

漂浮基空间机器人自适应 RBF 网络终端滑模控制*

郭胜鹏 李东旭 孟云鹤[†] 范才智

(国防科学技术大学航天科学与工程学院,长沙 410073)

摘要 主要研究漂浮基空间机器人对工作空间连续轨迹跟踪控制问题. 针对系统动力学模型中非线性项未知,以及参数不确定性和外界扰动无法估计的情况,提出了基于自适应 RBF 网络终端滑模控制方法. 该方法结合了非线性滑动流形与径向基函数特性,利用自适应 RBF 网络在线学习系统中的不确定性,使得无需精确的动力学模型亦能保证系统在有限时间内快速稳定. 根据 Lyapunov 方法设计的自适应增益保证闭环控制系统具有全局稳定性,并且有效抑制抖振现象. 针对 6 关节空间机器人的轨迹跟踪控制仿真表明,提出的自适应 RBF 网络终端滑模控制方法能够基于不完整动力学模型实现高精度轨迹跟踪,且误差在有限时间内快速收敛,系统抖振也得到了有效抑制.

关键词 漂浮基空间机器人, 自适应 RBF 网络, 终端滑模

DOI: 10.6052/1672-6553-2013-093

引言

空间机器人在轨操作技术是空间任务实施的重要支撑,在空间探索中具有广阔的应用前景^[1]. 在轨装配、维修更换等高级在轨任务对空间机器人操作精度提出了很高要求. 但是,漂浮基空间机器人(一种典型的工作模式)^[2,3]具有多自由度、强非线性、动力学耦合等特性,很难精确建立其动力学模型,尤其是非线性部分^[4]. 并且漂浮基空间机器人系统的参数不确定性与外界扰动比较突出,受轨道动力学影响,其操作时间也受到一定制约. 因此,地面机器人的控制方法无法直接应用于空间机器人,漂浮基空间机器人在任务空间快速、精确的运动控制是一个难点问题^[5,6].

相关学者针对这一复杂的非线性系统控制问题展开了研究. 其中滑模控制是一种非线性控制方法,具有鲁棒性强、对参数敏感性低等特点. 文献[7]研究了滑模控制在 14 自由度空间机器人中的应用. Arisoy 等^[8]利用高阶滑模实现了对柔性空间机器人的控制器设计. 虽然滑模控制能够适用于空间机器人等复杂非线性系统,但传统滑模控制基于线性滑动流形设计,收敛时间与控制精度均受到限

制^[9]. 为此,有学者提出了有限时间终端滑模控制^[10]. 相比传统滑模控制,终端滑模基于非线性滑动流形设计,保证在有限时间内收敛,因此收敛更快,且控制精度更高,受到了广泛关注. Feng 等^[11,12]提出了非奇异终端滑模,消除了终端滑模控制中奇异问题. 终端滑模在地面机器人控制中广泛应用^[13-15],结果表明收敛快、精度高且可抑制抖振. 文献[16]在飞行器编队控制中引入终端滑模控制,在复杂空间环境下实现了快速编队. 近年来,终端滑模与神经网络、模糊系统等智能控制相结合^[17,18],使控制器设计不依赖于精确的数学模型.

终端滑模控制适用于复杂非线性系统快速精确的运动控制,但其在空间机器人中的应用研究并不多见. 本文针对漂浮基空间机器人,研究其在工作空间 6 自由度轨迹跟踪控制问题. 考虑系统的非线性项无法准确建模,提出自适应 RBF 网络终端滑模控制方法. 基于非奇异滑动流形,不依赖完整的动力学模型设计空间机器人非线性控制器,并根据 Lyapunov 方法设计自适应增益保证系统全局稳定性.

1 动力学模型

考虑空间机器人由 6 关节刚性机械臂安装在

2013-07-25 收到第 1 稿,2013-11-10 收到修改稿.

* 校基础预研资助项目(JC13-01-08)

[†] 通讯作者 E-mail: mengyuhe_nudt@163.com

自由漂浮的基座飞行器上构成,如图1所示. 关节均为单自由度旋转铰,机械臂臂杆为均质直杆,末端执行器与机械臂末端固连,可看做末端臂杆的一部分. 因此,空间机器人系统共12个自由度,由 $q_b \in \mathfrak{R}^6, q_m \in \mathfrak{R}^6$ 分别表示基座和机械臂的位姿坐标向量.

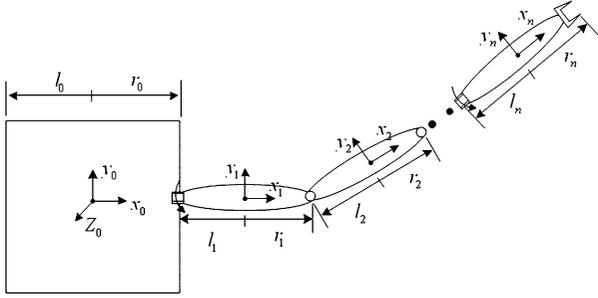


图1 漂浮基空间机器人系统示意图

Fig.1 The free-floating space robot system

对漂浮基空间机器人系统,基座无控制力矩作用. 假定系统不受外力和外力矩作用,并且不考虑关节及系统摩擦,则系统线动量与角动量守恒^[5,6]. 利用系统角动量守恒这一非完整约束,由增广体矢量模型^[19]建立漂浮基空间机器人系统在关节空间的动力学方程:

$$H(q_m)\ddot{q}_m + \left[\frac{\partial H(q_m)}{\partial q_m} - \frac{1}{2} \frac{\partial H(q_m)}{\partial q_m} \right] \dot{q}_m = \tau \quad (1)$$

其中, $H = M_m - M_{bm}^T M_b^{-1} M_{bm} \in \mathfrak{R}^{6 \times 6}$ 为系统惯性矩阵,正定对称可逆且仅与机械臂关节角有关; $C(q_m, \dot{q}_m) = \frac{\partial H(q_m)}{\partial q_m} - \frac{1}{2} \dot{q}_m^T \frac{\partial H(q_m)}{\partial q_m} \in \mathfrak{R}^6$ 为机械臂非线性项; $\tau \in \mathfrak{R}^6$ 为机械臂关节力矩.

实际中机械臂末端在工作空间跟踪期望轨迹是控制系统设计的目标,因此将空间机器人关节空间动力学方程向工作空间映射,推导得到以机械臂末端的位置 $r_e \in \mathfrak{R}^3$ 和姿态 $q_e \in \mathfrak{R}^3$ 为广义坐标的工作空间动力学方程.

令 $x_e = [r_e^T \quad q_e^T]^T$,其中 q_e 由 $x-y-z$ 顺序转动的欧拉角表示, $q_e = [\psi \quad \vartheta \quad \theta]^T$. 则由增广体矢量模型,机械臂末端在工作空间的速度表示为:

$$\dot{x}_e = J_x(q_b, q_m) \cdot \dot{q}_m \quad (2)$$

其中, $J_x(q_b, q_m) = J_m - J_b M_b^{-1} M_{bm} \in \mathfrak{R}^{6 \times 6}$ 表示系统广义雅克比矩阵^[20], J_b, J_m 分别为基座和机械臂的雅克比矩阵.

对式微分并将式代入,得到工作空间动力学方

程:

$$\ddot{x}_e = \bar{H}(q_b, q_m) \tau + \bar{C}(q_m, \dot{q}_m, q_b, \dot{q}_b) \quad (3)$$

其中,

$$\bar{H} = J_x H^{-1} \in \mathfrak{R}^{6 \times 6}$$

$$\bar{C} = J_x \dot{q}_m - J_x H^{-1} C \dot{q}_m \in \mathfrak{R}^6$$

考虑实际系统参数存在一定的不确定性以及未建模动态,将模型中参数矩阵 \bar{H} 和 \bar{C} 看成由确知项和不确定项两部分组成,其中, \bar{H}_0 和 \bar{C}_0 表示参数矩阵中确知部分,而 $\Delta \bar{H}$ 和 $\Delta \bar{C}$ 表示参数不确定部分. 则系统动力学方程改写为:

$$\ddot{x}_e = \bar{H}_0(q_b, q_m) \tau + \bar{C}_0(q_m, \dot{q}_m, q_b, \dot{q}_b) + \bar{F}(q_m, \dot{q}_m, q_b, \dot{q}_b, \tau) \quad (4)$$

其中,

$$\bar{F} = \Delta \bar{H}(q_b, q_m) \tau + \Delta \bar{C}(q_m, \dot{q}_m, q_b, \dot{q}_b)$$

设系统受到外界扰动为 $d(t)$,令 $x_1 = x_e, x_2 = \dot{x}_1, u = \tau$ 将式改写为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \bar{H}_0(q_b, q_m) \cdot u + \bar{C}_0(q_m, \dot{q}_m, q_b, \dot{q}_b) + \bar{F}(q_m, \dot{q}_m, q_b, \dot{q}_b, \tau) + d(t) \end{cases} \quad (5)$$

漂浮基空间机器人末端的工作空间可以分为路径无关工作空间(PIW)和路径相关工作空间(PDW)^[19],若期望轨迹完全位于PIW内,则机械臂末端运动过程中不会出现动力学奇异,即 $\det(J_x) \neq 0$. 若期望轨迹进入PDW内,则机械臂在PDW内运动时存在动力学奇异, $\det(J_x) = 0$. 因此,对Jacobian矩阵求逆作如下处理^[21]:

$$J_x^{-1} = \begin{cases} J_x^{-1} & x \in \text{PIW} \\ \left((J_x^T J_x + \kappa^2 I)^{-1} J_x^T \quad 0 < \kappa < 1 \right) & x \in \text{PDW} \end{cases}$$

其中, I 为相应维数的单位矩阵.

2 控制器设计

2.1 非奇异终端滑模控制器设计

终端滑模控制是基于非线性流形设计的有限时间控制方法,具有良好的鲁棒性和抗扰动性能. 本节将非奇异终端滑模控制技术推广到多自由度、强耦合空间机器人系统,设计向量形式的有限时间收敛的非线性控制律.

定义系统跟踪误差向量 $E = x_1 - x_d, \dot{E} = x_2 - \dot{x}_d$,其中, $x_d = [r_d^T \quad q_d^T]^T$ 为期望轨迹. 设计非线性滑动流形:

$$S = E + B^{-1} \cdot \dot{E}^{b/a} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{aligned} S &= [s_1, s_2, \dots, s_6]^T \\ B &= \text{diag}[\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_6], \beta_i > 0 \\ a &= 2i_a + 1, b = 2i_b + 1 \end{aligned}$$

i_a, i_b 均为整数, 且 $0 < i_a < i_b \leq 2i_a$.

对式求一阶微分, 沿动力学系统式展开得:

$$\dot{S} = \dot{E} + \text{diag}\left(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}\right) \cdot [\bar{H}_0 \cdot u + \bar{C}_0 + \bar{F} + d(t) - \dot{x}_d] \quad (7)$$

根据滑模控制理论, 由式设计非奇异终端滑模控制律:

$$\begin{aligned} u &= u_{eq} + u_s \\ u_{eq} &= \bar{H}_0^{-1} \left(-\bar{C}_0 + \dot{x}_d - B \cdot \frac{a}{b} \cdot \dot{E}^{2-\frac{b}{a}} \right) \\ u_s &= -\bar{H}_0^{-1} \Lambda \cdot \text{sgn}(S) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, u_s 为滑模趋近律, 用于克服外界扰动与参数不确定性; $\Lambda = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6], \lambda_i > \max |\bar{F} + d(t)|$; 为抑制符号函数引入的抖振问题, 可采用双曲正切函数 $\tanh(S)$ 替代上式的符号函数项.

定义 Lyapunov 函数

$$V_1 = \frac{1}{2} S^T S \quad (9)$$

将式和式代入式的微分得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= S^T \{ \dot{E} + \text{diag}\left(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}\right) \cdot [\bar{H}_0 \cdot u + \bar{C}_0 + \bar{F} + d(t) - \dot{x}_d] \} = \mathbf{tr} \{ [\bar{F} + d(t) - \Lambda \text{sgn}(S)] S^T \text{diag}\left(\frac{B^{-1} b \cdot \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}}{a}\right) \} \leq \\ & - \sum_{i=1}^6 \left[\frac{b}{a} \beta_i^{-1} \dot{E}_i^{\frac{2(i_b-i_a)}{a}} (\lambda_i - \max |\bar{F} + d(t)|) |s_i| \right] \end{aligned} \quad (10)$$

显然, 对 $\forall s_i \neq 0$ 有 $\dot{V}_1 < 0$, 控制系统满足滑模存在条件, 系统在有限时间内使 $S(0) \neq 0$ 到达 $S(t_s) = 0$. 当 $S = 0$ 时, 系统跟踪误差沿设计滑模面 $E + B^{-1} \cdot \dot{E}^{b/a} = 0$ 收敛到零^[11]. 跟踪误差收敛时间表示为 $t_{\bar{n}}, i = 1, 2, \dots, n$,

$$\begin{aligned} t_{\bar{n}} &= t_{si} + t_{ei} \\ t_{si} &\leq |s_i(0)| / \lambda_i \\ t_{ei} &= b \cdot E_i(t_{si})^{\frac{b-a}{a}} / (b-a) \beta_i^{a/b} \end{aligned}$$

2.2 自适应 RBF 网络终端滑模控制设计

若 \bar{H}_0, \bar{C}_0 精确已知且 $\bar{F}, d(t)$ 为已知有界函数, 则前一节设计的控制器可以获得理想的控制效果.

但实际中, 漂浮基空间机器人的强非线性很难用模型表达, 并且系统参数不确定性和外界扰动也难以精确估计. 此时, 控制系统需要很大的切换增益保证系统鲁棒性, 并由此带来严重的抖振问题. 不仅严重降低滑模控制效果, 甚至使系统发散. 因此本节在理想滑模控制基础上设计自适应 RBF 神经网络在线补偿系统模型中不确定项引起的误差, 并通过自适应增益抑制系统抖振, 控制系统结构如图 2 所示.

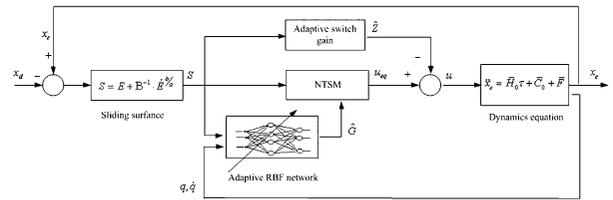


图2 自适应 RBF 网络终端滑模控制系统

Fig. 2 Diagram of the adaptive RBF network based terminal sliding mode control system

将系统(5)中的非线性与不确定项表示为:

$$\begin{aligned} \rho(t) &= \bar{C}_0(q_m, \dot{q}_m, q_b, \dot{q}_b) + \\ & \bar{F}_0(q_m, \dot{q}_m, q_b, \dot{q}_b, \tau) + d(t) \end{aligned} \quad (11)$$

显然, $\rho(t)$ 是未知的非线性函数, 此处利用自适应 RBF 网络在线估计函数 $\rho(t)$. RBF 网络由输入层、隐含层、输出层构成, 网络的输出表示为:

$$\hat{\rho} = \hat{W}^T \Phi(x) \quad (12)$$

其中, $\hat{\rho}$ 为函数估计值; $\hat{W} = [\hat{w}_1, \dots, \hat{w}_m]^T$ 为网络权值矩阵; $\Phi = [\phi_1, \dots, \phi_m]^T$ 为高斯基函数, $\phi_j = \exp(-\|x - c_j\| / 2\sigma_j^2)$, c_j 和 σ_j 为高斯基函数的参数.

假设: 对任意给定的正数 ξ_N , 存在理想网络权值 W^* 使 RBF 网络逼近误差 ξ 满足 $\|\xi\| \leq \xi_N$.

RBF 网络对非线性函数的理想逼近表示为:

$$\rho = W^{*T} \Phi(x) + \xi \quad (13)$$

定理: 对漂浮基空间机器人系统式(5), 若采用非线性滑动流形式(6), 设计系统控制律和自适应律如下式所示, 则控制系统跟踪误差在有限时间内收敛到零.

$$u = \bar{H}_0^{-1} \left[-\hat{\rho} + \dot{x}_d - B \cdot \frac{a}{b} \cdot \dot{E} \rho^{2-\frac{b}{a}} - \hat{\Lambda} \text{sgn}(S) \right] \quad (14)$$

其中, $\hat{\Lambda}$ 为理想增益 Λ^* 的估计值.

参数自适应律为:

$$\begin{aligned}\dot{\bar{W}} &= \gamma_w \Phi(x) S^T \text{diag}(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}) \\ \dot{\bar{\Lambda}} &= \gamma_\lambda \text{diag}(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}) |S| \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $\gamma_w = \text{diag}[\gamma_{w1}, \dots, \gamma_{w6}]$, $\gamma_{wi} > 0$;

$\gamma_\lambda = \text{diag}[\gamma_{\lambda1}, \dots, \gamma_{\lambda6}]$, $\gamma_{\lambda i} > 0$.

证明: 将式(14)代入式(7)得到:

$$\begin{aligned}\dot{S} &= \text{diag}(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}) [\rho - \hat{\rho} - \hat{\Lambda} \text{sgn}(S)] = \\ &\text{diag}(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}) [\bar{W}^T \Phi(x) + \\ &\xi - \hat{\Lambda} \text{sgn}(S)] \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $\bar{W} = W^* - \hat{W}$ 为网络参数计算误差.

定义 Lyapunov 函数:

$$V_2 = \frac{1}{2} S^T S + \frac{1}{2} \text{tr}[\bar{W}^T \gamma_w^{-1} \bar{W}] + \frac{1}{2} \bar{\Lambda}^T \gamma_\lambda^{-1} \bar{\Lambda} \quad (17)$$

其中, $\bar{\Lambda} = \Lambda^* - \hat{\Lambda}$ 为切换增益计算误差.

对式(17)微分, 将式(16)代入得:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= S^T \text{diag}(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}) \bar{W}^T \Phi(x) + \\ &\text{tr}[\bar{W}^T \gamma_w^{-1} \dot{\bar{W}}] + S^T \text{diag}(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}) \bar{\Lambda} \text{sgn}(S) + \\ &\bar{\Lambda}^T \gamma_\lambda^{-1} \dot{\bar{\Lambda}} + S^T \text{diag}(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}) [\xi - \Lambda^* \text{sgn}(S)] = \\ &\text{tr}\{\bar{W}^T [\Phi(x) S^T \text{diag}(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}) - \\ &\gamma_w^{-1} \dot{\bar{W}}]\} + \bar{\Lambda}^T \text{diag}(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}) |S| - \\ &\bar{\Lambda}^T \gamma_\lambda^{-1} \dot{\bar{\Lambda}} + S^T \text{diag}(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}) [\xi - \Lambda^* \text{sgn}(S)] = \\ &\text{tr}\{\bar{W}^T \gamma_w^{-1} [\gamma_w \Phi(x) S^T \text{diag}(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}) - \\ &\dot{\bar{W}}]\} + \bar{\Lambda}^T \gamma_\lambda^{-1} [\gamma_\lambda \text{diag}(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}) |S| - \dot{\bar{\Lambda}}] + \\ &\text{tr}[(\xi - \Lambda^* \text{sgn}(S)) S^T \text{diag}(B^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{b}{a}-1})] \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $\dot{\bar{W}} = -\dot{W}$, $\dot{\bar{\Lambda}} = -\dot{\Lambda}$.

将式(15)代入式(18)得到

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= \text{tr}[(\xi - \Lambda^* \text{sgn}(S)) S^T \text{diag}(\frac{B^{-1} b \cdot \dot{E}^{\frac{b}{a}-1}}{a})] \leq \\ &- \sum_{i=1}^6 \beta_i^{-1} \frac{b}{a} \dot{E}^{\frac{2(i_b-i_a)}{a}} |S_i| (\lambda_i^* - \xi_N) \end{aligned} \quad (19)$$

由理想增益 $\lambda_i^* \geq \xi_N$ 可知 $\dot{V}_2 \leq 0$, 因此控制系

统满足滑模存在条件, S 将在有限时间内到达 $S(t) = 0$, 同理, 系统跟踪误差 E, \dot{E} 将在有限时间内沿设计流形式(6)收敛到零.

3 仿真结果

空间机器人执行操作任务需要使机械臂在工作空间沿规划轨迹运动, 本节将所提出的自适应 RBF 网络终端滑模控制方法应用于控制 6 关节漂浮基空间机器人跟踪工作空间中 6 自由度轨迹. 空间机器人系统标称参数如表 1 所示, 通过 Matlab/Simulink 建立漂浮基空间机器人系统模型. 设系统在关节空间的初始状态为:

$$\begin{cases} q_b = [0 \quad 0 \quad 0]^T \\ q_m = [0 \quad 0 \quad 45^\circ \quad 0 \quad 30^\circ \quad 0] \end{cases}$$

假设系统中存在参数不确定性和外界扰动, 表示为有界函数:

$$\bar{F} + d = 3 \sin q_m t + 2 \cos q_m t$$

机械臂末端在工作空间的期望轨迹为:

$$\begin{cases} x = 2.5 + 0.5 \cos(\pi t/5) \\ y = 0.5 + 0.25 \sin(\pi t/5) \\ z = 0.1t \end{cases}$$

机械臂末端在终端时刻的期望姿态为:

$$\psi = 30^\circ, \quad \vartheta = -18^\circ, \quad \theta = 90^\circ$$

表 1 空间机器人系统的标称参数

Table 1 The system parameters of the space robots

Linki	r_i/m	l_i/m	m_i/kg	$I_i/(kg \cdot m^2)$		
				I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}
0	1.15	1.15	5799.287	3496.942	4491.917	4124.834
1	0.25	0.25	34.343	0.194	11.422	11.422
2	0.5	0.5	68.685	0.387	22.844	22.844
3	0.3	0.3	41.216	0.228	13.704	13.704
4	0.2	0.2	27.472	0.152	9.136	9.136
5	0.2	0.2	27.472	0.152	9.136	9.136
6	0.2	0.2	27.472	0.152	9.136	9.136

RBF 网络结构为 12-13-6, 初始权值 $w_{ij} = 0$, 高斯基函数中心 c_j 为 -6~6 之间均匀分布, 高斯基函数参数 $\sigma_j = 5$. 采用控制律式和自适应律式, 其中参数设置如下, 仿真结果如图 3-图 8 所示.

$$\begin{cases} a = 5, \quad b = 7, \quad \beta_i = 1 \\ \gamma_{wi} = 50, \quad \gamma_{\lambda i} = 300 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, 6$$

机械臂末端在工作空间的期望轨迹与实际运动轨迹如图 3 所示, 图 4 和图 5 为运动过程中机械臂末端位置坐标和姿态坐标轨迹, 可见机械臂末端的姿态和位置均精确地跟踪期望轨迹, 且运动平滑

连续. 由机械臂末端位置跟踪误差曲线(图 6)和姿态跟踪误差曲线(图 7)也可看出, 本文提出的方法收敛速度快、精度高、稳定性好. 图 8 为完成机械臂运动所需的控制力矩曲线, 可见机械臂 6 个关节的力矩输出比较平滑, 抖振现象得到明显抑制.

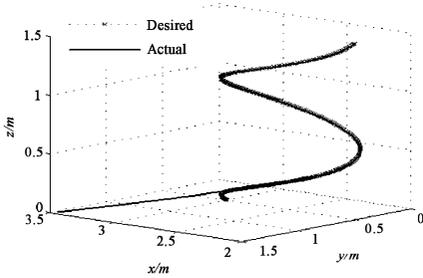


图 3 机械臂末端在工作空间的运动轨迹

Fig. 3 3D trajectory of the end position in task space

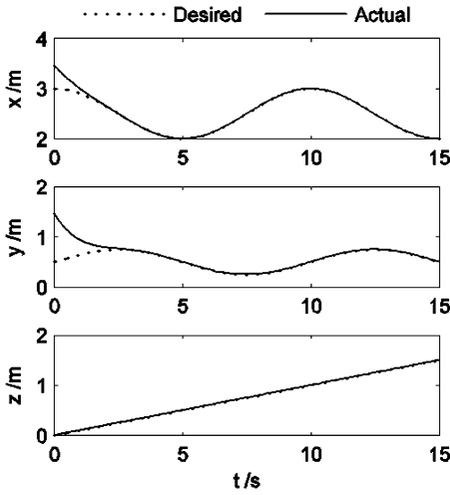


图 4 机械臂末端位置轨迹

Fig. 4 Trajectories of the position coordinates

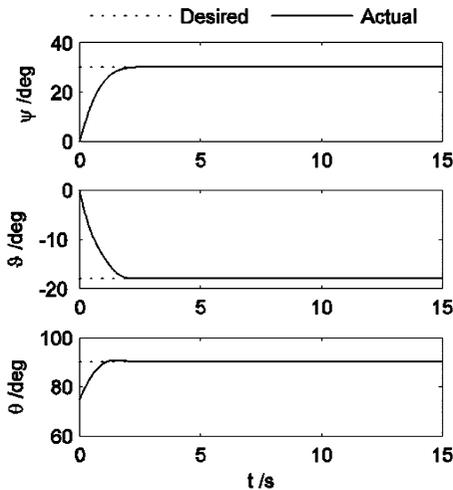


图 5 机械臂末端姿态轨迹

Fig. 5 Trajectories of the attitude coordinates

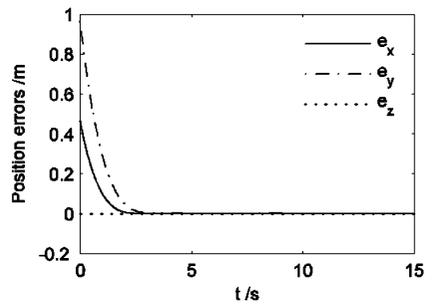


图 6 机械臂末端位置跟踪误差

Fig. 6 Position errors of the manipulator end

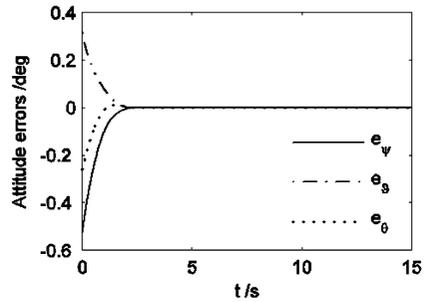


图 7 机械臂末端姿态跟踪误差

Fig. 7 Attitude errors of the manipulator end

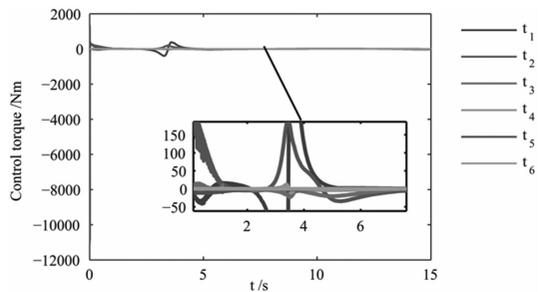


图 8 控制系统输出力矩

Fig. 8 The output torque of the control system

4 结论

本文研究漂浮基空间机器人在工作空间 6 自由度轨迹跟踪问题. 由于漂浮基空间机器人的强非线性、多自由度与动力学耦合特性, 精确地建立系统动力学模型尤其是非线性部分异常困难. 因此, 本文基于非线性滑动流形提出了自适应 RBF 网络终端滑模控制方法, 结合了非奇异终端滑模收敛快、精度高的特点与 RBF 网络非线性逼近特性, 使空间机器人系统非线性项未知且参数不确定性和外界扰动上界无法估计的情况下, 能够实现机械臂在工作空间快速、精确的轨迹跟踪控制. 根据 Lyapunov 方法设计的参数自适应律, 保证了控制系统鲁棒性, 且有效抑制了传统滑模控制中的抖振现

象. 文中设计了6关节漂浮基空间机器人跟踪工作空间连续轨迹任务来验证控制算法的有效性. 仿真结果表明, 所提出的自适应RBF网络终端滑模控制方法能够快速、准确的使机械臂跟踪6自由度期望轨迹. 在外界时变扰动及未建模动态作用下, 机械臂末端的位置和姿态没有稳态误差, 并且明显抑制了控制系统的抖振现象. 因此, 本文提出的自适应RBF网络终端滑模控制方法能够满足漂浮基空间机器人在轨操作控制需求, 对空间机器人在有限时间内快速目标捕获与精细操作任务具有广阔的应用前景.

参 考 文 献

- 1 丛佩超, 孙兆伟. 单臂式空间机械臂捕捉空间目标问题研究. 动力学与控制学报, 2009, 7(1): 45~49 (Cong P C, Sun Z W. The research of impact issues during single-arm space manipulator capturing object. *Journal of Dynamics and Control*, 2009, 7(1): 45~49 (in Chinese))
- 2 Nanos K, Papadopoulos E. On the use of free-floating space robots in the presence of angular momentum. *Intel Serv Robotics*, 2011, 4(1): 3~15
- 3 郭益深, 陈力. 漂浮基柔性空间机械臂姿态与关节协调运动的 terminal 滑模控制. 动力学与控制学报, 2009, 7(2): 158~163 (Guo Y S, Chen L. Terminal sliding mode control of coordinated motion of free-floating flexible space manipulator. *Journal of Dynamics and Control*, 2009, 7(2): 158~163 (in Chinese))
- 4 陈力, 刘延柱. 参数不确定空间机械臂系统的增广自适应控制. 航空学报, 2000, 21(02): 150~154 (Chen L, Liu Y Z. Adaptive control of space-based manipulator with uncertain parameters. *Acta Aeronautica and Astronautica Sinica*, 2000, (02): 150~154 (in Chinese))
- 5 Xu W, Liang B, Xu Y. Survey of modeling, planning, and ground verification of space robotic systems. *Acta Astronautica*, 2011, 68(11): 1629~1649
- 6 Moosavian S A A, Papadopoulos E. Free-flying robots in space: An overview of dynamics modeling, planning and control. *Robotica*, 2007, 25(5): 537~547
- 7 Khaloozadeh H, Homaeinejad M R. Real-time regulated sliding mode controller design of multiple manipulator space free-flying robot. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(6): 1337~1351
- 8 Arisoy A, Bayrakceken M K, Basturk S. High order sliding mode control of a space robot manipulator. Istanbul: International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 2011:833~838
- 9 Bayramoglu H, Komurcugil H. Nonsingular decoupled terminal sliding-mode control for a class of fourth-order nonlinear systems. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2013, 18(9): 2527~2539
- 10 丁世宏, 李世华. 有限时间控制问题综述. 控制与决策, 2011, 26(2): 1~10 (Ding S H, Li S H. A survey for finite-time control problems. *Control and Decision*, 2011, 26(2): 1~10 (in Chinese))
- 11 Feng Y, Yu X, Man Z. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators. *Automatica*, 2002, 38(12): 2159~2167
- 12 Feng Y, Yub X, Han F. On nonsingular terminal sliding-mode control of nonlinear systems. *Automatica*, 2013, 49(6): 1715~1722
- 13 Zhao D, Zou T. A finite-time approach to formation control of multiple mobile robots with terminal sliding mode. *International Journal of Systems Science*, 2012, 43(11): 1998~2014
- 14 Islam S, Liu P X. Output feedback sliding mode control for robot manipulators. *Robotica*, 2010, 28(7): 975~987
- 15 Jin M, Lee i, Chang P H, et al. Practical nonsingular terminal sliding-mode control of robot manipulators for high-accuracy tracking control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(9): 3593~3601
- 16 Wang J, Sun Z. 6-dof robust adaptive terminal sliding mode control for spacecraft formation flying. *Acta Astronautica*, 2012, 73: 76~87
- 17 Nekoukar V, Erfanian A. Adaptive fuzzy terminal sliding mode control for a class of mimo uncertain nonlinear systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 2011, 179(1): 34~49
- 18 毛玉青, 黄云龙, 王真富. 高阶耦合机器人的自适应模糊滑模分散控制. 动力学与控制学报, 2011, 9(4): 337~341 (Mao Y Q, Huang Y L, Wang Z F. Adaptive fuzzy sliding mode decentralized control of high-order coupling robot systems. *Journal of Dynamics and Control*, 2011, 9(4): 337~341 (in Chinese))
- 19 Papadopoulos E, Dubowsky S. Dynamic singularity in free-floating space robots. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1993, 115(1): 44~52
- 20 Yoshida K. Engineering test satellite vii flight experiments for space robot dynamics and control; Theories on laboratory test beds ten years ago, now in orbit. *The International*

Journal of Robotics Research, 2003, 22(5): 321 ~ 335

the singularities of a wrist-partitioned space manipulator.

21 Xu W, Liang B, Xu Y. Practical approaches to handle

Acta Astronautica, 2011, 68(1): 269 ~ 300

ADAPTIVE RBF BASED TERMINAL SLIDING MODE CONTROL OF FREE-FLOATING SPACE ROBOTS*

Guo Shengpeng Li Dongxu Meng Yunhe[†] Fan Caizhi

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Continuous trajectory tracking control in task space of free-floating space robots was investigated. An adaptive RBF based terminal sliding mode control method was proposed for a dynamics model with unknown nonlinear terms, parametric uncertainties and unbounded external disturbances. The proposed method combines the properties of a nonlinear sliding manifold with that of a radial basis function, where the adaptive RBF network is used to estimate the unknown parts of the system on line, such that rapid convergence of control errors in finite time are guaranteed without the exact dynamics mode of the system. The adaptive updating laws were designed according to Lyapunov approach, which make the closed-loop control system globally stable and eliminate chattering problems. A six-link free-floating space robot was employed to validate the proposed method. The simulation results show that the adaptive RBF based terminal sliding mode control method provides high precision performances without the exact dynamics model. Meanwhile, the chattering problems were eliminated effectively.

Key words free-floating space robots, adaptive RBF network, terminal sliding mode