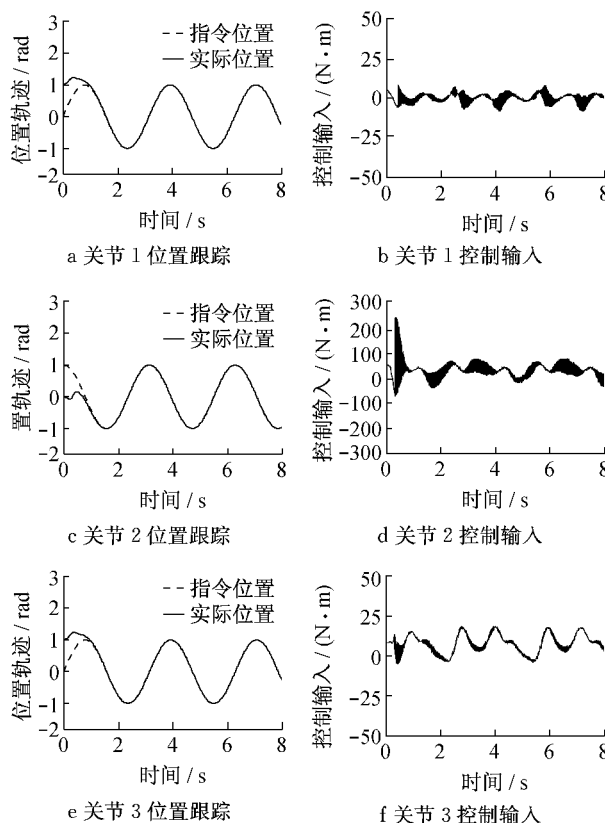


图 5 模糊滑模控制的仿真结果
Fig.5 Simulation results of FSMC

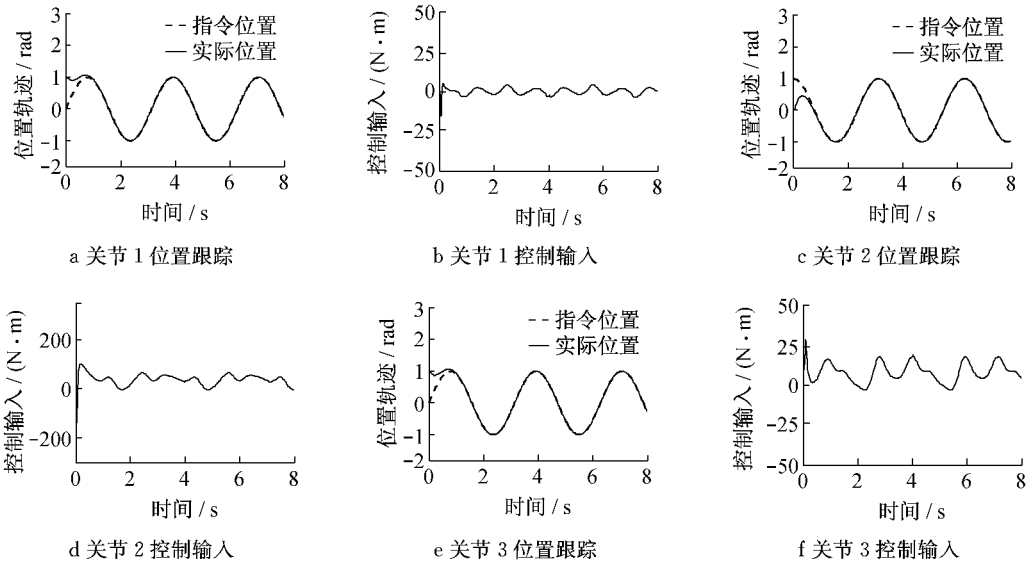


图6 双模糊滑模控制的仿真结果
Fig.6 Simulation results of DFSMC

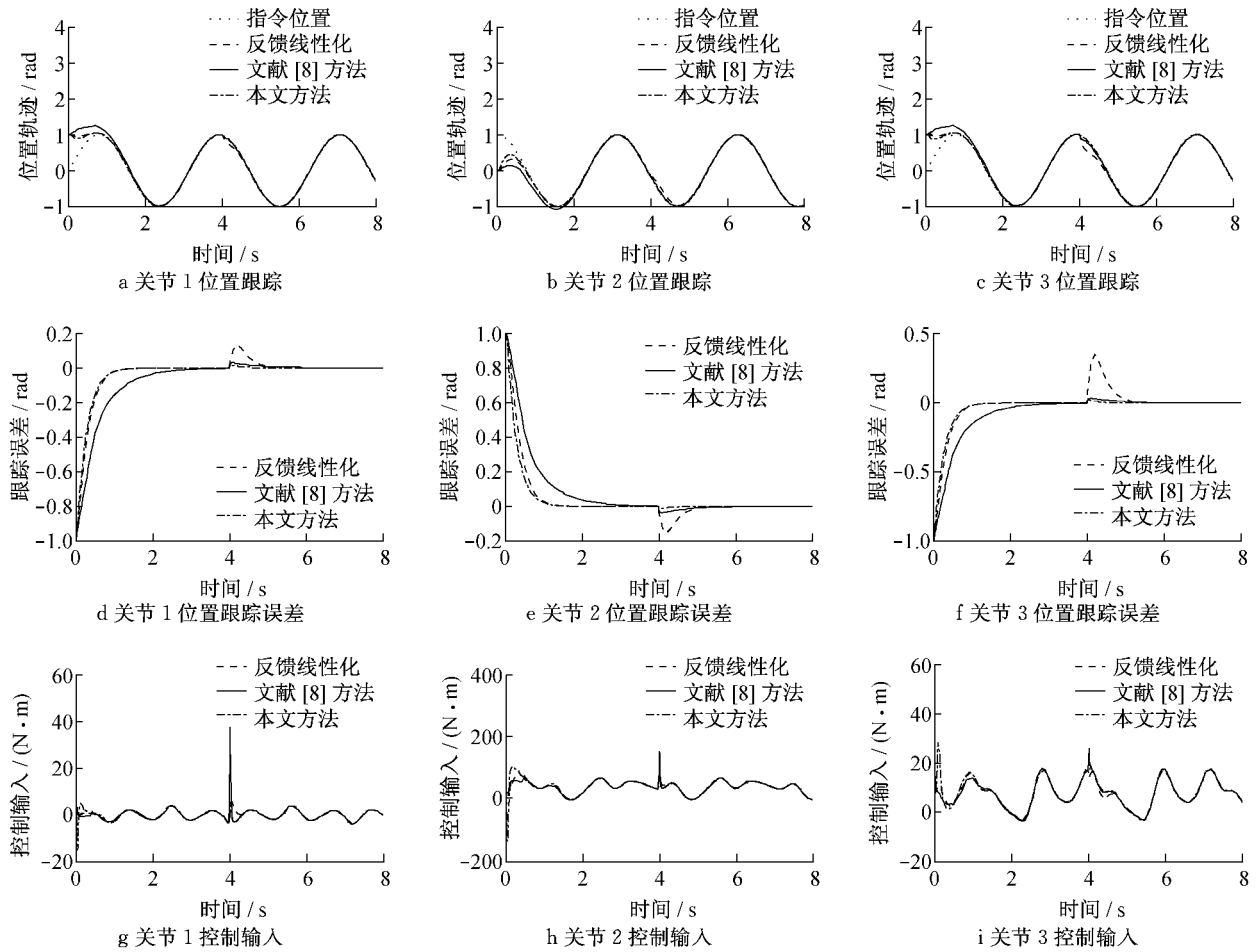


图7 大扰动情况下3种控制方法的仿真结果
Fig.7 Simulation results of three control scheme in larger disturbances

比较图4、图5和图6可知,一般滑模控制、模糊滑模控制、双模糊滑模控制3种控制方法都实现了空间三关节机器人的轨迹跟踪,控制输入也均在合理范围.通过查看计算数据可知,3种控制方法的稳态误差均在 10^{-4} rad的数量级以内,调整时间(按误差允许范围2%计算)也均在1.5 s左右,因而3种方法在稳态误差和调整时间上差距不大.但是,3种控制方法所产生的抖振差距很大,分别对应比较图4、图5和图6的b,d,f图,很容易看出模糊滑模控制较明显减弱了抖振,双模糊滑模控制则进一步消除了抖振,说明所设计的双模糊滑模控制方法较好地实现了消除抖振.

比较图6和图7中本文所设计的双模糊滑模控制方法,可以看出,当加大扰动时,本文双模糊滑模控制方法的稳态误差变化不大,表现出较强的鲁棒性.从图7可以看出,在调整时间方面,文献[8]控制方法的调整时间较长,反馈线性化控制方法和本文控制方法的调整时间较短;在控制误差方面,在大扰动情况下,反馈线性化控制方法的控制误差较大,几乎不能满足控制精度要求,文献[8]控制方法的控制误差较小,本文控制方法的控制误差更小,表现出更好的鲁棒性;在控制力矩方面,反馈线性化控制方法和本文控制方法比文献[8]控制方法更合理一些.通过比较分析可知本文所提出的控制方法具有更好的控制性能.

4 结论

本文对带有建模误差、外界干扰等不确定项的空间三关节机器人的轨迹跟踪控制,提出了一种自适应双模糊滑模控制新方法.通过仿真实验和对比分析可知,该方法具有良好的控制性能.

(1) 本文所设计的控制方法较好地消除了传统滑模控制的抖振.

(2) 与传统的反馈线性化控制方法比较,本文所设计的方法具有较强的鲁棒性.

(3) 与文献[8]所设计的同类双模糊滑模控制方法相比,本文所设计的控制方法调整时间短,稳态误差小,控制力矩合理,鲁棒性好,表现出更好的控制性能.

本文所设计的控制方法对已知运动路径的机器人系统,如焊接机器人、装配机器人等具有快速、实

时和高精度的特点.该方法同样适用于其他类似的多输入、多输出的非线性控制系统.

参考文献:

- [1] 刘金琨,孙富春.滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J].控制理论与应用,2007,24(3):407.
LIU Jinkun, SUN Fuchun. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(3):407.
- [2] ZHU Mingchao, LI Yuanchun. Decentralized adaptive fuzzy sliding mode control for reconfigurable modular manipulators[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2010, 20(4):472.
- [3] CHANG Mingkun, LIN Shouyee, YUAN Tsanhsiu. Tracking control of a 3-DOF rehabilitation robot actuated by pneumatic muscle actuators using adaptive self-organising fuzzy sliding mode control[J]. International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications, 2011, 10(1):65.
- [4] Aloui S, Pagès O, El Hajjaji A, et al. Improved fuzzy sliding mode control for a class of MIMO nonlinear uncertain and perturbed systems[J]. Applied Soft Computing Journal, 2011, 11(1):820.
- [5] Abdelhameed M M. Enhancement of sliding mode controller by fuzzy logic with application to robotic manipulators[J]. Mechatronics, 2005, 15(4):439.
- [6] Ngo Ha Quang Thinh, Shin Jinho, Kim Wonho. Fuzzy sliding mode control for a robot manipulator[J]. Artificial Life and Robotics, 2008, 13(1):124.
- [7] LI Tzuuhseng S, HUANG Yuncheng. MIMO adaptive fuzzy terminal sliding-mode controller for robotic manipulators[J]. Information Sciences, 2010, 180(23):4641.
- [8] Nurkan Y, Yuksel H. Robust control of a spatial robot using fuzzy sliding modes[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2009, 49(1/2):114.
- [9] 霍伟.机器人动力学与控制[M].北京:高等教育出版社,2005.
HUO Wei. Robot dynamics and control[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.
- [10] 刘金琨.滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,2005.
LIU Jinkun. MATLAB simulation for sliding mode control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [11] 李殿璞.非线性控制系统[M].西安:西北工业大学出版社,2009.
LI Dianpu. Nonlinear control system[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2009.
- [12] 刘金琨.机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,2008.
LIU Jinkun. Design and MATLAB simulation for robot control system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.