

空间机械臂本体与末端抓手协调运动的自适应控制方法*

陈 力¹ 刘延柱²

(1. 福州大学机械系·福州, 350002; 2. 上海交通大学工程力学系·上海, 200030)

摘要: 讨论了载体位置不受控制的漂浮基空间机械臂本体与末端抓手协调运动的自适应控制问题。对系统的运动学、动力学分析表明, 结合系统动量守恒关系得到的系统动力学方程及协调运动的增广广义 Jacobi 矩阵可以表示为适当选择的组合惯性参数的线性函数。以此为基础, 对于系统存在未知参数的情况, 设计了本体姿态与机械臂末端抓手惯性空间轨迹协调运动的自适应控制方案。上述控制方案的显著优点在于: 不需要测量、反馈飞行器本体的位置、移动速度及移动加速度。仿真运算, 证实了上述控制方案的有效性。

关键词: 漂浮基空间机械臂系统; 协调运动; 自适应控制

文献标识码: A

The Adaptive Control of Coordinated Motion of Spacecraft Attitude and Its Manipulator

CHEN Li¹ and LIU Yanzhu²

(1. Department of Machine Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, 350002, P. R. China;

2. Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200030, P. R. China)

Abstract: The adaptive control of coordinated motion of spacecraft attitude and manipulator of the space manipulator systems whose spacecraft position is not controlled is discussed. So the kinematics and dynamics of the system are analyzed, and it is demonstrated that the augmented generalized Jacobian matrix and the system dynamic equations can be linearly dependent on a group of inertial parameters. Based on the results, the adaptive control scheme of coordinated motion of spacecraft attitude and the desired trajectory in workspace of its manipulator is proposed, and a two-link planar space manipulator system is simulated to verify the proposed control scheme. The advantages of the adaptive control scheme proposed are that it need not to measure the position, velocity and acceleration of the spacecraft, and so do the angle acceleration of joints.

Key words: free-floating space manipulator systems; coordinated motion; adaptive control

空间机械臂被期望在未来空间活动中承担空间站的日常维修及大型空间站的在轨组装等重要工作, 考虑到空间环境下控制燃料极其宝贵, 使用载体位置、姿态均不受控制的自由浮动空间机械臂系统非常必要, 已有很多文献对此作了研究^[1-4]。然而, 有时出于无线电通讯联络等工作的需要, 在机械臂操作期间要求载体上的无线电天线指向地面的某一指定区域, 这就要求在机械臂末端完成惯性空间指定运动的同时对空间机械臂本体的姿态也要加以控制, 如保持本体的姿态不变或机械臂操作完成后本体的姿态角调整到某一期望值。因此有必要对载体位置不受控制的漂浮基空间机械臂系统本体与末端抓手协调运动的控制问题进行研究。

由于空间机械臂的载体自由浮动, 机械臂与载体之间存在着动力学耦合作用, 其特点表现为: 系统动力学方程及运动 Jacobi 关系对系统的惯性参数不符合一般的线性规律。上述情况增加了协调运动控制系统设计的难度。对于系统参数存在不确定性的情况, 问题显得尤为突出。Walker^[5]和马保离等^[6]讨论了载体位置无控、姿态受控条件下的自适应控制问题, 但其中没有包括载体姿态的控制规律。本文结合系统动量守恒关系对漂浮基两杆空间机械臂系统的运动学、动力学作了分析, 并证明了通过恰当定义的一系列增广变量, 可以将空间机械臂系统的增广广义 Jacobi 矩阵以及系统的动力学方程表示为一组适当选择的(组合)惯性参数的线性函数, 进而给出

* 基金项目: 国家自然科学基金(19872032), 福建省自然科学基金(E0110009)及福州大学科技发展基金资助项目

收稿日期: 1999-12-08; 收修稿日期: 2000-11-20.

了系统参数未知情况下空间机械臂本体姿态与末端抓手惯性空间轨迹协调运动的自适应控制方法. 计算机仿真运算, 证实了提出的方法的有效性.

1 系统运动学、动力学 (Kinematics and dynamics of the system)

以作平面运动的自由浮动两杆空间机械臂系统为例, 系统结构如图 1 所示. 并设 O_1 在 O_0x_0 轴上与 O_0 的距离为 l_0 , $B_i (i = 1, 2)$ 沿 x_i 轴的长度为 l_i ; 质心 O_{c1} 在 O_1x_1 轴上与 O_1 的距离为 a_1 , 质心 O_{c2} 在 O_2x_2 轴上与 O_2 的距离为 a_2 ; 各分体质量和中心惯量张量分别为 m_i 和 $J_i (i = 0, 1, 2)$, $M = \sum_{i=0}^2 m_i$ 为系统的总质量, C 为系统的总质心.

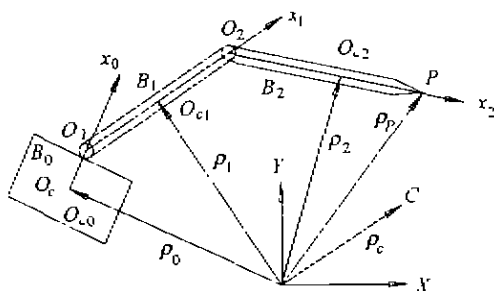


图 1 漂浮基两杆空间机械臂系统

Fig. 1 A two-link space manipulator system

建立平动的惯性坐标系 ($O-XY$), 并设 $e_i (i = 0, 1, 2)$ 为 x_i 轴的基矢量. 则由系统位置几何关系, 各分体质心 O_{ci} 相对 O 的矢径 ρ_i 及机械臂末端 P 点相对 O 的矢径 ρ_P , 可写为

$$\begin{cases} \rho_1 = \rho_0 + l_0 e_0 + a_1 e_1, \\ \rho_2 = \rho_0 + l_0 e_0 + l_1 e_1 + a_2 e_2, \\ \rho_P = \rho_0 + \sum_{i=0}^2 l_i e_i. \end{cases} \quad (1)$$

根据系统质心定义: $\sum_{i=0}^2 m_i \rho_i = M \rho_c$, 可以解出 ρ_0 为

$$\rho_0 = \rho_c - L_{00} e_0 - L_{01} e_1 - L_{02} e_2. \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} L_{00} &= (l_0/M)(m_1 + m_2), \\ L_{01} &= (1/M)(m_1 a_1 + m_2 l_1), \\ L_{02} &= (m_2 a_2/M). \end{aligned}$$

将(2)式代入(1)式, 得到

$$\begin{cases} \rho_1 = \rho_c + \sum_{i=0}^2 L_{1i} e_i, \\ \rho_2 = \rho_c + \sum_{i=0}^2 L_{2i} e_i, \\ \rho_P = \rho_c + \sum_{i=0}^2 L_{Pi} e_i. \end{cases} \quad (3)$$

其中 L_{1i}, L_{2i}, L_{Pi} 与(2)式中的 L_{0i} 相类似, 仅为系统惯性参数的组合函数.

忽略微弱的重力梯度, 系统为无外力作用的自由浮动无根多体系统, 遵守对 ($O-XY$) 的动量守恒关系. 不失一般性, 设系统初始动量为零, 则有 $\rho_c = 0$. 由(2)和(3)式, 显然 ρ_i, ρ_P 均可表示为一组(组合)惯性参数的线性函数.

由拉格朗日方程, 可得到如下形式的空间机械臂系统动力学方程

$$D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})\dot{q} = (\tau_0 \quad \tau)^T. \quad (4)$$

其中, $D(q)$ 为 3×3 质量矩阵, $h(q, \dot{q})\dot{q}$ 为包含哥氏力、离心力的 3 阶列向量, τ_0 为本体姿态控制系统的控制输入, $\tau = (\tau_1 \quad \tau_2)^T$ 为由机械臂关节铰 O_1, O_2 的控制力矩 τ_1, τ_2 组成的 2 阶列向量, $q = (\alpha, \theta_1, \theta_2)^T$ 为系统的广义坐标向量. 此外, $h(q, \dot{q})$ 的表示不唯一, 但恒有关系式: $z^T(\dot{D} - 2h)z = 0, z \in \mathbb{R}^3$ 为任意变量; 且适当选择 $h(q, \dot{q})$ 的形式可使 $(\dot{D} - 2h)$ 为反对称矩阵^[7]. 显然, 由于系统中各分体的质心速度线性相关于一组(组合)惯性参数, 则矩阵 $D(q), h(q, \dot{q})$ 的元素也可表示为一组适当选择的(组合)惯性参数的线性函数, 这一结果将有利于自适应控制方案的设计.

2 运动 Jacobi 关系 (The Jacobian relationship)

以 x_0 轴相对 Y 轴的偏角 α (载体姿态角), x_1 轴相对 x_0 轴的转角 θ_1 , 以及 x_2 轴相对 x_1 轴的转角 θ_2 为系统的广义坐标, 将机械臂末端 P 点矢径 ρ_P 向 X, Y 轴投影, 得到点 P 的位置坐标

$$\begin{aligned} x_P &= x_c + L_{P0} \sin \alpha + L_{P1} \sin(\alpha + \theta_1) + \\ &\quad L_{P2} \sin(\alpha + \theta_1 + \theta_2), \\ y_P &= y_c + L_{P0} \cos \alpha + L_{P1} \cos(\alpha + \theta_1) + \\ &\quad L_{P2} \cos(\alpha + \theta_1 + \theta_2). \end{aligned} \quad (5)$$

将(5)式中的两式对时间 t 求导, 并利用系统初始动量为零的假定, 得到

$$\begin{aligned} \dot{x}_P &= J_{11} \cdot \dot{\alpha} + J_{12} \cdot \dot{\theta}_1 + J_{13} \cdot \dot{\theta}_2, \\ \dot{y}_P &= J_{21} \cdot \dot{\alpha} + J_{22} \cdot \dot{\theta}_1 + J_{23} \cdot \dot{\theta}_2. \end{aligned} \quad (6)$$

其中, J_{ij} 为 $\alpha, \theta_1, \theta_2$ 的正弦、余弦函数且与 L_{P0}, L_{P1}, L_{P2} 线性相关. 此即空间机械臂末端运动速度与本体姿态及关节较速度间的运动 Jacobi 关系.

3 增广变量法 (Augmentation approach)

空间机械臂本体与末端抓手协调运动的控制问题表现为, 给定本体姿态的运动规律 $\alpha_D(t)$ 及机械臂末端抓手惯性空间的期望运动轨迹 $X_D(t)$, 选择适当的输入力矩 $\tau_0, \tau = (\tau_1 \quad \tau_2)^T$, 使系统同时完

成本体姿态与末端抓手的期望运动 $\alpha_D(t), X_D(t)$. 为此, 定义增广输出变量 $Y = [\alpha \ X_P^T]^T, X_P = [x_P, y_P]^T$; 则可导出增广输出速度变量 $\dot{Y}$ 与广义速度变量 $\dot{q} = [\dot{\alpha} \ \dot{\theta}^T]^T, \theta = [\theta_1, \theta_2]^T$ 的关系

$$\dot{Y} = \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{X}_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ J_b & J_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = J_a \dot{q}, \quad (7)$$

$$J_b = \begin{bmatrix} J_{11} \\ J_{21} \end{bmatrix}, J_r = \begin{bmatrix} J_{12} & J_{13} \\ J_{22} & J_{23} \end{bmatrix}.$$

其中, I 为 1 阶单位阵, 0 为 1×2 阶零矩阵. 矩阵 J_a 可定义为“空间机械臂本体与末端抓手协调运动的增广广义 Jacobi 矩阵”. 显然, 矩阵 J_a 继续保持了对上述(组合) 惯性参数的线性关系.

若 J_r 非奇异, 矩阵 J_a 可逆, 从(7)式可解出

$$\dot{q} = J_a^{-1} \dot{Y} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -J_r^{-1} J_b & J_r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{X}_P \end{bmatrix}. \quad (8)$$

设 $Y_D = [\alpha_D \ X_D^T]^T$, 其中 α_D, X_D 分别为本体姿态的期望运动规律及机械臂末端抓手在惯性空间的期望运动轨迹; 并设 $e_0 = (\alpha_D - \alpha)$ 为本体姿态的实际运动与期望运动之间的误差, $e_1 = (X_D - X_P)$ 为末端抓手实际轨迹与期望轨迹之间的误差. 则 Y 与 Y_D 之间的增广输出误差向量 e 为

$$e = Y_D - Y = \begin{bmatrix} (\alpha_D - \alpha) & (X_D - X_P)^T \end{bmatrix}^T = [e_0 \ e_1^T]^T. \quad (9)$$

利用实测的输出误差 e 计算系统的参考铰速度 η

$$\eta = \hat{J}_a^{-1} [\dot{Y}_D + K_1 e] = [\eta_0 \ \eta_1^T]^T. \quad (10)$$

其中, $\eta_0 = \dot{\alpha}_D + k_{11} e_0, \eta_1 = (-\hat{J}_r^{-1} \hat{J}_b \ \hat{J}_r^{-1}) (\dot{Y}_D + K_1 e)$; K_1 则为任选的对称、正定常值矩阵. 将系统的实际铰速度 $\dot{q}$ 与参考铰速度 η 之差记作 S

$$S = \eta - \dot{q} = (S_0 \ S_1^T)^T, \quad (11)$$

$$S_0 = \eta_0 - \dot{\alpha}, S_1 = \eta_1 - \dot{\theta}.$$

将(9)~(11)式代入(7)式, 导出误差方程

$$\dot{e} + K_1 e = J_a S - W_1 \tilde{\Phi}_1. \quad (12)$$

其中, $W_1 \tilde{\Phi}_1 = (J_a - \hat{J}_a) \eta, \tilde{\Phi}_1 = \Phi_1 - \hat{\Phi}_1$; $\Phi_1, \hat{\Phi}_1$ 分别为 J_a 中惯性参数的待估计参数值和可调参数值. 将(10)式对时间 t 求导, 得到

$$\dot{\eta} = \hat{J}_a^{-1} (\ddot{Y}_D + K_1 \dot{e} - \dot{\hat{J}}_a \eta) = (\dot{\eta}_0 \ \dot{\eta}_1^T)^T. \quad (13)$$

其中

$$\dot{\eta}_0 = \ddot{\alpha}_D + k_{11} \dot{e}_0,$$

$$\dot{\eta}_1 = (-\dot{\hat{J}}_r^{-1} \hat{J}_b \ \dot{\hat{J}}_r^{-1}) (\ddot{Y}_D + K_1 \dot{e} - \dot{\hat{J}}_a \eta).$$

利用(11)式, 系统动力学方程(4)可化作

$$D\dot{S} + hS = D\dot{\eta} + h\eta - (\tau_0 \ \tau^T)^T. \quad (14)$$

4 自适应控制设计(Adaptive control scheme)

设计如下控制规律

$$(\tau_0 \ \tau^T)^T = \hat{D}\dot{\eta} + \hat{h}\eta + (K_0 S_0 \ (K_2 S_1)^T)^T. \quad (15)$$

其中 $\hat{D}, \hat{h}$ 为参考模型中相应的 D, h 矩阵, K_2 为任选的对称、正定常值矩阵.

将(15)式确定的系统控制规律代入(14)式, 得到

$$D\dot{S} + hS + (K_0 S_0 \ (K_2 S_1)^T)^T = W_2 \tilde{\Phi}_2. \quad (16)$$

矩阵 $W_2 \tilde{\Phi}_2$ 定义为 $W_2 \tilde{\Phi}_2 = (D - \hat{D})\dot{\eta} + (h - \hat{h})\eta$, 其中 $\tilde{\Phi}_2 = \Phi_2 - \hat{\Phi}_2$, Φ_2 为真实模型中从 D, h 分离出的待估计参数真值, $\hat{\Phi}_2$ 为参考模型中从 $\hat{D}, \hat{h}$ 分离出的可调参数值, W_2 为 $q, \dot{q}, \eta, \dot{\eta}$ 的不含待估计参数的函数矩阵.

定理 控制规律(15)和参数调节规律

$$\dot{\hat{\Phi}}_1 = -W_1^T H e, \dot{\hat{\Phi}}_2 = \gamma W_2^T S \quad (17)$$

可保证, $\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0$.

证 设 $e = 0, S = 0$ 为无扰运动, (12)和(16)式为受扰运动方程, 选择如下正定函数 V 作为 Lyapunov 函数:

$$V = (1/2)(e^T H e + \gamma S^T D S + \tilde{\Phi}_1^T \tilde{\Phi}_1 + \tilde{\Phi}_2^T \tilde{\Phi}_2). \quad (18)$$

计算 V 通过动力学方程构成的全导数 $\dot{V}$, 并利用(12), (16), (17)及前面关系式, 有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T H \dot{e} + \gamma S^T D \dot{S} + (1/2) \gamma S^T \dot{D} S + \\ &\quad \tilde{\Phi}_1^T \dot{\tilde{\Phi}}_1 + \tilde{\Phi}_2^T \dot{\tilde{\Phi}}_2 = \\ &\quad e^T H (-K_1 e - W_1 \tilde{\Phi}_1 + J_a S) + \\ &\quad \gamma S^T (D \dot{S} + hS) - \tilde{\Phi}_1^T \dot{\tilde{\Phi}}_1 - \tilde{\Phi}_2^T \dot{\tilde{\Phi}}_2 = \\ &\quad -e^T H K_1 e + e^T H J_a S + \gamma S^T [W_2 \tilde{\Phi}_2 - \\ &\quad (K_0 S_0 \ (K_2 S_1)^T)^T] - \tilde{\Phi}_2^T \dot{\tilde{\Phi}}_2 = \\ &\quad -e^T H K_1 e + e^T H J_a S - \gamma S^T K S. \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $K = \text{diag}(K_0 \ K_2)$. 显然 $\dot{V}$ 为 e, S 的二次型. 因 J_a 有界, 当参数 γ 选择得足够大时可保证它们的和小于零, 且 $\dot{V} = 0$, 当且仅当 $e = 0, S = 0$.

分析: 因 $\dot{V} \leq 0$, 且 V 有下界(为零), 则当 $t \rightarrow \infty$ 时, V 趋于某常数, 故在区间 $t \in [0, \infty]$ 是有界的. 因 D 一致正定, 则由 V 的定义可导出 e, S 亦有界, 从而 $\dot{q}, \eta, \dot{e}$ 有界, $\tilde{\Phi}_1, \tilde{\Phi}_2$ 也有界. 由(16)可知 $\dot{S}$ 也是有界的. 由于 $\dot{e}, \dot{S}, J_a$ 及 $\dot{J}_a$ 是有界的, 则 $\dot{V}$ 在区间 $t \in [0, \infty]$ 是一致连续的; 则由 V 有界及 $\dot{V}$ 不变号($\dot{V} \leq 0$)可知, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V} = 0$. 则由(19)式可知, 当 $t \rightarrow$

∞ 时, $e \rightarrow 0, S \rightarrow 0$.

由(9)式可进一步导出, $\lim_{t \rightarrow \infty} e_1 = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_0 = 0$.

证毕.

5 仿真算例(Simulation study)

以作平面运动的自由浮动两杆空间机械臂系统为例. 系统参数如下: $l_0 = 1.5\text{m}, l_1 = 2a_1 = 3.0\text{m}, l_2 = 2a_2 = 3.0\text{m}$; 各分体质量的实际值分别为 $m_0 = 40\text{kg}, m_1 = 2m_2 = 2\text{kg}$, 中心惯量矩为 $J_0 = 34.17\text{kg} \cdot \text{m}^2, J_1 = J_2 = 1.5\text{kg} \cdot \text{m}^2$. 仿真时假定杆件质量 m_1, m_2 为未知参数, 并设本体姿态的期望运动分别为

1) $\alpha_D = \pi/2$;

2) $\alpha_D = 0.0$.

两种情况下, 机械臂末端抓手在惯性工作空间的期望轨迹均为圆:

$$x_D = 4.2 - 0.6 \cdot \cos(1.5t),$$

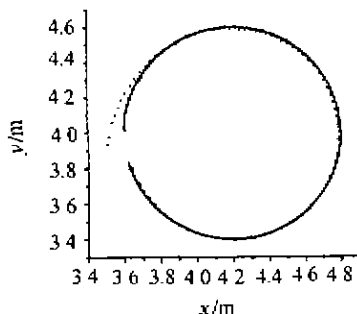


图 2(a) 手端实际轨迹与期望轨迹比较

Fig. 2(a) The actual trajectory and desired trajectory of space manipulator

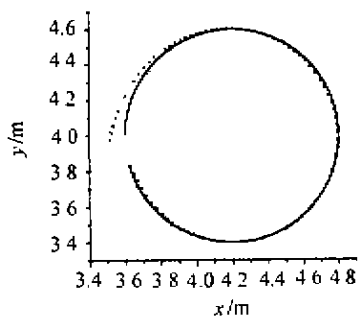


图 3(a) 手端实际轨迹与期望轨迹比较

Fig. 3(a) The actual trajectory and desired trajectory of space manipulator

$$y_D = 4.0 + 0.6 \cdot \sin(1.5t).$$

仿真时两种情况下的初值均取为: $\alpha(0) = 90^\circ, \theta_1(0) = -12^\circ, \theta_2(0) = -84^\circ$; 杆件质量 m_1, m_2 的初始估计值均为零. 利用上面的控制方案(15)和(17)进行系统仿真运算.

图 2(a)为第一种情况下得到的手端实际轨迹与期望轨迹比较, 图 2(b)为此间本体姿态角及机械臂关节角的变化情况. 图 3(a)为第二种情况下得到的手端实际轨迹与期望轨迹比较, 图 3(b)为此间本体姿态角及机械臂关节角的变化情况.

仿真计算结果表明, 文中提出的控制算法能够有效地消除惯性参数不确定对控制精度的影响, 有效地控制空间机械臂的本体与末端抓手协调地完成各自的期望运动. 上述控制方案也可以推广应用于作三维运动的一般空间机械臂系统.

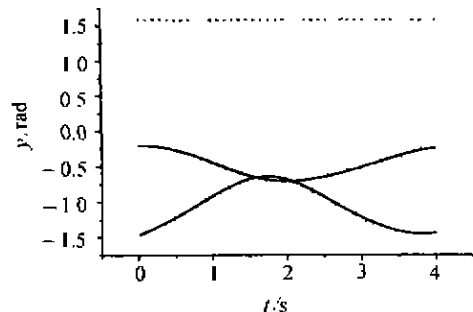


图 2(b) 本体姿态角及机械臂关节角的变化情况

Fig. 2(b) The angle change curves of the base and the arms joints

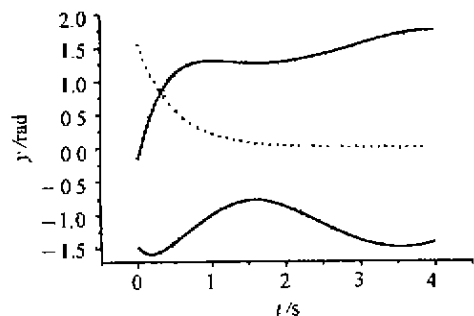


图 3(b) 本体姿态角及机械臂关节角的变化情况

Fig. 3(b) The angle change curves of the base and the arms joints

参考文献(References)

- [1] Papadopoulos E G and Dubowsky S. On the nature of control algorithms for free-floating space manipulators [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(6): 750 - 758
- [2] Vava Z and Dubowsky S. On the dynamics of space manipulators using the virtual manipulator, with applications to path planning [J].

Journal of the Astronautical Science, 1990, 38(4): 441 - 472

- [3] Chen Li and Liu Yanzhu. The adaptive control schemes of resolved motion of space-based manipulator with prismatic joint and uncertain parameters [A]. Eighth International Space Conference of Pacific-Basin Societies [C], Xi'an, 1999: 318 - 324
- [4] Chen Li, Liu Yanzhu and Wu Wenlong. Adaptive and robust control of space manipulator system [J]. Control Theory and Applications.

- 1999, 16(1):71-75 (in Chinese)
- [5] Michael W and Walker. Adaptive control of space-based robot manipulators [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 7(6):828-835
- [6] Ma Baoli and Huo Wei. Adaptive control of space robot system [J]. Control Theory and Applications, 1996, 13(2):191-197 (in Chinese)
- [7] Slotin J E and Li W P. On the adaptive control of robot manipulators [J]. Journal of the Robotics Research, 1987, 6(3):49-59

本文作者简介

陈 力 1961 年生, 1984 年毕业于吉林大学数学力学专业, 1994

年 2 月获东北大学一般力学硕士学位, 1997 年 4 月获上海交通大学一般力学博士学位, 现为福州大学机械系机械电子工程硕士点责任教授, 中国自动化学会机器人专业委员会委员, 主要研究方向: 多体系统动力学, 空间机器人动力学与控制, 并在国内外核心期刊及学术会议上发表论文 40 余篇. Email: chnle@pub5.fz.fj.cn

刘廷柱 1936 年生, 1959 年毕业于清华大学, 1960 至 1962 年于莫斯科大学进修, 1962 至 1973 年任教于清华大学, 现任上海交通大学教授, 博士生导师, 工程力学研究所所长, 国务院学位委员会力学评议组成员等职, 主要研究领域: 陀螺力学, 多体动力学, 航天器姿态动力学和运动生物力学, 主持完成了多项国家自然科学基金及博士点基金项目的工作, 出版多部学术专著, 并在国内外核心期刊及学术会议上发表论文 150 余篇.

(上接第 273 页)

5 结论(Conclusion)

本文对于状态受限的单链式系统给出了一种两步实际镇定控制律, 使得闭环系统的状态在有限时间内收敛到原点的任意小邻域中, 且若系统初值小于任意正数 M , 那么除了一个收敛到零的状态变量外, 其余状态变量在整个实际镇定过程中均小于正数 $(\varepsilon_1 + 1)M$, 其中 ε_1 可事先任意小. 这种方法有望推广到多链式系统和相应的动力学系统中.

参考文献(References)

- [1] Kolmanovsky H Y and McClamroch N H. Development in nonholonomic control problems [J]. IEEE Control systems, 1995, 25(7):20-36
- [2] Campion G. Controllability and state feedback stabilizability nonholonomic mechanical systems [A] de Wit C Canudas, ed. Advanced

Robot Control [M]. LNCIS 162, Springer, 1991:106-124

- [3] Dong Wenjie and Huo Wei. Tracking control of wheeled mobile robots with unknown dynamics [A]. Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation [C], Detroit, Michigan, 1999: 2645-2650
- [4] Nobuhide SUDA. Matrix Theory in Automatic Control [M]. Beijing: Science Press, 1979

本文作者简介

王朝立 1986 年获兰州大学应用数学专业学士学位, 1992 年获兰州大学应用数学专业硕士学位, 1999 年 3 月获北京航空航天大学控制理论及应用专业博士学位, 同年进入中国科学院机器人学开放研究实验室做博士后工作至今, 研究方向: 非线性控制, 鲁棒控制, 非完整系统控制, 多机器人系统控制. Email: chaoz@ms.sia.ac.cn

谈大龙 1941 年生, 研究员, 开放实验室学术委员会主席, 博士生导师, 研究领域: 机器人学, 智能控制.

王越超 1963 年生, 教授, 室主任, 研究领域包括: 机器人动力学与控制, 智能控制, 多机器人控制等.