

空间机械臂的鲁棒复合自适应控制¹⁾

王景 王昊瀛 刘良栋 梁斌

(北京控制工程研究所 北京 100080)

(E-mail: jorsonw@263.net)

摘要 对于本体姿态受控而位置不受控的空间机械臂系统,考虑存在参数不确定性及非参数不确定性,首先建立了系统的估计模型,并且提出了一种鲁棒复合自适应控制方法,其参数适应律由估计误差和跟踪误差共同决定.证明了这种方法不仅可维持系统的全局渐近稳定,而且还可快速收敛和减小跟踪误差.

关键词 空间机械臂,鲁棒复合自适应控制

中图分类号 TT242

ROBUST COMPOSITE ADAPTIVE CONTROL FOR SPACE MANIPULATORS

WANG Jing WANG Hao-Ying LIU Liang-Dong LIANG Bin

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080)

(E-mail: jorsonw@263.net)

Abstract For space manipulators with an attitude-controlled base and with parametric and nonparametric uncertainties, this paper develops a prediction model for the system, and presents a robust composite adaptive control algorithm in which the parameters are driven by both tracking errors and prediction errors. Results on globally asymptotic stability and quick tracking convergence are established and confirmed by simulation.

Key words Space manipulator, robust composite adaptive control

1 引言

在空间环境中,用空间机械臂代替宇航员完成诸如捕获、对接、修理等舱外作业及一些危险任务是必不可少的^[1~3].空间机械臂系统通常存在参数不确定性(例如负载具有不确知的动力学特性、机械臂参数具有不确定性和不精确性等)及非参数不确定性(例如扰动、未建模动态等).在线估计这些参数和信号可以提高操纵品质,因此研究空间机械臂系统的自适

1) 国家“八六三”计划航天领域资助

应控制问题非常必要.

由于机械臂的动力学具有很强的非线性和多个输入,一段时间内机械臂的自适应控制被认为是常规自适应控制理论所无法问津的^[4].对于地面固定基座的机械臂而言,最初的自适应控制是针对线性时不变系统提出的自适应控制方法^[5].Slotine 等人^[4,6]利用机械臂的两个物理事实,即惯量矩阵的正定性以及机械臂动力学参数线性化的可能性,成功地获得了具有全局稳定性和跟踪收敛性的自适应控制器.但是,这种方法不能直接应用于空间机械臂^[7].

对于本体姿态受控而位置不受控的空间机械臂系统,Xu 等人^[8,9]在关节空间内给出了一种直接自适应控制方法(DAC),该方法可以保证系统全局渐近稳定,其自适应律仅从跟踪误差中获取参数的有关信息.而同时应用估计误差和跟踪误差激励参数自适应,却正是复合自适应控制的设计思想.Slotine 等人^[10]对地面固定基座机械臂的复合自适应控制问题进行了研究;文献[11]对空间机械臂系统的复合自适应控制问题进行了研究.但是,上述自适应方法仅针对系统的参数不确定性,对于存在扰动及未建模动态等非参数不确定性的空间机械臂系统,其鲁棒自适应控制问题仍未得到解决.

考虑存在参数不确定性及非参数不确定性,本文对本体姿态受控而位置不受控的空间机械臂系统的鲁棒复合自适应控制问题进行了研究.文中第二部分分析了系统的动力学结构及其特性.第三部分建立了系统的估计模型,并且基于估计误差和跟踪误差,提出了一种鲁棒复合自适应控制方法(RCAC),证明了这种方法不仅可维持系统的全局渐近稳定,而且还可快速收敛和减小跟踪误差.在第四部分对 RCAC 方法进行了仿真研究,仿真结果验证了上述特点.第五部分对全文做了总结.

2 动力学结构及特性

考虑存在参数不确定性及非参数不确定性,本体姿态受控而位置不受控的空间机械臂系统的动力学方程可写为

$$M(\theta)\ddot{\theta} + B(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}, t) = \tau \quad (1)$$

其中 $B(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = M\dot{\theta} - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{2} \dot{\theta}^T M \dot{\theta} \right)$, $\theta = [q_B^T, q^T]^T$, $\dot{\theta} = [\omega_B^T, \dot{q}^T]^T$, $q_B = [q_{B_1}, q_{B_2}, q_{B_3}]^T$, $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$, M 表示系统对称正定的惯量矩阵, $M \in R^{(n+3) \times (n+3)}$, 矢量 q_B 表示本体的姿态, ω_B 表示本体的姿态角速度, q 表示机械臂关节位移矢量, $N(\theta, \dot{\theta}, t)$ 表示扰动及未建模动态, τ 为施加在本体和机械臂关节上的力矩.

动力学方程(1)具有如下的特性:

- 1) M 对称正定;
- 2) $B(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ 唯一, $B(\theta, \dot{\theta})$ 不唯一,适当地选取 $B(\theta, \dot{\theta})$, 可使 $M - 2B$ 为斜对称矩阵;
- 3) 在关节空间内,动力学方程左边前两项可化为一组组合动力学参数的线性函数.

对于期望轨迹及 $N(\theta, \dot{\theta}, t)$ 做如下的假设:

- 1) 期望轨迹 $\theta_d, \dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d$ 是一致有界的,且满足 $|\theta_{di}| \leq d_{1i}$, $|\dot{\theta}_{di}| \leq d_{2i}$, d_{1i} 和 d_{2i} 均为正的标量常数;
- 2) 扰动及未建模动态 $N(\theta, \dot{\theta}, t)$ 是有界的,且满足 $|N_i(\theta, \dot{\theta}, t)| \leq t_{1i} + t_{2i} |\theta_i| + t_{3i} |\dot{\theta}_i|$, 其中 t_{1i}, t_{2i}, t_{3i} 为正的标量常数.

3 鲁棒复合自适应控制(RCAC)

复合自适应的基本原理就是同时应用跟踪误差和估计误差激励参数自适应. 因此, 首先建立系统的估计模型.

3.1 估计模型

系统动力学方程(1)具有参数线性化的特性, 也就是说, 式(1)左边的前两项可化为一组适当选定的组合动力学参数的线性函数. 另外, 适当选取 $B(\theta, \dot{\theta})$, 可使 $M-2B$ 为斜对称矩阵. 根据这两个特性, 系统动力学方程可简写如下:

$$\tau = Y_1(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})a + N(\theta, \dot{\theta}, t) \quad (2)$$

式中 Y_1 是 $\theta, \dot{\theta}$ 和 $\ddot{\theta}$ 的非线性函数, $Y_1 \in R^{(n+3) \times m}$, a 为一组等价参数, $a \in R^{m \times 1}$.

由于式(2)中含有难以量测的加速度项 $\ddot{\theta}$, 因此不能直接用于参数估计. 为了在这个关系中避免引入加速度, 可以引用滤波方法^[4]. 确切地说, 设 $\omega(t)$ 是一个指数稳定的合适的滤波器的脉冲响应(例如, 对于一阶滤波器 $\frac{\lambda}{p+\lambda}$, 其脉冲响应是 $e^{-\lambda t}$), 用 $\omega(t)$ 对式(2)两边求卷积得

$$\int_0^t \omega(t-r)\tau(r)dr = \int_0^t \omega(t-r)Y_1(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})adr + \int_0^t \omega(t-r)N(\theta, \dot{\theta}, r)dr \quad (3)$$

应用部分积分法, 上式可改写为

$$y(t) = W_1(\theta, \dot{\theta})a + W_2(\theta, \dot{\theta}, t) \quad (4)$$

其中 $y(t)$ 是滤波后的力矩, W_1 是 Y_1 滤波后的对应矩阵, W_2 是 N 滤波后的对应矩阵. 由于 $N(\theta, \dot{\theta}, t)$ 是有界的, 故其滤波输出 W_2 也是有界的, 假定 $|W_{2i}| \leq \lambda_i$.

根据上式, 可得 $y(t)$ 基于估计参数 \hat{a} 的估计 $\hat{y}(t)$ 以及估计误差 e 如下:

$$\hat{y}(t) = W_1(\theta, \dot{\theta})\hat{a}(t) \quad (5)$$

$$e = \hat{y} - y = W_1\hat{a} - W_2 \quad (6)$$

式中 $\hat{a} = \hat{a} - a$.

3.2 鲁棒复合自适应控制器

定义组合误差

$$s = \dot{e}_p + Ze_p \quad (7)$$

其中 $e_p = \theta_d - \theta$, $\dot{e}_p = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}$, θ_d 为期望的本体姿态角和机械臂关节角, Z 为正定常值对角矩阵.

定义调节速度 θ' 和调节加速度 θ'' 如下:

$$\theta' = \dot{\theta} + s \quad (8)$$

$$\theta'' = \frac{d}{dt}\theta' + s = \ddot{\theta}_d + s + Ze_p \quad (9)$$

定义 $\tilde{M} = \hat{M} - M$, $\tilde{B} = \hat{B} - B$, 则有

$$\tilde{M}\theta'' + \tilde{B}\theta' = Y(\theta, \dot{\theta}, \theta_d, \dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d)\tilde{a} \quad (10)$$

其中 \hat{M} 和 \hat{B} 分别为矩阵 M 和 B 的估计矩阵.

由式(7)可得 $\dot{\theta}_i = \dot{\theta}_{di} - s_i + \zeta_i(\theta_{di} - \theta_i)$, 故

$$|\dot{\theta}_i| \leq |\dot{\theta}_{di}| + |s_i| + \zeta_i|\theta_{di}| + \zeta_i|\theta_i| \leq \zeta_i d_{1i} + d_{2i} + \zeta_i|\theta_i| + |s_i| \quad (11)$$

又依假设条件 2), 可得

$$|N_i(\theta, \dot{\theta}, t)| \leq t_{1i} + t_{2i}|\theta_i| + t_{3i}|\dot{\theta}_i| \leq r_{1i} + r_{2i}|\theta_i| + r_{3i}|s_i| \leq \beta_i \omega_i \quad (12)$$

式中 $r_{1i} = t_{1i} + t_{3i}\zeta_i d_{1i} + t_{3i}d_{2i}$, $r_{2i} = t_{2i} + t_{3i}\zeta_i$, $r_{3i} = t_{3i}$, $\beta_i = \max(r_{1i}, r_{2i}, r_{3i})$, $\omega_i = 1 + |\theta_i| + |s_i|$.

复合自适应控制器的控制律和参数自适应律由下式

$$\tau = \hat{M}\theta'' + \hat{B}\theta' + K_r(t)s \quad (13)$$

$$\dot{\hat{a}} = P(Y^T s - W_1^T e) \quad (14)$$

$$K_{ri}(t) = \frac{(\hat{\beta}_i \omega_i)^2}{|s_i| \hat{\beta}_i \omega_i + \epsilon_i^2 - \lambda_i |e_i|} \quad (15)$$

$$\dot{\hat{\beta}}_i = \phi_i^{-1} \omega_i |s_i| \quad (16)$$

$$\dot{\epsilon}_i = -\xi_i^{-1} \epsilon_i, \quad \epsilon_i(0) > 0 \quad (17)$$

给出, 式中 P 为正定常数增益矩阵, 其中 $\Phi = \text{diag}[\phi_1, \dots, \phi_{n+3}]$, $\Xi = \text{diag}[\xi_1, \dots, \xi_{n+3}]$ 都是正定常值矩阵.

首先, 为建立本文的理论, 需要如下的引理^[4].

引理 1. 如果可导函数 f 是有下界的和渐小的 ($\dot{f} \leq 0$), 则它收敛于一个极限值.

引理 2 (Barbalat 引理). 如果当 $t \rightarrow \infty$ 时可导函数 $f(t)$ 有一个有限的极限值, 而且 \dot{f} 是一致连续的, 则当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\dot{f} \rightarrow 0$. 事实上, 对于一个可导函数, 它是一致连续的充分条件是, 它的导数有界.

对于上述鲁棒复合自适应控制器, 我们有如下的定理.

定理 1. 对于存在参数不确定性及非参数不确定性的空间机械臂系统(1), 鲁棒复合自适应控制器式(13)~(17)可以保证自适应控制系统全局一致渐近稳定(GUAS).

证明. 系统的闭环动力学方程为

$$Ms = -Y\tilde{a} - (M + B + k_r(t))s + N(\theta, \dot{\theta}, t) \quad (18)$$

构造 Lyapunov 函数

$$V(t) = \frac{1}{2} [s^T Ms + \tilde{a}^T P^{-1} \tilde{a} + \tilde{\beta}^T \Phi \tilde{\beta} + \epsilon^T \Xi \epsilon] \quad (19)$$

$V(t)$ 沿系统闭环轨迹的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \frac{1}{2} s^T \dot{M}s + s^T Ms + \tilde{a}^T P^{-1} \dot{\tilde{a}} + \tilde{\beta}^T \Phi \dot{\tilde{\beta}} + \epsilon^T \Xi \dot{\epsilon} = \\ &= -s^T Ms - s^T K_r(t)s + s^T N(\theta, \dot{\theta}, t) - (e + W_2)^T e + \tilde{\beta}^T \Phi \dot{\tilde{\beta}} + \epsilon^T \Xi \dot{\epsilon} \leq \\ &= -s^T Ms - \sum_{i=1}^{n+3} \{s_i^2 K_{ri}(t) - |s_i| \beta_i \omega_i - |s_i| |\tilde{\beta}_i \omega_i + \epsilon_i^2 - \lambda_i |e_i|\} = \\ &= -s^T Ms - \sum_{i=1}^{n+3} \{s_i^2 K_{ri}(t) - |s_i| \hat{\beta}_i \omega_i + \epsilon_i^2 - \lambda_i |e_i|\} \end{aligned} \quad (20)$$

由上式可知, 只要满足

$$s_i^2 K_{ri}(t) > |s_i| \hat{\beta}_i \omega_i - \epsilon_i^2 + \lambda_i |e_i| \quad (21)$$

便可使

$$\dot{V}(t) < -s^T Ms \leq -\mu_M \|s\|^2 < 0 \quad (22)$$

式中 $\mu_M = \inf_{\theta} \lambda_{\min}(M(\theta))$, $\lambda_{\min}(\cdot)$ 表示取矩阵的最小特征值. 由式(22)知, $V(t) < V(0)$, 因此

若 $s(0), \tilde{a}(0), \tilde{\beta}(0), \epsilon(0)$ 有界, 则由式(19)得 $s, \tilde{a}, \tilde{\beta}, \epsilon$ 也是有界的.

由式(15)知, 当

$$|s_i| |\beta_i \omega_i + \epsilon_i^2 - \lambda_i| |e_i| > 0 \quad (23)$$

时,式(15)满足条件(21),而条件(23)在实际控制中可通过适当选取 ϵ_i 及 ξ_i^{-1} 得到保证(选取较大的 $\epsilon_i(0)$ 及较小的 ξ_i^{-1}).

令 $\dot{f}(t) = -s^T Ms \leq 0$, 由式(22)知 $\int_0^t \dot{f}(t) dt \geq V(t) - V(0)$, 因 $V(t), V(0)$ 有界, 故 $f(t)$ 是有下界的和渐小的, 由引理 1 可知 $f(t)$ 收敛于一个极限值.

$s, \theta_d, \dot{\theta}_d$ 有界意味着 $\theta, \dot{\theta}$ 有界; $\theta, \dot{\theta}, \theta_d, \dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d$ 以及 s 有界意味着 τ 有界; 从而有 $\ddot{\theta}$ 有界, 故 \dot{s} 有界, 进而有 $\ddot{f}(t)$ 有界. 根据引理 2, 有 $\dot{f}(t) = -s^T Ms \rightarrow 0$, 从而 $s \rightarrow 0$, 进而有 $e_p \rightarrow 0, \dot{e}_p \rightarrow 0$.

综上所述, 可得整个系统是全局一致渐近稳定的(GUAS). 证毕.

4 仿真

本文采用文献[8]的仿真对象, 并考虑存在扰动及未建模动态. 它是一个平面二自由度空间机器人系统, 并且假定本体姿态已得到成功地控制, 故只需考虑机械臂的控制. 系统的动力学模型为

$$M(\theta)\ddot{\theta} + B(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}, t) = \tau \quad (24)$$

其中

$$M = \frac{l^2}{m_c} \begin{bmatrix} m_0 m_1 + m_1 m_2 + 2m_0 m_2(1+c_2) & m_1 m_2 + m_0 m_2(1+c_2) \\ m_1 m_2 + m_0 m_2(1+c_2) & m_1 m_2 + m_2 m_0 \end{bmatrix} = p_1 R_1 + p_2 R_2 + p_3 R_3$$

$$B = \frac{m_0 m_2}{m_c} \begin{bmatrix} -2l^2 s_2 \dot{q}_2 & -l^2 s_2 \dot{q}_2 \\ l^2 s_2 \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} = p_3 R_4 \quad (25)$$

上式中 m_0, m_1, m_2 分别表示机器人本体、连杆 1 和连杆 2 的质量; 系统的总质量 $m_c = m_0 + m_1 + m_2$; l 表示杆件长度; $s_2 = \sin(q_2)$; $c_2 = \cos(q_2)$; $p_1 = \frac{m_0 m_1}{m_c}$; $p_2 = \frac{m_1 m_2}{m_c}$; $p_3 = \frac{m_0 m_2}{m_c}$; $R_1 = \begin{bmatrix} l^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$; $R_2 = \begin{bmatrix} l^2 & l^2 \\ l^2 & l^2 \end{bmatrix}$; $R_3 = \begin{bmatrix} 2(1+c_2)l^2 & (1+c_2)l^2 \\ (1+c_2)l^2 & l^2 \end{bmatrix}$; $R_4 = \begin{bmatrix} -2l^2 s_2 \dot{q}_2 & -l^2 s_2 \dot{q}_2 \\ l^2 s_2 \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}$.

显然, 动力学方程(24)左边前两项可化为组合动力学参数 p_1, p_2, p_3 的线性函数, 即

$$M\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} = Y_1 a \quad (26)$$

式中

$$Y_1 = [R_1 \ddot{q} \quad R_2 \ddot{q} \quad R_3 \ddot{q} + R_4 \dot{q}] \quad (27)$$

$$a = [p_1 \quad p_2 \quad p_3]^T \quad (28)$$

期望的关节角为

$$q_{d1} = \frac{\pi}{180} (54 + 6(\sin(t) + \cos(4t))) \quad (29)$$

$$q_{d2} = \frac{\pi}{180} (-126 + 6(\sin(2t) + \cos(6t))) \quad (30)$$

系统动力学参数的真值为 $m_0 = 41\text{kg}$, $m_1 = 5\text{kg}$, $m_2 = 4\text{kg}$, 取动力学参数真值的 50% 作为其初始值. 假定扰动及未建模动态 $N(\theta, \dot{\theta}, t) = \begin{bmatrix} 2.8\dot{q}_1 \sin(3t) + 0.01 \\ 2.8\dot{q}_1 \cos(3t) + 0.01 \end{bmatrix}$. 采用文献[8]的直接自适应控制方法(DAC), 关节角跟踪误差以及关节控制力矩如图 1 所示. 采用文献[11]的复合自适应控制方法(CAC), 关节角跟踪误差以及关节控制力矩如图 2 所示. 采用本文

的鲁棒复合自适应控制方法(RCAC),关节角跟踪误差以及关节控制力矩如图 3 所示.从仿真图中明显可以看出,这种复合自适应控制方法不仅维持了控制系统的全局稳定,而且还导致了快速收敛和小的跟踪误差.其代价是在控制的前数秒内需要稍大的控制力矩(仅增加几个牛顿-米).

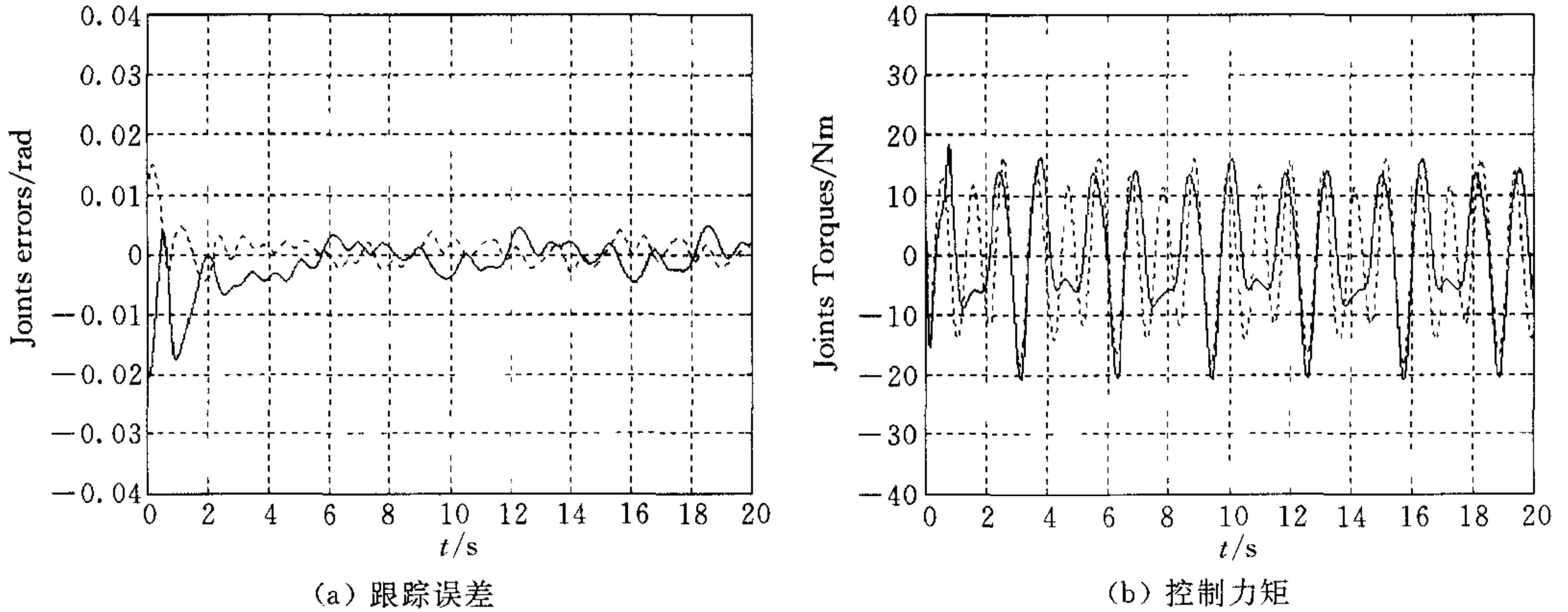


图 1 采用 DAC 的仿真曲线图(实线——关节1,虚线——关节2)

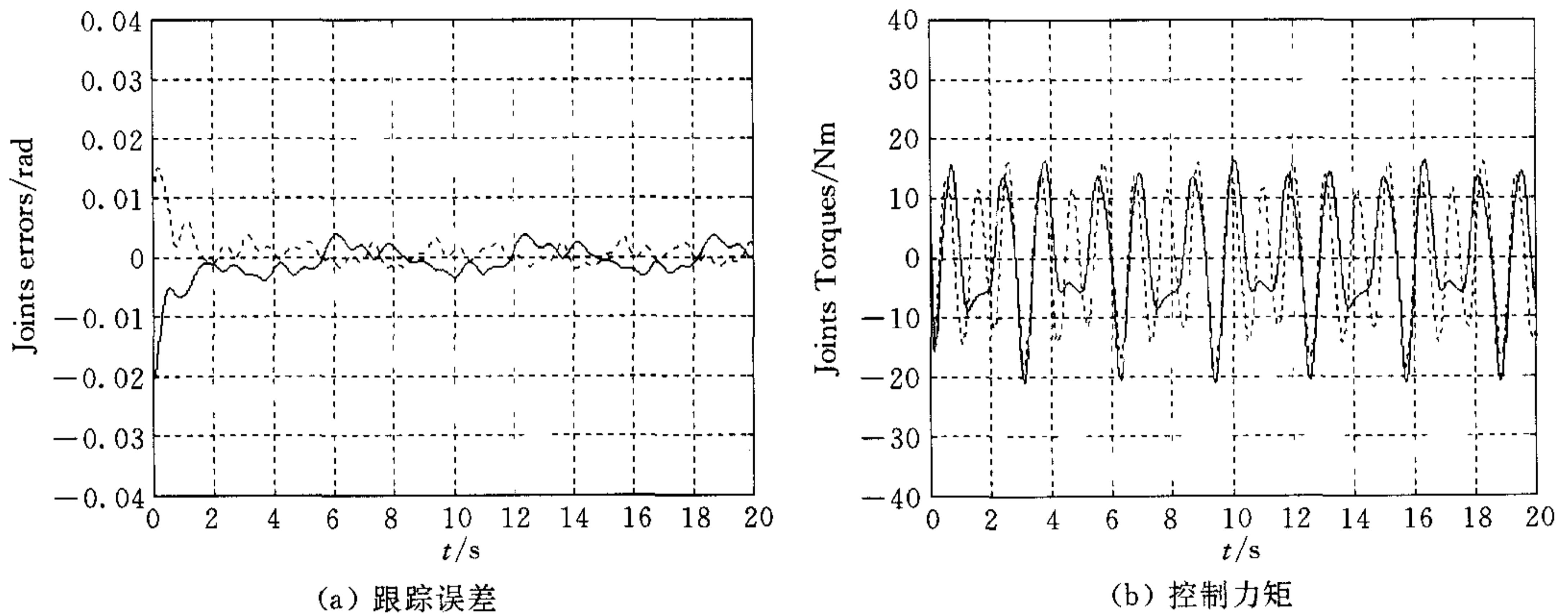


图 2 采用 CAC 的仿真曲线图(实线——关节1,虚线——关节2)

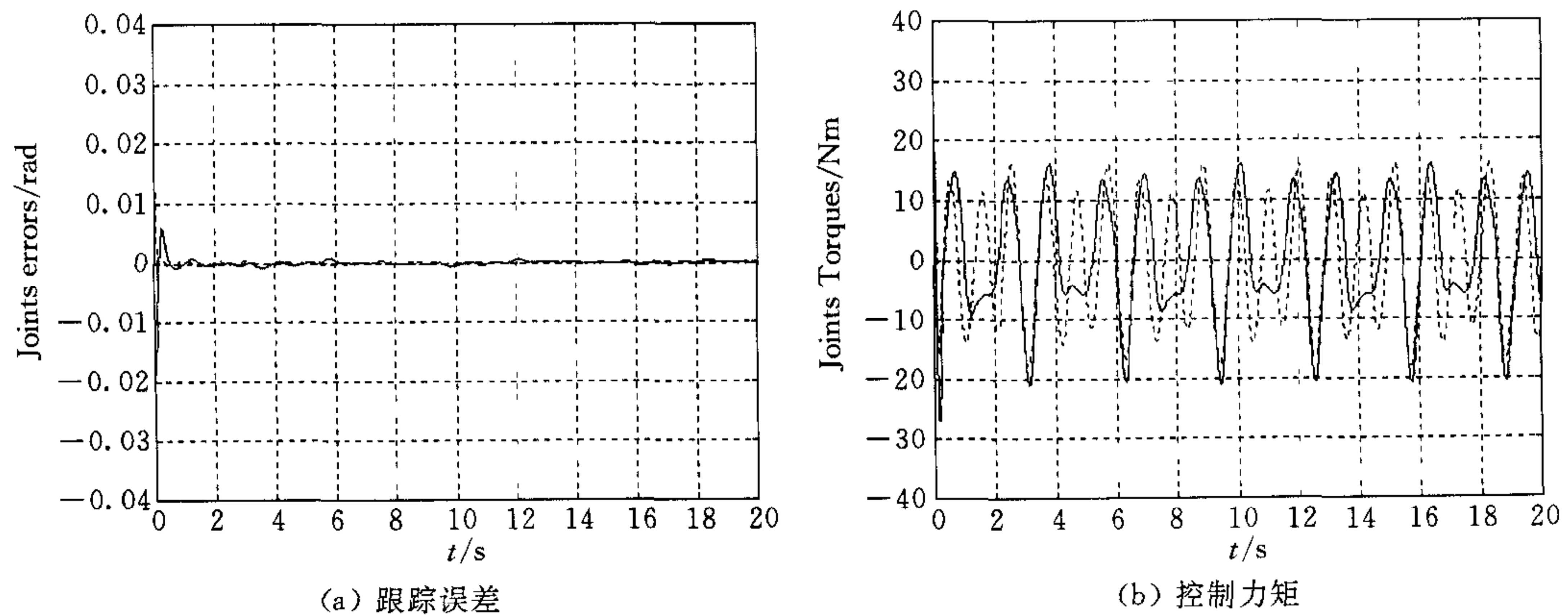


图 3 采用 RCAC 的仿真曲线图(实线——关节1,虚线——关节2)

5 结束语

针对本体姿态受控而位置不受控的空间机械臂系统,考虑存在参数不确定性及非参数不确定性,分析了系统的动力学特性,并在此基础上建立了系统的估计模型.基于估计误差和跟踪误差,提出了一种空间机械臂鲁棒复合自适应控制方法(RCAC),证明了这种方法不仅可维持系统的全局渐近稳定,而且还可快速收敛和减小跟踪误差.本文所提出的 RCAC 方法为空间机械臂的鲁棒自适应控制奠定了必要的理论技术基础.另外,考虑到机械臂与本体之间的运动耦合,文献[12]对任务空间内空间机械臂的鲁棒自适应控制进行了研究.希望这些研究对我国今后空间机器人系统的研制具有一定的参考价值.

参 考 文 献

- 1 Dubowsky S, Papadopoulos E. The kinematics, dynamics and control of free-flying and free-floating space robotic system. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, **9**(5):531~543
- 2 Xu Y, Kanade T. *Space Robotics: Dynamics and Control*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1992
- 3 Wang Jing, Liu Liangdong. The kinematic model of free-flying space robot. In: Proceedings of 14th International Federation of Automatic Control, Beijing, P. R. China, 1999, P:635~639
- 4 Slotine J J E, Li W. *Applied Nonlinear Control*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 1991
- 5 Dubowsky S, Desforges D T. The application of model-referenced adaptive control to robotic manipulators. *Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, 1979, **101**:193~200
- 6 Slotine J J E, Li W. On the adaptive control of robot manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 1987, **6**(3):49~59
- 7 Senda K, Nagaoka H Murotsu Y. Adaptive control of free-flying space robot with position/attitude control system. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1999, **22**(3):488~490
- 8 Xu Y, Shum H Y, Kanade T, Lee J J. Parameterization and adaptive control of space robot systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, **30**(2):435~451
- 9 Xu Y, Shum H Y. Dynamics control and coupling of a free-flying space robot system. *Journal of Robotic Systems*, 1994, **11**(7):573~589
- 10 Slotine J J E, Li W. Composite adaptive control of robot manipulators. *Automatica*, 1989, **25**(4):509~519
- 11 王 景,王昊瀛,刘良栋,梁 斌. 一类空间机械臂的复合自适应控制. *中国空间科学技术*, 2000, **20**(3):5~11
- 12 王 景. 空间机器人的轨迹跟踪自适应控制[学位论文]. 北京:北京控制工程研究所,2000

王 景 1997年获重庆大学控制理论及应用专业硕士学位,2000年在北京控制工程研究所获控制理论与控制工程专业博士学位.研究方向为航天控制、空间机器人技术、智能控制及小卫星控制技术.

王昊瀛 1997年获哈尔滨工程大学控制理论及应用专业硕士学位,2000年在北京控制工程研究所获控制理论与控制工程专业博士学位.研究方向为航天控制、空间机器人技术及智能控制.

刘良栋 1966年毕业于清华大学工程力学数学系.研究员,博士生导师,北京控制工程研究所科技委主任,国家“八六三”航天领域专家委员会委员,自动化学会常务理事.研究领域为航天器动力学与控制.