

文章编号: 1002-0446(2008)-05-0404-06

基于神经滑模的柔性连杆机械手末端位置控制

张宇¹, 杨唐文², 孙增圻¹

(1. 清华大学计算机科学与技术系清华信息科学与技术国家实验室智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084;

2. 北京交通大学计算机与信息技术学院, 北京 100044)

摘要: 为了提高柔性机械手末端位置控制的鲁棒性和精度, 提出了一种基于神经滑模的控制策略. 首先采用输入/输出线性化方法将动力学模型部分线性化, 使之分成输入/输出子系统与内动态子系统. 输入/输出子系统采用神经滑模控制, 内动态子系统采用状态反馈控制器镇定. 随后, 对控制系统内动态稳定性进行了分析, 并在两自由度柔性连杆机械手控制的仿真试验中得到了满意的结果. 试验结果表明, 在存在模型不确定性时, 该控制策略提高了控制系统的鲁棒性和控制精度.

关键词: 柔性连杆机械手; 神经滑模控制; 输入/输出部分线性化

中图分类号: TP24

文献标识码: A

Neuro-Sliding Mode Endpoint Control of Flexible-link Manipulators

ZHANG Yu¹, YANG Tang-wen², SUN Zeng-qi¹

(1. State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology,

Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To improve the robustness and position precision of endpoint control of flexible-link manipulators (FLMs), a control strategy based on neuro-sliding mode (NSM) is proposed. Firstly, the dynamics model is partially linearized by input-output linearization method, so it is separated into two subsystems of input-output subsystem and internal dynamics subsystem. An NSM controller is designed to control the input-output subsystem while a states feedback controller is employed to stabilize the internal dynamics subsystem. Then, stability of the internal dynamics is analyzed, and satisfactory results are obtained in the simulation of controlling a 2DOF FLM. The results indicate that the presented method improves the robustness and position precision of the FLM system when model uncertainty is considered.

Keywords: flexible-link manipulator (FLM); neuro-sliding mode control; partial input-output linearization

1 引言 (Introduction)

柔性机械手具有质量轻、速度快、能耗低和操作空间大等优点, 是机器人研究的一大热点, 然而由于其结构上具有柔性, 在运动过程中会产生形变和振动, 给机械手末端位置控制带来了一系列的难题, 如难于建立精确数学模型、存在非最小相位特性、存在强非线性耦合等.

许多控制理论被应用在柔性机械手的控制中. PD (比例微分) 控制^[1] 算法简单, 但是鲁棒性较差; 自适应控制^[2] 和鲁棒控制^[3] 算法都对柔性机械手的参数变化具有一定的适应能力, 但需要精确的模型和参数变动范围; 奇异摄动控制方法^[4]

是将柔性机械手模型分成快、慢子系统来分别控制, 但要求摄动参数小, 其应用具有一定局限性.

Moallem 等^[5] 和 Arisoy 等^[6] 采用输入/输出线性化方法将柔性机械手动态方程进行部分线性化, 分成内、外动态两部分, 同时通过输出重定义的方法克服系统的非最小相位问题. 但是该方法存在两个主要的缺点, 一是仍然需要精确的动力学模型, 当存在模型不确定性时, 控制器鲁棒性较差; 二是控制量存在矩阵求逆运算, 使控制解具有局部特性.

本文提出一种基于神经滑模^[7] 的柔性连杆机械手末端位置控制算法 (即用神经网络实现滑模控制), 将动态方程分成输入/输出子系统和内动态子

系统两部分后, 输入/输出子系统采用神经滑模控制, 内动态的镇定采用状态反馈控制. 控制器不需精确模型和求逆运算, 对模型不确定性和外部扰动具有较高的鲁棒性.

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}} \\ \ddot{\boldsymbol{\delta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) \\ \mathbf{S}_2(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}} \\ \dot{\boldsymbol{\delta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, \mathbf{M} 为正定对称惯性矩阵, $\mathbf{S}_1(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}})$ 、 $\mathbf{S}_2(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}})$ 是与哥氏力和向心力有关的项, \mathbf{D}_1 、 \mathbf{D}_2 为阻尼矩阵, \mathbf{K}_2 为刚度矩阵, \mathbf{u} 为关节输入力矩. $(\boldsymbol{\theta}^T \ \boldsymbol{\delta}^T)^T = [\theta_1 \cdots \theta_n \ \delta_{1,1} \cdots \delta_{1,m} \cdots \delta_{n,1} \cdots \delta_{n,m}]^T$ 是由机械手关节角和柔性模态组成的广义矢量, 其中 θ_i 为第 i 个关节角变量, $\delta_{i,j}$ 是第 i 个连杆的第 j 个模态变量, m 为柔性模态阶数.

假设在研究的操作范围内, \mathbf{M} 是可逆的, 令

$$\mathbf{M}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} \\ \mathbf{H}_{21} & \mathbf{H}_{22} \end{bmatrix}, \text{ 则由式 (1) 可得:}$$

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = -\mathbf{H}_{11}(\mathbf{S}_1(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) + \mathbf{D}_1 \dot{\boldsymbol{\theta}}) - \mathbf{H}_{12}(\mathbf{S}_2(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) + \mathbf{D}_2 \dot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}_2 \boldsymbol{\delta}) + \mathbf{H}_{11} \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\ddot{\boldsymbol{\delta}} = -\mathbf{H}_{21}(\mathbf{S}_1(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) + \mathbf{D}_1 \dot{\boldsymbol{\theta}}) - \mathbf{H}_{22}(\mathbf{S}_2(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) + \mathbf{D}_2 \dot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}_2 \boldsymbol{\delta}) + \mathbf{H}_{21} \mathbf{u} \quad (3)$$

为了克服非最小相位特性, 采用重定义输出^[9]作为机械手末端位置:

$$y_i = \theta_i + \frac{\alpha_i}{l_i} \sum_{j=1}^m \phi_{i,j} \delta_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

其中, $\phi_{i,j}$ 是第 i 个连杆的第 j 个空间模态形函数, l_i 是第 i 个连杆的长度. 当 $-1 < \alpha_i < 1$ 时, 能使系统零动态稳定, 写成向量形式为:

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\theta} + \mathbf{C} \boldsymbol{\delta} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{0} \\ & \ddots \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_n \end{bmatrix}$ 为 $n \times mn$ 维的矩

阵, 子矩阵 $\mathbf{C}_i = \frac{\alpha_i}{l_i} [\phi_{i,1}(l_i) \ \phi_{i,2}(l_i) \ \cdots \ \phi_{i,m}(l_i)]$, $i = 1, \dots, n$.

3 输入/输出部分线性化 (Partial input-output linearization)

柔性机械手属于欠驱动系统, 因此只能对其部

2 柔性连杆机械手动力学模型 (Dynamics model of flexible-link manipulators)

n 自由度柔性平面连杆机械手动力学方程^[8]如下:

分线性化^[10], 而剩下的动态则被认为是内动态. 根据输入/输出线性化方法^[11], 对输出进行微分运算得:

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{A}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) + \mathbf{B}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}) \mathbf{u} \quad (6)$$

其中, $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \cdots \ \alpha_n]^T$, 是跟输出重定义有关的参数向量.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) &= -(\mathbf{H}_{11} + \mathbf{C}\mathbf{H}_{21})(\mathbf{S}_1(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) + \mathbf{D}_1 \dot{\boldsymbol{\theta}}) \\ &\quad - (\mathbf{H}_{12} + \mathbf{C}\mathbf{H}_{22})(\mathbf{S}_2(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) + \mathbf{D}_2 \dot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}_2 \boldsymbol{\delta}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mathbf{B}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}) = \mathbf{H}_{11} + \mathbf{C}\mathbf{H}_{21} \quad (8)$$

定义 $\mathbf{z} = [\boldsymbol{\mu}^T \ \boldsymbol{\psi}^T]^T$, 其中, $\boldsymbol{\mu} = [\boldsymbol{\mu}_1^T \ \boldsymbol{\mu}_2^T]^T = [\mathbf{y}^T \ \dot{\mathbf{y}}^T]^T$, $\boldsymbol{\psi} = [\boldsymbol{\psi}_1^T \ \boldsymbol{\psi}_2^T]^T = [\boldsymbol{\delta}^T \ \dot{\boldsymbol{\delta}}^T]^T$ 得到状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\mu}}_1 = \boldsymbol{\mu}_2 \\ \dot{\boldsymbol{\mu}}_2 = \mathbf{A}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) + \mathbf{B}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}) \mathbf{u} \\ \dot{\boldsymbol{\psi}}_1 = \boldsymbol{\psi}_2 \\ \dot{\boldsymbol{\psi}}_2 = \mathbf{E}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) + \mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}) \mathbf{u} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) &= -\mathbf{H}_{21}(\mathbf{S}_1(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) + \mathbf{D}_1 \dot{\boldsymbol{\theta}}) \\ &\quad - \mathbf{H}_{22}(\mathbf{S}_2(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) + \mathbf{D}_2 \dot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}_2 \boldsymbol{\delta}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}) = \mathbf{H}_{21} \quad (11)$$

式 (9) 中, 当 $\mathbf{B}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta})$ 可逆时, $\boldsymbol{\mu}_1$ 、 $\boldsymbol{\mu}_2$ 构成输入/输出子系统:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\mu}}_1 = \boldsymbol{\mu}_2 \\ \dot{\boldsymbol{\mu}}_2 = \mathbf{v} \end{cases} \quad (12)$$

而 $\boldsymbol{\psi}_1$ 、 $\boldsymbol{\psi}_2$ 则构成系统的内部动态:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\psi}}_1 = \boldsymbol{\psi}_2 \\ \dot{\boldsymbol{\psi}}_2 = \mathbf{E}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}}) + \mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}) \\ \quad \mathbf{B}^{-1}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta})(\mathbf{v} - \mathbf{A}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}})) \end{cases} \quad (13)$$

其中, \mathbf{v} 是待设计控制律.

4 控制器设计 (Controller design)

控制器设计不仅要考虑输出的跟踪控制, 也要考虑柔性模态的镇定. \mathbf{u} 由输入/输出子系统控制量 \mathbf{u}_{ex} 和内动态控制量 \mathbf{u}_{in} 组成, 控制结构见图 1.

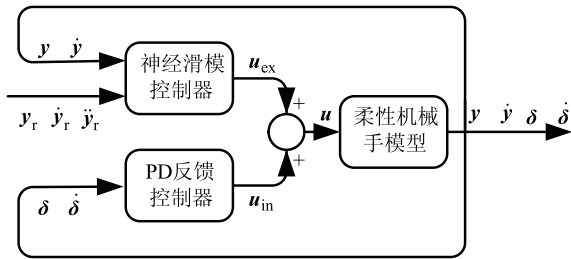


图 1 柔性机械手控制结构

Fig.1 Control structure of flexible-link manipulators

4.1 输出跟踪控制

首先设计传统滑模控制器 [12], 得:

$$\mathbf{u}_{eq} = \mathbf{B}^{-1}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta})(\ddot{\mathbf{y}}_r + \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{e} - \mathbf{A}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\delta}})) \quad (14)$$

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{B}^{-1}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}) \mathbf{K}_s \text{sgn}(\mathbf{s}) \quad (15)$$

\mathbf{u}_{eq} 是等效控制量, $\mathbf{K}_s (n \times n)$ 是滑模增益矩阵, \mathbf{u}_s 是切换控制量, $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}[\lambda_1 \cdots \lambda_n]$ 是滑模面参数, 角标 r 表示参考量, 角标 s 表示与切换控制相关的量, $\text{sgn}(\mathbf{s}) = [\text{sgn}(s_1) \cdots \text{sgn}(s_n)]^T$ 为符号函数向量.

然后, \mathbf{u}_{eq} 和 \mathbf{u}_s 分别用两个前馈神经网络来实现, 记为 NN_1 和 NN_2 . NN_1 用来计算等效控制量 \mathbf{u}_{eq} , 网络结构见图 2.

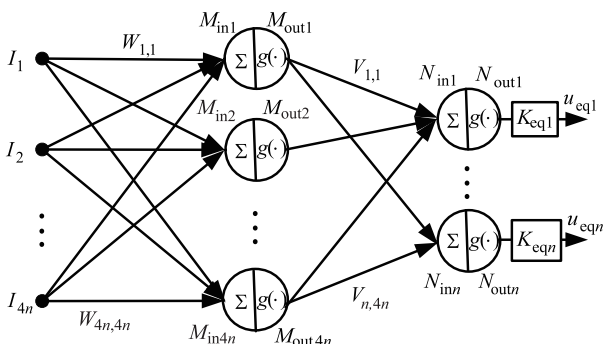


图 2 NN_1 结构图

Fig.2 Structure of NN_1

输入为 $\mathbf{I} = [I_1 \cdots I_{4n}]^T = [\dot{\mathbf{y}}_r^T \ \ddot{\mathbf{y}}_r^T \ \mathbf{y}^T \ \dot{\mathbf{y}}^T]^T$, 个数为 $4n$, 隐层节点数与输入节点数相等为 $4n$, 输出节点数为 n . NN_1 第 1 层权重矩阵为 \mathbf{W} , 第 2 层权重

矩阵为 \mathbf{V} . $\mathbf{K}_{eq} = \text{diag}[K_{eq1} \cdots K_{eqn}]$ 为输出增益, 等效控制向量 $\mathbf{u}_{eq} = [u_{eq1} \cdots u_{eqn}]^T$, $g(\cdot)$ 采用 sigmoid 函数. NN_1 的输入输出关系为:

$$\mathbf{M}_{inj} = \sum_{i=1}^{4n} W_{j,i} \cdot I_i, \quad \mathbf{M}_{outj} = g(\mathbf{M}_{inj}), \quad j = 1, \cdots, 4n \quad (16)$$

$$\mathbf{N}_{inj} = \sum_{i=1}^{4n} V_{j,i} \cdot \mathbf{M}_{outi}, \quad \mathbf{N}_{outj} = g(\mathbf{N}_{inj}), \quad j = 1, \cdots, n \quad (17)$$

$$u_{eqj} = \mathbf{N}_{outj} \cdot \mathbf{K}_{eqj}, \quad j = 1, \cdots, n \quad (18)$$

从而得到神经滑模等效控制:

$$\mathbf{u}_{eq} = \mathbf{K}_{eq} \cdot g(\mathbf{V} \cdot g(\mathbf{W} \cdot \mathbf{I})) \quad (19)$$

当系统状态进入滑动模态时, 切换控制量 \mathbf{u}_s 为 0, 系统的控制量由 \mathbf{u}_{eq} 提供, 因此 NN_1 权重更新的梯度方向是使 \mathbf{u}_s 趋于零的方向. 定义指标函数为:

$$J_1 = 1/2 \sum_{j=1}^n (u_{eqj}^* - u_{eqj})^2 = 1/2 \sum_{j=1}^n (u_{sj})^2 \quad (20)$$

u_{eqj}^* 是系统状态在滑模面上时的等效控制量, 此时 $u_{sj} = 0$. 当 u_{eqj} 偏离 u_{eqj}^* 时, $u_{sj} \neq 0$ 且用于补偿该偏差, 因此 $u_{eqj}^* - u_{eqj} = u_{sj}$.

采用反向递推算算法来推导 NN_1 的权重更新算法 [7]. NN_1 权重 \mathbf{V} 更新算法为

$$\begin{aligned} \frac{dV_{j,i}}{dt} &= -\mu_1 \frac{\partial J_1}{\partial V_{j,i}} \\ &= -\mu_1 \frac{\partial J_1}{\partial u_{eqj}} \frac{\partial u_{eqj}}{\partial N_{outj}} \frac{\partial N_{outj}}{\partial N_{inj}} \frac{\partial N_{inj}}{\partial V_{j,i}} \quad (21) \\ &= \mu_1 \cdot u_{sj} \cdot \mathbf{K}_{eqj} \cdot g'(N_{inj}) \cdot \mathbf{M}_{outi} \end{aligned}$$

NN_1 权重 \mathbf{W} 更新算法为

$$\begin{aligned} \frac{dW_{j,i}}{dt} &= -\mu_2 \frac{\partial J_1}{\partial W_{j,i}} \\ &= -\mu_2 \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial J_1}{\partial u_{eqk}} \frac{\partial u_{eqk}}{\partial N_{outk}} \frac{\partial N_{outk}}{\partial N_{ink}} \frac{\partial N_{ink}}{\partial M_{outj}} \frac{\partial M_{outj}}{\partial M_{inj}} \frac{\partial M_{inj}}{\partial W_{j,i}} \right) \\ &= \mu_2 \sum_{k=1}^n (u_{sk} \cdot \mathbf{K}_{eqk} \cdot g'(N_{inj}) \cdot V_{k,j}) \cdot g'(M_{inj}) \cdot I_i \quad (22) \end{aligned}$$

NN_2 用于计算切换控制量 \mathbf{u}_s , 网络非全连接, 其前向通道是切换控制的计算过程. 网络结构见图 3.

输入为误差向量 $\mathbf{E} = [e_1 \cdots e_n \ \dot{e}_1 \cdots \dot{e}_n]^T$, 个数为 $2n$, 隐层节点数与滑模面个数相等为 n , 输出节点数为 n . NN_2 第 1 层权重矩阵为 \mathbf{G} , 第 2 层权重矩阵为 \mathbf{K}_s . 切换控制向量 $\mathbf{u}_s = [u_{s1} \cdots u_{sn}]^T$. NN_2 的输入输出关系为:

$$s_j = \sum_{i=j,j+n} G_{j,i} \cdot I_i, \quad s_{outj} = g(s_j), \quad j = 1, \cdots, n \quad (23)$$

$$u_{sj} = \sum_{i=1}^n K_{sj,i} \cdot s_{outi}, \quad j = 1, \dots, n \quad (24)$$

从而得到神经滑模切换控制

$$u_s = K_s \cdot g(G \cdot E) \quad (25)$$

u_s 控制量应满足滑模到达条件, 它的控制作用是让 s 和 u_s 趋向于零. 因此定义指标函数

$$J_2 = \lambda \cdot s^T s + (1 - \lambda) u_s^T u_s, \quad 0 < \lambda < 1 \quad (26)$$

采用 BP 算法推导权重更新算法^[7]. NN_2 权重 K_s 更新算法为

$$\begin{aligned} \frac{dK_{sj,i}}{dt} &= -\gamma_1 \frac{\partial J_2}{\partial K_{sj,i}} \\ &= 2\lambda \gamma_a s_j \left(\int_0^t g(s_i) dt \right) - 2\gamma_b (1 - \lambda) u_{sj} g(s_i) \end{aligned} \quad (27)$$

NN_2 权重 G 更新算法为

$$\begin{aligned} \frac{dG_{j,i}}{dt} &= -\gamma_2 \frac{\partial J_2}{\partial G_{j,i}} \\ &= -2\lambda \gamma_c s_j e(i) - (1 - \lambda) \gamma_c \left(\sum_{k=1}^n u_{sk} K_{sk,j} \right) \\ &\quad (1 - g^2(s_j)) e(i) \end{aligned} \quad (28)$$

其中, γ_a 、 γ_b 、 γ_c 分别是不同的学习率, 为固定常数.

至此, 完成了柔性连杆机械手输入/输出子系统的神经滑模控制器设计:

$$u_{ex} = K_{eq} \cdot g(V \cdot g(W \cdot I)) + K_s \cdot g(G \cdot E) \quad (29)$$

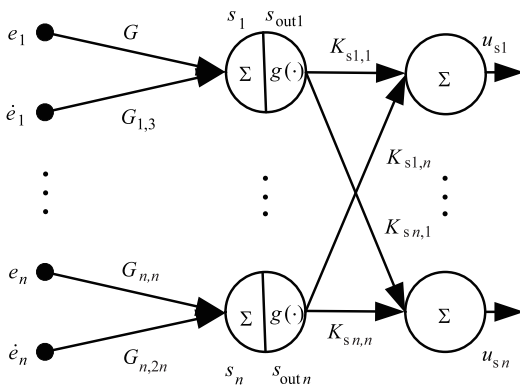


图 3 NN_2 结构图

Fig.3 Structure of NN_2

4.2 柔性模态镇定

为了对内动态进行镇定, 使柔性模态有界. 采用与 Moallem 等^[5] 相同的状态反馈控制:

$$u_{in} = K_\delta \delta + K_{\dot{\delta}} \dot{\delta} \quad (30)$$

可以采用极点配置的方法设计控制增益 K_δ 和 $K_{\dot{\delta}}$, 使内部动态稳定.

5 内动态稳定性分析 (Stability analysis of internal dynamics)

根据上一节内容可知, 总的控制量为:

$$\begin{aligned} u &= u_{ex} + u_{in} \\ &= K_{eq} \cdot g(V \cdot g(W \cdot I)) + K_s \cdot g(G \cdot E) + K_\delta \delta + K_{\dot{\delta}} \dot{\delta} \end{aligned} \quad (31)$$

将式 (10)、(11)、(31) 代入式 (9) 可得内动态

$$\begin{cases} \dot{\psi}_1 = \psi_2 \\ \dot{\psi}_2 = (-H_{21}K_2 + H_{21}K_\delta) \psi_1 + (-H_{22}D_2 + H_{21}K_{\dot{\delta}}) \psi_2 \\ \quad + [-H_{21}(S_1 + D_1\mu_2) - H_{22}S_2 + H_{21}(K_{eq} \cdot g(V \cdot g(W \cdot I)) + K_s \cdot g(G \cdot E))] \end{cases} \quad (32)$$

在 $\psi_1 = 0$ 和 $\psi_2 = 0$ 处对内动态进行线性化

$$\dot{\psi} = A_\psi \cdot \psi \quad (33)$$

其中, $A_\psi = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -H_{220}K_2 + H_{210}K_\delta & -H_{220}D_2 + H_{210}K_{\dot{\delta}} \end{bmatrix}$, $H_{ij0} = H_{ij}|_{\psi_1=0, \psi_2=0}$. 如果设计反馈增益 K_δ 和 $K_{\dot{\delta}}$, 以保证 A_ψ 是赫尔维兹矩阵, 那么内动态在 $\psi_1 = 0$ 和 $\psi_2 = 0$ 处是渐近稳定的^[5]. 根据线性控制理论可知, 内动态在式 (31) 的控制律下是局部渐近稳定的.

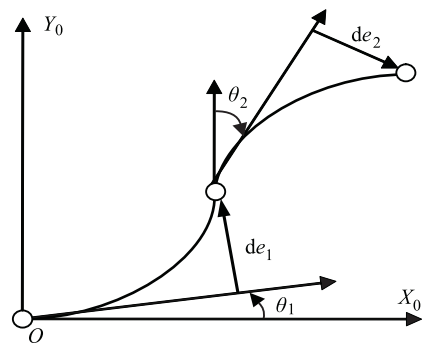


图 4 两自由度柔性连杆机械手结构图

Fig.4 Structure of 2DOF flexible-link manipulators

6 仿真试验 (Simulations)

为了验证算法有效性和优越性, 分别采用 Moallem 等^[5] 的输入/输出线性化方法和本文改进算法对两自由度柔性连杆机械手进行末端位置控制的仿真对比试验. 机械手结构示意图见图 4.

机械手参数见表 1, 仿真模型采用文^[8] 推导的柔性连杆机械手封闭动力学模型. 机械手末端位置

输出重定义参数 $\alpha = [0.9 \ 0.81]^T$. 期望末端轨迹为 $y_{r1} = -\cos(0.3\pi t)$, $y_{r2} = -\cos(0.3\pi t)$ (单位: rad).

输入/输出线性化方法中控制参数为 $K_p = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 25 \end{bmatrix}$, $K_d = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$, 神经滑模控制算法中

NN_1 初始权值是零均值随机数, NN_2 初始权值为 $G = \begin{bmatrix} 0.8 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}$, $K_s = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 1.6 \end{bmatrix}$. NN_1 和 NN_2 的学习率分别为 0.1 和 0.001. 仿真周期为 0.1 ms, 采样周期为 2 ms.

表 1 两自由度柔性连杆机械手参数

Tab.1 Parameters of 2-DOF flexible-link manipulator

类别	长度 l/m	质量 m/kg	抗弯刚度 $EI/N \cdot m^2$	末端等效质量 m_p/kg
连杆 1	0.5	0.1	10	0.1
连杆 2	0.5	0.1	10	

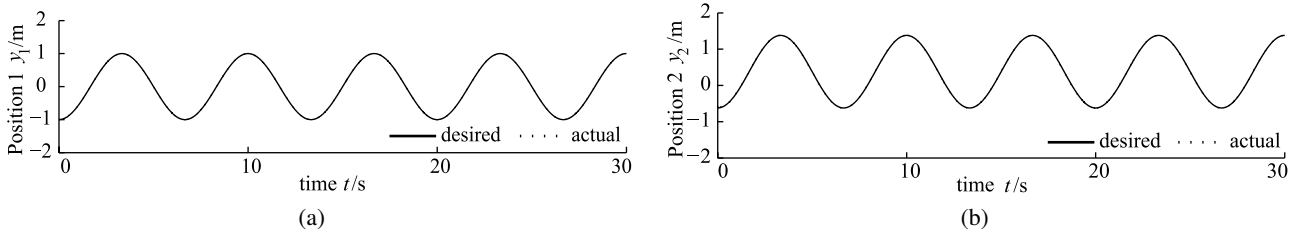


图 5 机械手末端位置跟踪轨迹 (基于输入/输出线性化, 不含模型不确定性)

Fig.5 Endpoint tracking trajectory of manipulator (based on I/O linearization, without model uncertainty)

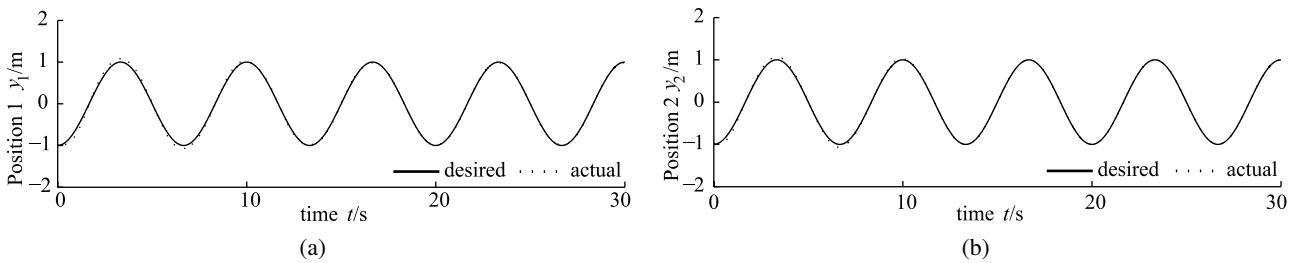


图 6 机械手末端位置跟踪轨迹 (基于神经滑模, 不含模型不确定性)

Fig.6 Endpoint tracking trajectory of manipulator (based on neuro-sliding mode, without model uncertainty)

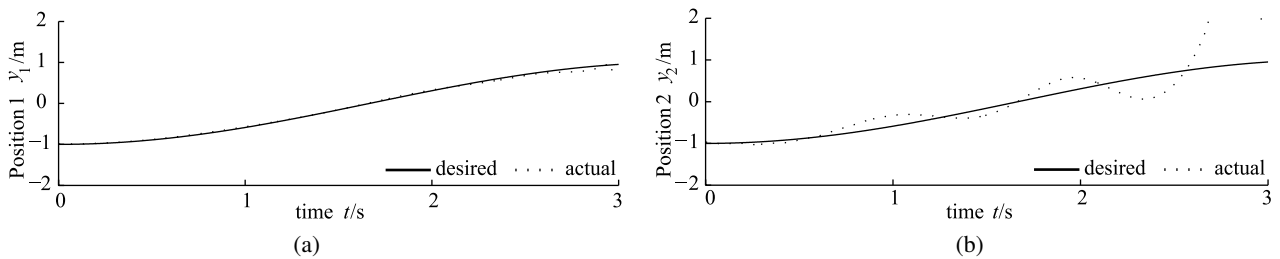


图 7 机械手末端位置跟踪轨迹 (基于输入/输出线性化, 含模型不确定性)

Fig.7 Endpoint tracking trajectory of manipulator (based on I/O linearization, with model uncertainty)

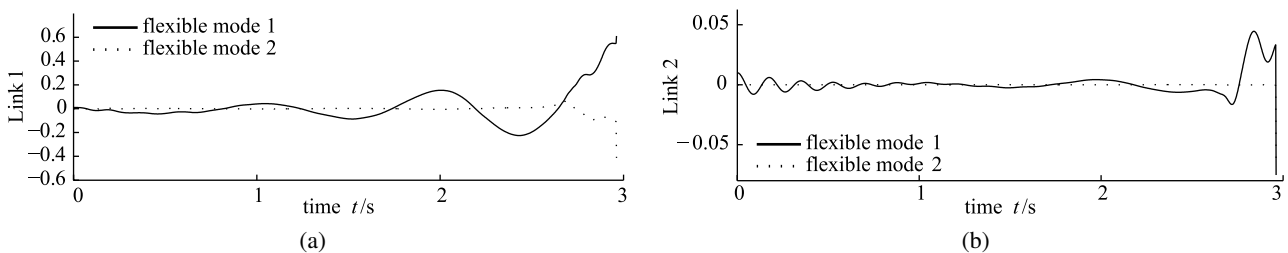


图 8 机械手柔性模态曲线 (基于输入/输出线性化, 含模型不确定性)

Fig.8 Flexible modal curve of manipulator (based on I/O linearization, with model uncertainty)

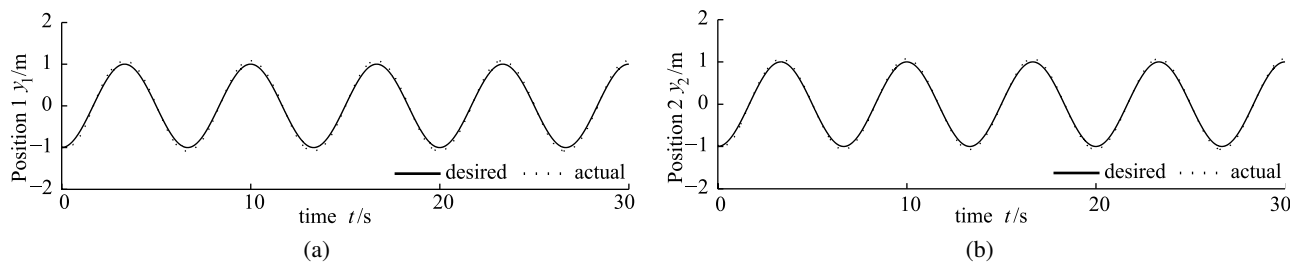


图9 机械手末端位置跟踪轨迹(基于神经滑模,含模型不确定性)

Fig.9 Endpoint tracking trajectory of manipulator (based on neuro-sliding mode, with model uncertainty)

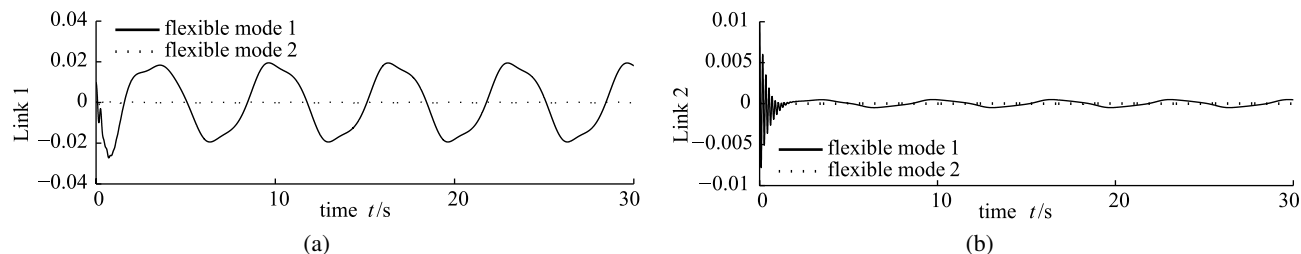


图10 机械手柔性模态曲线(基于神经滑模,含模型不确定性)

Fig.10 Flexible modal curve of manipulator (based on neuro-sliding mode, with model uncertainty)

不存在模型不确定性时两种方法的控制结果见图5和图6.图5所示,基于输入/输出线性化的控制方法具有较高控制精度,图6所示,神经滑模控制方法在不需模型信息的情况下,仍具有较高控制精度.

为了检验控制系统鲁棒性,增加了模型不确定性,重复上述实验.图7~图10是存在模型不确定性情况下两种方法的控制结果.图7和图8所示,基于输入/输出线性化方法的末端位置和柔性模态都趋于发散,控制系统不稳定.图9和图10显示,神经滑模控制算法对于模型不确定性具有一定的鲁棒性,虽然控制精度有所下降,但是仍然能够对柔性连杆机械手末端位置进行稳定控制,且保证柔性模态有界.

7 结论 (Conclusion)

本文对柔性连杆机械手末端位置控制问题进行了深入研究,基于输入/输出线性化的控制方法存在两个主要问题,一是需要对象精确模型,二是输入/输出子系统控制含矩阵求逆,使控制解具有局部特性.为了解决这些问题,引入了神经滑模控制算法,即利用神经网络的非线性逼近能力使控制器不需要精确模型和矩阵求逆运算.同时由于神经网络能够在线调整控制器参数,使控制算法具有自适应能力.利用两自由度柔性连杆机械手进行对比仿真试验,结果显示,当不存在模型不确定性时,两种方

法都能以较高的精度实现稳定控制;当存在模型不确定性时,改进的算法具有较高的鲁棒性.因此,通过引入神经滑模控制对输入/输出线性化方法进行改进,降低了对模型的依赖程度,提高了鲁棒性,并解决了控制解由于求逆运算带来的局限性问题.

参考文献 (References)

- [1] Wang W J, Lu S S, Hsu C F. Experiments on the position control of a one-link flexible robot arm[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(3): 373~377.
- [2] Yang J H, Lian F L, Fu L C. Adaptive robust control for flexible manipulators[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995. 1223~1228.
- [3] Caracciolo R, Richiedei D, Trevisani A, et al. Robust mixed-norm position and vibration control of flexible link mechanisms[J]. Mechatronics, 2005, 15(7): 767~791.
- [4] Etxebarria V, Sanz A, Lizarraga I. Control of a lightweight flexible robotic arm using sliding modes[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2005, 2(2): 103~110.
- [5] Moallem M, Patel R V, Khorasani K. Flexible-link Robot Manipulators (Control Techniques and Structural Design)[M]. London, UK: Springer-Verlag, 2000.
- [6] Arisoy A, Gokasan M, Bogosyan O S. Partial feedback linearization control of a single flexible link robot manipulator[A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advances in Space Technologies[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005. 282~287.

- [4] Masutani Y, Miyazaki F, Arimoto S. Sensory feedback control for space manipulators[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1989. 1346~1351.
- [5] 洪炳熔, 李华忠. 自由飞行空间机器人的关节驱动力矩求解算法[J]. 机器人, 1999, 21(5): 328~334.
Hong Bing-rong, Li Hua-zhong. Computation algorithm of joint driven torque for free flying space robots[J]. Robot, 1999, 21(5): 328~334.
- [6] 李华忠, 洪炳熔. 基于关节驱动力矩的自由飞行空间机器人捕捉目标控制算法[J]. 机器人, 2000, 22(3): 161~168.
Li Hua-zhong, Hong Bing-rong. Control algorithm based on joint driven torque to capture target for free flying space robots[J]. Robot, 2000, 22(3): 161~168.
- [7] 李华忠, 杨维萍, 柳长安. 基于虚拟现实的空间机器人共享控制系统及其仿真[J]. 宇航学报, 2000, 21(3): 100~105.
Li Hua-zhong, Yang Wei-ping, Liu Chang-an. Shared control system and its simulation based on virtual reality[J]. Journal of Astronautics, 2000, 21(3): 100~105.
- [8] Vafa Z, Dubowsky S. Kinematics and dynamics of space manipulators: The virtual manipulator approach[J]. The International Journal of Robotics Research, 1990, 9(4): 3~21.
- [9] Papadopoulos E, Dubowsky S. On the nature of control algorithms for space manipulators[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1990. 1102~1108.

作者简介:

李华忠(1963-), 男, 工学博士. 研究领域: 空间机器人, 遥测遥控, 嵌入式软件, LBS, 导航技术.

洪炳熔(1939-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 人工智能, 空间机器人, 虚拟现实技术.

(上接第409页)

- [7] Ertugrul M, Kaynak O. Neuro sliding mode control of robotic manipulators[J]. Mechatronics, 2000, 10(1-2): 239~263.
- [8] De Luca A, Siciliano B. Closed-form dynamic model of planar multilink lightweight robots[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1991, 21(4): 826~839.
- [9] Talebi H A, Patel R V, Khorasani K. Control of Flexible-Link Manipulators Using Neural Networks[M]. Berlin, Germany: Springer, 2001.
- [10] Arisoy A, Gokasan M, Bogosyan O S. Sliding mode based position control of a flexible-link arm[A]. Proceedings of the 12th International Power Electronics and Motion Control Conference[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006. 402~407.
- [11] Slotine J J, Li W P. Applied Nonlinear Control[M]. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1990.
- [12] Hung J Y, Gao W, Hung J C. Variable structure control: A survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40(1): 2~22.

作者简介:

张宇(1980-), 男, 博士生. 研究领域: 空间机器人, 智能控制.

杨唐文(1971-), 男, 博士. 研究领域: 机器人技术, 计算机视觉, 人工智能.

孙增圻(1943-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 空间机器人, 智能控制, 人工智能.