

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.01.013

受到外部扰动的空间机械臂基于模糊递归神经网络的控制策略^{*}

张瑞芬

(福建水利电力职业技术学院 机电工程系, 福建 永安 366000)

摘要:针对载体位置不受控、姿态受控的空间机械臂运动控制问题,对具有不确定系统参数的空间机械臂在受到外部扰动工况下动力学建模以及控制算法进行了研究。运用拉格朗日第二类动力学方程及被控系统动量守恒关系,对该工况下空间机械臂运动特性进行了分析,建立了系统在受到外部扰动时的动力学模型,并对动力学特性进行了归纳,提出了一种基于模糊递归神经网络的控制策略。根据李雅普诺夫第二类方法,证明了整个闭环控制系统的运动渐进稳定性。使用计算机数值仿真实验与计算力矩法进行对比,阐述了整个控制系统的有效性。研究结果表明,在存在外部扰动及系统参数不确定时,所设计的控制方案相比于传统计算力矩控制方法具有更好的轨迹跟踪效果和更高的可靠性。

关键词:空间机械臂;模糊递归神经网络;参数不确定;外部扰动

中图分类号:TH39;TP242.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)01-0062-06

Control method for space manipulator with external disturbance based on recurrent fuzzy neural networks

ZHANG Rui-fen

(Department of Hydraulic Engineering, Fujian College of Water Conservancy and Electric Power, Yong'an 366000, China)

Abstract: Aiming at the control problem of space manipulator system with external disturbance and uncertain parameters when the attitude of based was controlled and its location was uncontrolled, combining with the system of conservation of momentum, the system's dynamic model under external disturbance was established by using the Lagrange dynamics equation and assumed modes methods were investigated. A method based on recurrent fuzzy neural networks was proposed. This method could solve space manipulators with external disturbance and uncertain parameters control problems, and through the second Lyapunov method to prove the asymptotic stability of the closed-loop control system. The results indicate that this control strategy has better tracking performance and higher reliability than the computed torque control method through the computer numerical simulation experiment.

Key words: space manipulators; recurrent fuzzy neural networks; uncertain parameters; external disturbance

0 引言

随着人类对外太空探索与开发不断深入,太空作业的难度与复杂程度将会不断地提高。考虑到太空环境的不确定性及其危险性,空间站、航天飞机和空间机械臂系统便成为了帮助甚至替代人类作业的有力工具。

空间机械臂系统与载体之间存在着复杂的动力学耦合以及参数不确定等问题都会对运动控制效果产生极大的影响,因此空间机械臂系统的运动控制问题成为了国内外科学家研究的热点^[1-11]。

针对参数不确定等复杂工况,众多学者提出了一系列控制方法来补偿其影响。Chen 和 Liu 等人^[12]提

收稿日期:2016-06-20

基金项目:福建水利电力职业技术学院访问学者基金(2014YJ0012)

作者简介:张瑞芬(1979-),女,内蒙古乌兰察布人,工程硕士,副教授,主要从事机械设计与制造方面的研究。E-mail:1524806260@qq.com

出了一类自适应控制和鲁棒控制,将系统未知部分与精确部分进行参数分离,并通过自适应和鲁棒控制方法补偿系统不确定参数所造成的控制误差。Liang 和 Chen 等人^[13-14]设计了一种将系统模型分解为只含有精确参数的标称系统和不确定部分,针对标称系统设计计算力矩控制器再通过模糊补偿控制器对系统不确定部分进行补偿。Chen 和 Lee 等人^[15]设计了一种满足 H_∞ 性能的模糊控制方法,通过模糊控制器的自适应逼近误差并将外界干扰对系统所产生的影响进行抑制。Sanner 和 Slotine^[16]将神经网络与变结构控制相结合,实现了对一类不确定非线性时变系统的轨迹跟踪控制。这些控制方法有效地解决了复杂工况对控制误差产生的影响,但其中大多数应用于基座固定的地面机器人系统,对于基座自由浮动的空间机器人系统的研究仍有待进一步的发展。

本研究将含有不确定系统参数的空间机械臂系统通过系统分解变成只含有精确参数的标称部分和具有未知参数的不确定部分,通过模糊递归神经网络对系统的不确定非线性部分进行逼近,再针对神经网络的逼近误差和外部扰动设计一种满足 H_∞ 性能的鲁棒控制方法,通过这一套控制方案对期望轨迹进行跟踪。

1 具有外部扰动的空间机械臂动力学模型建立

考虑作平面运动的空间机械臂系统如图1所示。

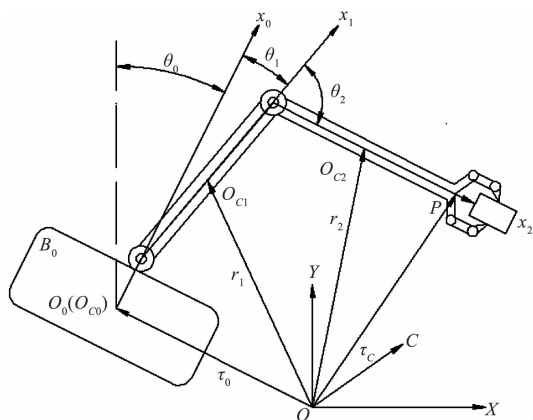


图1 空间机械臂系统

整个系统由自由漂浮的基座 B_0 , 刚性机械臂 B_1 及刚性机械臂 B_2 共同组成。并假设系统做平面运动。

根据拉格朗日第二类方程并结合系统动能、动量守恒关系,可得到空间机械臂系统动力学方程:

$$D(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = \tau \quad (1)$$

式中: $\theta = (\theta_0, \theta_1, \theta_2)^T$ —载体姿态角、刚性机械臂 B_1 的转角和机械臂 B_2 的转角; $D(\theta)$ — 3×3 的对称、正定

系统惯量矩阵; $H(\theta, \dot{\theta})$ —包含科氏力、离心力的 3×3 对称正定矩阵; 并根据此系统假设 $\tau = (\tau_0, \tau_1, \tau_2)^T$ —控制姿态角及两个关节角的关节驱动电机输出力矩。

同时,矩阵 $H(\theta, \dot{\theta})$ 需满足对于任意向量 $z \in R^3$, 并且满足如下关系:

$$z^T H z = \frac{1}{2} z^T \dot{D} z \quad (2)$$

2 基于模糊递归神经网络的鲁棒 H_∞ 控制器设计

2.1 模糊递归神经网络

本研究所设计的模糊递归神经网络分别由输入层、成员函数层、模糊推理层以及输出层共同组成。控制结构如图2所示。

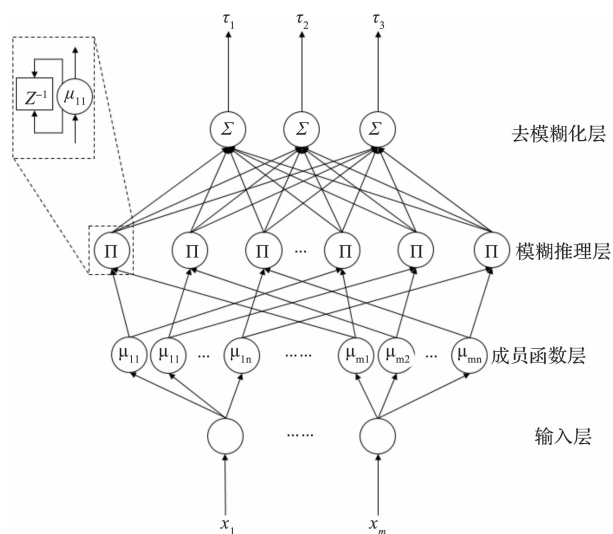


图2 模糊递归神经网络

每一层的传播函数描述如下:

(1) 第一层为输入层。其中输入变量为 $x_i^{(1)}$, 输出变量为 $y_i^{(1)}$ ($i = 1, 2, \dots, m$), m 代表输入变量的个数。该层的输出表达式为:

$$y_i^{(1)}(N) = x_i^{(1)}(N) \quad (3)$$

式中: N —神经网络在线训练次数。

(2) 第二层为成员函数层。其中每一个节点都有一个隶属度函数,该层的输入为:

$$x_j^{(2)}(N) = y_i^{(1)}(N) \quad (4)$$

选择高斯型隶属度函数,其输出表达式为:

$$y_j^{(2)}(N) = \exp\left(-\frac{(x_j^{(2)}(N) - a_{ij})^2}{\sigma_{ij}}\right), (j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中, a_{ij}, σ_{ij} ($j = 1, 2, \dots, n$)—高斯基隶属度函数的均值中心和标准差; n —每个节点语言变量的数量。

(3) 第三层为模糊推理层。其中每个节点通过输入变量的连乘得到输出变量。该层的输入为:

$$x_j^{(3)}(N) = y_j^{(2)}(N) \quad (6)$$

输出变量的表达式为:

$$y_k^{(3)} = \prod W_{ji}^k x_j^{(3)}(N) W_k y_k^{(3)}(N-1), (k=1,2,\dots,o) \quad (7)$$

式中: W_{ji}^k —成员函数层与模糊推理层之间的权值。

(4) 第四层为输出层。该层的表达式为:

$$y_l^{(4)} = \sum W_{kl}^{(4)} y_k^{(3)}, (l=1,2,\dots,p) \quad (8)$$

式中: $W_{kl} = [w_{1l}, w_{2l}, \dots, w_{ol}]^T$ —模糊推理层与输出层的连接权值, 该值通过在线训练不断地调整。

2.2 系统控制器设计及运动稳定性分析

考虑到空间机械臂系统结构的复杂性以及受到测量误差和工作环境的影响, 系统的动力学部分参数常常难以精确获得。本研究假设动力学方程中的系统矩阵可分解为由精确参数组成的标称部分 $D_0(\theta)$ 、 $H_0(\theta, \dot{\theta})$ 和由不确定参数组成的估计部分 $\Delta D(\theta)$ 、 $\Delta H(\theta, \dot{\theta})$, 并满足如下关系:

$$D(\theta) = D_0(\theta) + \Delta D(\theta) \quad (9)$$

$$H(\theta, \dot{\theta}) = H_0(\theta, \dot{\theta}) + \Delta H(\theta, \dot{\theta}) \quad (10)$$

设计系统的标称部分与不确定部分分别为 $D_0(\theta)$ 、 $H_0(\theta, \dot{\theta})$ 、 $\Delta D(\theta)$ 和 $\Delta H(\theta, \dot{\theta})$ 。

设计系统的期望轨迹向量和期望速度向量分别为 $\theta_d = [\theta_{0d} \ \theta_{1d} \ \theta_{2d}]^T$ 、 $\dot{\theta}_d = [\dot{\theta}_{0d} \ \dot{\theta}_{1d} \ \dot{\theta}_{2d}]^T$, 则轨迹跟踪误差向量与速度误差向量分别为:

$$e = \theta_d - \theta = [e_0 \ e_1 \ e_2]^T \quad (11)$$

$$\dot{e} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta} = [\dot{e}_0 \ \dot{e}_1 \ \dot{e}_2]^T \quad (12)$$

初步设计标称计算力矩控制律如下:

$$\tau = D_0(\ddot{\theta}_d + K_v \dot{e} + K_p e) + H_0 \dot{\theta} \quad (13)$$

式中: K_v, K_p —系统速度误差与位置误差的控制增益矩阵。

则由式(1)和(13)可得到如下关系:

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0 \quad (14)$$

由上式可知, 在控制器中适当选择增益矩阵 K_v 和 K_p , 可保证整个闭环系统的渐近稳定性。但是在系统实际工作中, 必须考虑系统参数不确定及外界扰动的影响, 因此, 式(13)可写为:

$$D_0(\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e) = f(x) + \tau_D \quad (15)$$

其中: $f(x) = \Delta D \ddot{\theta} + H \dot{\theta}$ 为系统的非线性部分, 设计模糊递归神经网络补偿控制器来逼近这一部分, 即:

$$f(x) = W^* \Phi + \varepsilon \quad (16)$$

式中: W^* —最优权值矩阵, Φ —模糊递归神经网络中的基函数, ε —神经网络的逼近误差。

假设存在 Ω_W , 使得 $\Omega_W = \{W \in R^{m \times n} : \|W\| \leq M_w\}$; 并且保证神经网络的最优权值 W^* 落在集合 Ω_W 中, 此关系可表示为:

$$\Omega_W = \operatorname{argmin} \{ \sup |f(x) - W^{*T} \Phi| \} \quad (17)$$

至此, 设计出空间机械臂系统控制律如下:

$$\tau = D_0(\ddot{\theta}_d + K_v \dot{e} + K_p e) + W^T \Phi + \tau_R \quad (18)$$

式中: τ_R —鲁棒控制项, 用以补偿系统外部干扰和神经网络逼近误差。

由式(15)和式(18)可得:

$$D_0(\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e) = \tau_R - \tilde{W}^T \Phi - \varepsilon - \tau_d \quad (19)$$

式中: $\tilde{W}$ —模糊递归神经网络的权值误差, $\tilde{W} = W^* - W$ 。

定义状态变量 $x = [x_1^T \ x_2^T]^T = [e^T \ \dot{e}^T]^T$, 则有如下状态空间表达式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -K_p x_1 - K_v x_2 + (\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e) \end{cases} \quad (20)$$

同时可得系统的状态空间表达式为:

$$\dot{x} = Ax + BD_0^{-1}(\tau_R - \tilde{W}^T \Phi - \varepsilon - \tau_d) \quad (21)$$

$$\text{其中: } A = \begin{bmatrix} 0_n & I_n \\ -K_p & -K_v \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0_n \\ I_n \end{bmatrix}$$

假设 1 将模糊递归神经网络的逼近误差视为系统外部扰动的一部分, 即系统的外部扰动为 $\delta = -D_0^{-1}(\tau_d + \varepsilon)$, 且 $\delta \in L_2[0, \infty)$, 即存在正常数 $D_\delta > 0$ 使得 $\int_0^\infty \|\delta(t)\|^2 dt \leq D_\delta$ 。

2.3 鲁棒补偿控制

考虑空间机械臂系统式(1), 假定满足假设 1, 此时若存在正定对称矩阵 $P = P^T > 0$ 满足如下 Riccati 方程:

$$PA + A^T P + PB \left(\frac{1}{\gamma^2} I_n - 2R^{-1} \right) B^T P + Q = 0 \quad (22)$$

式中: $\gamma > 0$ —干扰抑制指标, I_n — n 阶单位矩阵, $R = R^T > 0$ — H_∞ 控制增益, $Q = Q^T > 0$ —正定对称矩阵。

鲁棒控制律设计为如下形式:

$$\tau_R = -\bar{D}_{r0} R^{-1} B^T P x \quad (23)$$

同时设计模糊神经网络参数的自适应学习算法为:

$$\dot{\tilde{W}} = -\lambda^{-1} \Phi x^T P B \bar{D}_{r0}^{-1} \quad (24)$$

式中: λ — $n \times n$ 维正定对角增益矩阵, 使得整个闭环控制系统满足如下 H_∞ 跟踪性能:

$$\int_0^T \|x(t)\|_Q^2 dt \leq x^T(0) P x(0) + \operatorname{tr}(\tilde{W}^T(0) \lambda \tilde{W}(0)) + \gamma^2 \int_0^T \|\delta(t)\|_Q^2 dt \quad (25)$$

式中: $x(0), W(0)$ —状态向量和网络权值的初始值。

整个系统的控制原理框图如图3所示。

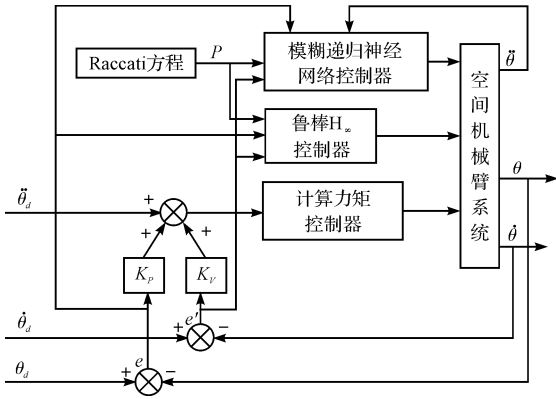


图3 系统控制原理框图

2.4 系统的运动稳定性分析

考虑如下形式的 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x} + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T \lambda \tilde{\mathbf{W}}) \quad (26)$$

将上式两端对时间微分得:

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{P} \mathbf{x} + \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{P} \dot{\mathbf{x}} + \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T \lambda \dot{\tilde{\mathbf{W}}}) \quad (27)$$

将式(21)代入式(27)中,得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \frac{1}{2} [\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{D}_0^{-1} (\boldsymbol{\tau}_R - \tilde{\mathbf{W}}^T \boldsymbol{\Phi} - \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\tau}_d)]^T \mathbf{P} \mathbf{x} + \\ & \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{P} [\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{D}_0^{-1} (\boldsymbol{\tau}_R - \tilde{\mathbf{W}}^T \boldsymbol{\Phi} - \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\tau}_d)]^T + \\ & \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T \lambda \dot{\tilde{\mathbf{W}}}) = \\ & \frac{1}{2} \mathbf{x}^T (\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P}) \mathbf{x} - \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{x} + \\ & \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \boldsymbol{\delta} - \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T \boldsymbol{\Phi} \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{D}_0^{-1}) + \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T \lambda \dot{\tilde{\mathbf{W}}}) \quad (28) \end{aligned}$$

由于 $\dot{\tilde{\mathbf{W}}} = -\tilde{\mathbf{W}}$,可得:

$$\begin{aligned} & -\text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T \boldsymbol{\Phi} \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{D}_0^{-1}) + \text{tr}(\tilde{\mathbf{W}}^T \lambda \dot{\tilde{\mathbf{W}}}) = \\ & -\text{tr}\{\tilde{\mathbf{W}}^T [\boldsymbol{\Phi} \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{D}_0^{-1} - \lambda \lambda^{-1} ((\mathbf{D}_0^{-1})^T \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{x})^T]\} = 0 \quad (29) \end{aligned}$$

将式(22)代入式(27)中,并结合式(25),可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \frac{1}{2} \mathbf{x}^T (\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P}) \mathbf{x} - \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \boldsymbol{\delta} = \\ & \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \left(\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{B} \left(\frac{\mathbf{I}_n}{\gamma} - 2\mathbf{R}^{-1} \right) \mathbf{B}^T \mathbf{P} \right) \mathbf{x} - \\ & \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\gamma} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{x} - \gamma \boldsymbol{\delta} \right) + \frac{1}{2} \gamma^2 \boldsymbol{\delta}^T \boldsymbol{\delta} \leq -\frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \frac{1}{2} \gamma^2 \boldsymbol{\delta}^T \boldsymbol{\delta} \quad (30) \end{aligned}$$

将式(30)两端对时间积分得:

$$V \leq -\frac{1}{2} \int_0^T \mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) dt + \frac{1}{2} \gamma^2 \int_0^T \boldsymbol{\delta}^T(t) \boldsymbol{\delta}(t) dt \quad (31)$$

由于 $V \geq 0$,所以

$$\int_0^T \|\mathbf{x}(t)\|_Q^2 dt \leq 2V + \gamma^2 \int_0^T \|\boldsymbol{\delta}(t)\|_Q^2 dt \quad (32)$$

所以,式(32)满足 H_∞ 性能。

由于 $\boldsymbol{\delta} \in L_2[0, \infty)$,则存在任意 $\mu > 0$,使得 $\|\boldsymbol{\delta}\| \leq \mu$ 成立。则式(31)满足:

$$V \leq -\frac{1}{2} \rho_{\min}(\mathbf{Q}) \|\mathbf{x}(t)\|^2 + \frac{1}{2} \gamma^2 \mu^2 \quad (33)$$

式中: $\rho_{\min}(\mathbf{Q})$ —矩阵 $\mathbf{Q}$ 的最小特征值。

由式(33)可知,存在任意 $\kappa > 0$,如果满足:

$$\rho_{\min}(\mathbf{Q}) > \frac{\gamma^2 \mu^2}{\kappa^2} \quad (34)$$

那么就存在 $\zeta > 0$,使得:

$$\dot{V} \leq -\zeta \|\mathbf{x}(t)\|^2 < 0 \quad (35)$$

即整个闭环控制系统,在受到外部扰动时,仍能满足运动稳定性。

3 数值仿真实验及结果分析

如图1所示,笔者以做平面运动的空间机械臂系统为例,结合式(18)所给出的系统控制方案进行系统数值仿真实验。

设计系统各个部分的真实惯性参数为:

$$\begin{aligned} l_0 = 1.0 \text{ m}, l_1 = 2.0 \text{ m}, l_2 = 2.0 \text{ m}, m_0 = 40.0 \text{ kg}, \\ m_1 = 4.0 \text{ kg}, J_0 = 35.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_1 = 3.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_2 = 3.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2. \end{aligned}$$

系统不确定部分的估计值为: $\hat{m}_1 = 1.0 \text{ kg}, \hat{J}_1 = 1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \hat{J}_2 = 1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

本研究所采用的模糊递归神经网络的网络输入为姿态角与两关节角的位置误差与速度误差,其每层节点数分别为:

$$m = 6, \quad n = 5, \quad o = 81, \quad p = 3$$

其他控制器参数如下:

$$\lambda^{-1} = 0.1, K_p = K_v = 16$$

$$\gamma = 0.1, \mathbf{R} = \mathbf{I}_3$$

设计空间机器人系统期望轨迹为:

$$\theta_{0d} = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{\pi}{5}t\right), \theta_{1d} = \frac{\pi}{3} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{3}t\right)$$

$$\theta_{2d} = \frac{\pi}{3} + \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{3}t\right)。$$

外部扰动函数设计为:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{0d} &= \frac{3}{2} \sin(\pi t), \boldsymbol{\tau}_{1d} = \frac{3}{2} \cos(\pi t), \boldsymbol{\tau}_{2d} = \\ & \frac{3}{2} \sin(\pi t)。 \end{aligned}$$

空间机器人系统初始构型为:

$$\theta(0) = [1.28 \quad 1.04 \quad 1.54]^T$$

控制整个仿真时间 $t = 10 \text{ s}$, 将计算力矩法与本研究
研究所设计控制方案对比, 仿真结果如下:

各关节角轨迹跟踪误差如图(4 ~ 6) 所示。

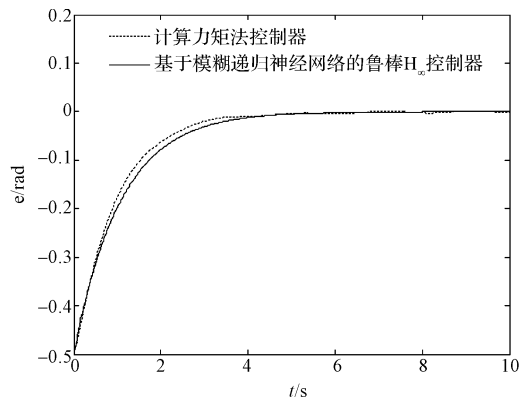


图 4 姿态角 θ_0 轨迹跟踪误差曲线

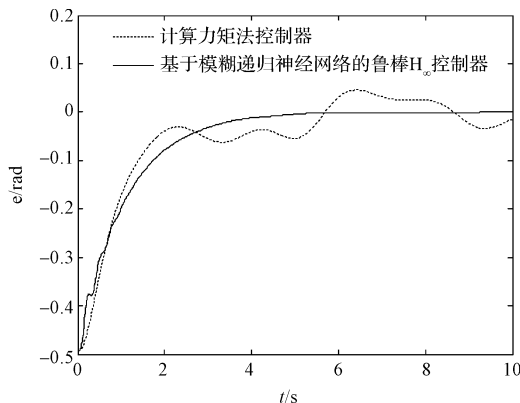


图 5 关节角 θ_1 轨迹跟踪误差曲线

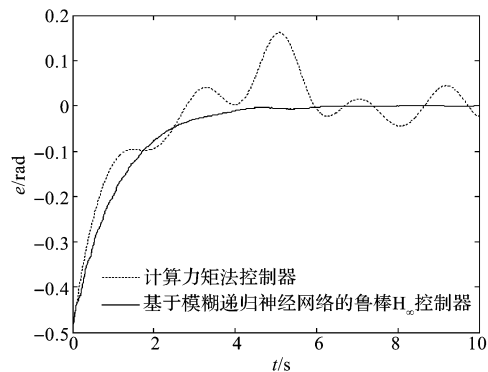


图 6 关节角 θ_2 轨迹跟踪误差曲线

从图中可知, 当整个空间机械臂系统存在参数不确定及外界干扰时, 标称计算力矩控制器的轨迹跟踪效果不能达到较高的控制精度。当使用本研究所设计的控制方法时, 关节轨迹跟踪效果明显变化, 并能达到较高的控制精度。

各姿态角轨迹跟踪曲线如图(7 ~ 9) 所示。

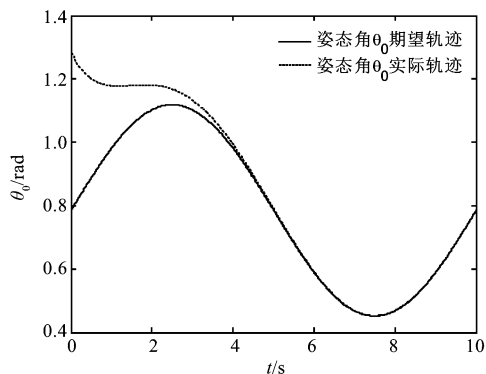


图 7 姿态角 θ_0 轨迹跟踪曲线

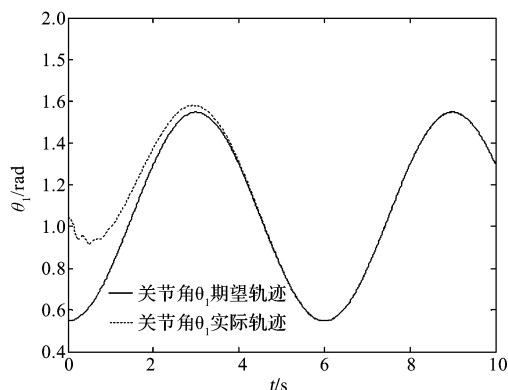


图 8 关节角 θ_1 轨迹跟踪曲线

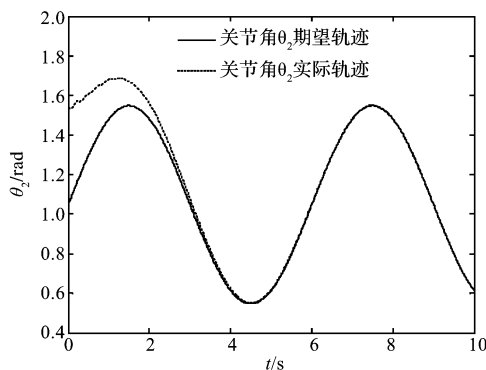


图 9 关节角 θ_2 轨迹跟踪曲线

从图中可以看出, 当使用本研究所设计的控制方法时, 被控系统在较短的时间内就可以追踪到所设计的期望轨迹, 并且在之后的时间内始终保持较高精度的轨迹跟踪效果。该结果表明, 使用本研究所设计的控制方法后, 空间机器人系统能够很好地解决未知系统参数所带来的影响。

整个数值仿真结果与李雅普诺夫稳定性证明结果吻合, 证明整个动力学系统满足运动稳定性要求。

4 结束语

本研究基于拉格朗日第二类动力学方程、系统动量守恒定理, 介绍了一种受到外部干扰时的空间机械

臂系统动力学模型。针对运动轨迹跟踪问题,本研究采用了一种基于模糊递归神经网络的 H_∞ 控制方法来达到轨迹跟踪的目的。以平面二杆空间机械臂为例进行了数值仿真分析。

结果表明,当系统受到外部扰动并具有不确定系统参数时,本研究所设计的控制方案能够对所设计轨迹进行精确跟踪。并且由于该控制方法不需要对载体位置进行控制,从而减少了燃料的消耗,有效地增加了整个空间机械臂系统的使用寿命。

参考文献 (References):

- [1] EVANS L. Canadian space robotics on board the interational space station[C]//**2005 CCToMM Symosium on Mechanisms, Machines, and Mechatronics**, Montreal: Canadian Space Agency, 2005:26-27.
- [2] DONG Qiu-huang, CHEN Li. The Impact Dynamics Analysis of Flexible Space Manipulator Capturing a Satellite and Neural Network Calming Motion Control and Vibration Suppression[J]. **Journal of mechanical engineering**, 2014, 50(9):34-42.
董楸煌,陈力. 柔性空间机械臂捕获卫星碰撞动力学分析、镇定运动神经网络控制机抑制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9):34-42.
- [3] SABATINI M, GASBARRI P, et al. Vibration control of a flexible space manipulator during on orbit operations[J]. **Acta astronautica**, 2012, 73(1):109-121.
- [4] 陈力,刘延柱,戈新生. 冗余度空间机械臂的动力学与优化控制[J]. 上海交通大学学报, 1997, 19(4):256-258.
- [5] SABATINI M, MONTI R, GASBARRI P, et al. Deployable space manipulator commanded by means of visual-based guidance and navigation[J]. **Acta Astronautica**, 2013, 83(4):27-43.
- [6] 史也,梁斌,徐文福,等. 满足暂态性能约束的自由漂

浮空间机器人反步自适应轨迹跟踪[J]. 机器人, 2013, 35(5):607-614.

- [7] 徐文福,王学谦,薛强,等. 保持基座稳定的双臂空间机器人轨迹规划研究[J]. 自动化学报, 2013, 39(1):69-80.
- [8] 黄松,胡晓兵,周飞,等. 关节机器人定位精度影响因素分析[J]. 机械, 2014, 42(4):70-74.
- [9] 戈新生,崔伟,赵秋玲. 刚柔性耦合机械臂轨迹跟踪与振动抑制[J]. 工程力学, 2005, 22(6):188-198.
- [10] RUTKOVSKII V Y. Motion equations and control of the free-flying space manipulator in the reconfiguration mode[J]. **Automation and Remote Control**, 2010, 71(1):70-86.
- [11] LI X J. YANG G H. Robust adaptive fault-tolerant control for uncertain linear systems with actuator failures[J]. **IET Control Theory Appl**, 2012, 6(10):1544-155.
- [12] 陈力,刘延柱,吴文龙. 一类空间机械臂系统的自适应控制与鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(1):71-75.
- [13] 梁捷,陈力. 柔性空间机械臂末端运动及柔性振动的模糊自适应补偿控制[J]. 兵工学报, 2011, 32(1):45-57.
- [14] SONG Z, YI J, ZHAO D, et al. A computed torque controller for uncertain robotic manipulator systems: fuzzy approach[J]. **Fuzzy Sets and Systems**, 2005, 154(2):208-226.
- [15] CHEN B S, LEE T T, CHANG Y C. H_∞ tracking design of uncertain nonlinear SISO systems: adaptive fuzzy approach[J]. **IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics: Part B**, 1996, 26(1):32-43.
- [16] SANNER R, SLOTINE J J E. Gaussian networks for direct adaptive control[J]. **IEEE Transactions on Neural Networks**, 1992, 3(6):837-863.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

张瑞芬. 受到外部扰动的空间机械臂基于模糊递归神经网络的控制策略[J]. 机电工程, 2017, 34(1):62-67.

ZHANG Rui-fen. Control method for space manipulator with external disturbance based on recurrent fuzzy neural networks[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34(1):62-67.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>