

带滑移铰空间机械臂惯性空间轨迹的 复合自适应跟踪控制^{*}

陈 力

(福州大学机械系 福州 350002)

摘 要

讨论了载体的位置与姿态均不受控制的漂浮基带滑移铰空间机械臂的控制问题。动力学分析表明,结合系统动量及动量矩守恒关系得到的运动 Jacobi 关系及系统动力学方程将是系统惯性参数的非线性函数。借助于增广变量法,我们得到了与惯性参数呈线性关系的系统广义 Jacobi 矩阵及系统控制方程。以此为基础,针对系统中存在未知惯性参数的情况,设计了一种末端抓手惯性空间期望轨迹跟踪的复合自适应控制方案,此控制方案的优点在于不需要测量空间机械臂载体的位置及移动的速度、加速度。仿真运算证实了方法的有效性。

关键词 漂浮基带滑移铰空间机械臂; 增广变量法; 复合自适应控制

1 引言

空间机械臂是未来空间活动的重要工具,期望能够承担空间站的日常维修及大型空间站的在轨组装工作,如目前国际空间站上的遥控机械臂系统。为了节省控制燃料、增加空间机械臂的有效使用寿命,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将非常必要,并引起了研究人员的热切关注^{[1]~[5]}。此类系统的突出特点为:系统表现出非完整系统动力学性质,系统动力学方程中的惯性参数不符合惯常的线性规律。上述情况使得目前地面机械臂中基于惯性参数线性关系的自适应等控制方法难以直接应用,众多学者对空间机械臂的自适应控制问题作了研究^{[2],[4]~[7]}。但值得注意的是,文献[6],[7]仅是针对载体姿态受控制固定不变的情况,且未给出保持载体姿态固定不变所需的控制力矩输入规律;文献[2]虽然针对的是载体位置和姿态均不受控制的情况,但在控制过程中需要测量反馈载体的位置及移动的速度和加速度。此外上面提到的控制方案都是针对具有转动铰空间机械臂的,而滑移铰机械臂具有较好的运动性能应该给予关注。我们曾在文献[8]中,从运动学角度讨论了带滑移铰空间机械臂的自适应控制问题,给出了末端抓手追踪惯性空间轨迹的分解运动速度、加速度的自适应控制算法。然而实际系统的控制输入是关节铰的控制力或控制力矩,因此从动力学角度研究此类空间机械臂的控制问题是非常必要的。本文结合系统动量守恒关系对漂浮基带滑移铰两杆空间机械臂系统的运动学、动力学作了分析,并采用增广变量法获得了一组与系统惯性参数呈线性函数关系的系统广

^{*} 国家自然科学基金(19872032),福建省自然科学基金(E0110009)和福州大学科技发展基金共同资助项目
2001-11-05 收到原稿, 2002-09-20 收到修定稿

义 Jacobi 矩阵及系统动力学方程, 进而据此给出了系统参数未知情况下末端抓手跟踪惯性空间期望运动轨迹的复合自适应控制方法. 仿真运算, 证实了本文提出方法的有效性.

2 系统运动学和动力学

为不失一般性, 考虑做平面运动的漂浮基带滑移铰两杆空间机械臂系统, 如图 1 所示. 设系统由自由漂浮的载体 B_0 , 机械臂 B_1, B_2 组成. 建立各分体 B_i ($i = 0, 1, 2$) 的主轴坐标系 $(O_i-x_iy_i)$, 其中 O_0 与 B_0 的质心 O_{c0} 重合, O_1 为联结 B_1 与 B_0 的转动铰中心, O_2 为联结 B_2 与 B_1 的滑移铰中心, x_i ($i = 1, 2$) 为机械臂的对称轴. 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 ($i = 1, 2$); 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 B_2 末端 P 点的距离为 b_2 ; 各分体的质量和中心惯量张量分别为 m_i 和 I_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.

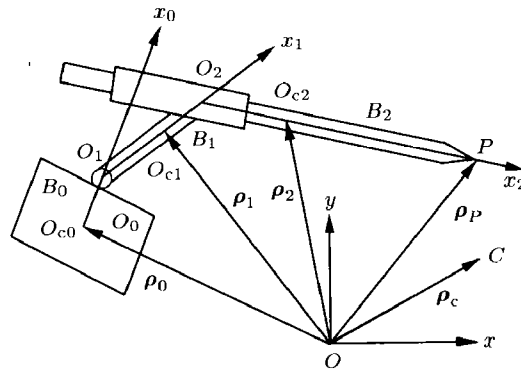


图 1 漂浮基带滑移铰两杆空间机械臂

Fig.1 Space manipulator system with prismatic joint

建立随载体的轨道运动做平动运动的惯性坐标系 $(O-xy)$, 设各分体沿 xy 平面作平面运动, 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及系统质心定义, 各分体质心 O_{ci} 及机械臂末端 P 点相对 O 的矢径 ρ_i ($i = 0, 1, 2$) 和 ρ_P 为

$$\begin{aligned}\rho_0 &= \rho_c - L_{00}e_0 - L_{01}e_1 + (L_{02} - L_{03}x')e_2, \\ \rho_1 &= \rho_c - L_{10}e_0 - L_{11}e_1 + (L_{12} - L_{13}x')e_2, \\ \rho_2 &= \rho_c - L_{20}e_0 - L_{21}e_1 + (L_{22} - L_{23}x')e_2, \\ \rho_P &= \rho_c - L_{P0}e_0 - L_{P1}e_1 + (L_{P2} - L_{P3}x')e_2.\end{aligned}\quad (1)$$

其中, $L_{00} = (m_1 + m_2)l_0/M$, $L_{01} = (m_1a_1 + m_2l_1)/M$, $L_{02} = (m_2b_2)/M$, $L_{03} = m_2/M$; 而 L_{1i} , L_{2i} , L_{Pi} 与 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漂浮无根多体系统, 遵守对 $(O-xy)$ 的动量及对 O 点的动量矩守恒关系. 为不失一般性, 设系统的初始动量、动量矩均为零,

则有 $\dot{\rho}_c = 0$. 则由 (1) 式可以看到, 系统中各分体质心的速度 $\dot{\rho}_i$ 以及机械臂末端的线速度 $\dot{\rho}_P$ 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, 带滑移铰空间机械臂的系统动力学方程可写为如下形式:

$$D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})\dot{q} = (0 \ \tau^T)^T. \quad (2)$$

其中, $D(q)$ 为系统的 3×3 对称、正定质量矩阵, $h(q, \dot{q})\dot{q}$ 为包含科氏力、离心力的 3 阶列矢量, $\tau = (\tau_1 \ f_2)^T$ 为由 O_1 铰的控制力矩 τ_1 与 O_2 铰的控制力 f_2 组成的 2 阶列矢量, $q = [\theta_0 \ \theta^T]^T$, $\theta = [\theta_1, x']^T$ 为系统的广义坐标列矢量; 矩阵 $D(q)$ 与 $h(q, \dot{q})$ 之间的关系不是任意的, 适当选择 $h(q, \dot{q})$ 的形式可使 $(\dot{D} - 2h)$ 为反对称矩阵^[9], 且对任意矢量 $z \in \mathbb{R}^3$ 满足关系: $z^T h z = (1/2)z^T \dot{D} z$.

必须指出, (2) 式中的矩阵 $D(q)$, $h(q, \dot{q})$ 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.

方程 (2) 可分解为两部分:

$$D_{11}\ddot{\theta}_0 + D_{12}\ddot{\theta} + (h_{11} \ h_{12})\dot{q} = 0, \quad D_{21}\ddot{\theta}_0 + D_{22}\ddot{\theta} + (h_{21} \ h_{22})\dot{q} = \tau. \quad (3)$$

其中, D_{11} , D_{22} 分别为对称质量矩阵 D 的 1×1 , 2×2 对称子矩阵, $D_{12} = D_{21}^T$ 为 1×2 子矩阵; 第一式的首次积分表现为系统的动量矩守恒关系, 系统动量守恒关系则在推导过程中耦合在系统动力学方程中.

3 运动 Jacobi 关系

将 x_0 轴相对 y 轴的偏角 θ_0 , x_1 轴相对 x_0 轴的转角 θ_1 , 以及 B_2 末端 P 到 O_2 的距离 x' 取为系统广义坐标, 并将机械臂末端 P 点矢径 ρ_P 向 x, y 轴投影, 得到点 P 的位置坐标:

$$\begin{aligned} x_P &= x_c - L_{P0} \sin \theta_0 - L_{P1} \sin(\theta_0 + \theta_1) + (L_{P2} - L_{P3} \cdot x') \sin(\theta_0 + \theta_1 + \beta), \\ y_P &= y_c - L_{P0} \cos \theta_0 - L_{P1} \cos(\theta_0 + \theta_1) + (L_{P2} - L_{P3} \cdot x') \cos(\theta_0 + \theta_1 + \beta). \end{aligned} \quad (4)$$

其中, 常量 β 为 x_2 轴与 x_1 轴的夹角.

将 (4) 式中的两式分别对时间 t 求导, 有:

$$\dot{x}_P = J_{11} \cdot \dot{\theta}_0 + J_{12} \cdot \dot{\theta}_1 + J_{13} \cdot \dot{x}', \quad \dot{y}_P = J_{21} \cdot \dot{\theta}_0 + J_{22} \cdot \dot{\theta}_1 + J_{23} \cdot \dot{x}'. \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} J_{11} &= -L_{P0} \cos \theta_0 - L_{P1} \cos(\theta_0 + \theta_1) + (L_{P2} - L_{P3} \cdot x') \cos(\theta_0 + \theta_1 + \beta), \\ J_{12} &= -L_{P1} \cos(\theta_0 + \theta_1) + (L_{P2} - L_{P3} \cdot x') \cos(\theta_0 + \theta_1 + \beta), \\ J_{13} &= -L_{P3} \sin(\theta_0 + \theta_1 + \beta), \\ J_{21} &= L_{P0} \sin \theta_0 + L_{P1} \sin(\theta_0 + \theta_1) - (L_{P2} - L_{P3} \cdot x') \sin(\theta_0 + \theta_1 + \beta), \\ J_{22} &= L_{P1} \sin(\theta_0 + \theta_1) - (L_{P2} - L_{P3} \cdot x') \sin(\theta_0 + \theta_1 + \beta), \\ J_{23} &= -L_{P3} \cos(\theta_0 + \theta_1 + \beta). \end{aligned}$$

显然, 末端抓手的线速度与惯性参数 $L_{P0}, L_{P1}, L_{P2}, L_{P3}$ 呈线性关系. 但是 (5) 式中包含了载体姿态角速度项 $\dot{\theta}_0$, 为了得到末端运动速度 $(\dot{x}_P, \dot{y}_P)^T$ 与机械臂关节铰速度 $(\dot{\theta}_1, \dot{x}')^T$ 之间的广义 Jacobi 矩阵^[10], 需利用系统动量矩守恒关系 (即 (3) 式第一式的积分) 消去 (5) 式中的 $\dot{\theta}_0$. 此时上述线性函数关系将不复存在, 这将不适于自适应等控制方案的实现. 为此, 我们采用增广变量的方法克服这一困难.

4 增广变量法

为了继续保持空间机械臂系统运动 Jacobi 关系关于惯性参数的线性函数关系, 我们扩展系统原来的输出 $\mathbf{X}_P = [x_P, y_P]^T$, 定义 $\mathbf{Y} = [\theta_0 \ \mathbf{X}_P^T]^T$ 为系统新的增广输出变量; 则可导出系统新的增广输出速度变量 $\dot{\mathbf{Y}}$ 与系统广义速度变量 $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{\theta}_0 \ \dot{\theta}^T]^T$, $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1, \dot{x}']^T$ 之间的关系为

$$\dot{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_0 \\ \dot{\mathbf{X}}_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{O} \\ \mathbf{J}_b & \mathbf{J}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_a \dot{\mathbf{q}}, \quad \mathbf{J}_b = \begin{bmatrix} J_{11} \\ J_{21} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}_r = \begin{bmatrix} J_{12} & J_{13} \\ J_{22} & J_{23} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

其中, $\mathbf{I}$ 为 1 阶单位矩阵, $\mathbf{O}$ 为 1×2 阶零矩阵.

由 (6) 式可见矩阵 $\mathbf{J}_a$ 继续保持了上述关于惯性参数的线性函数关系. 若 $\mathbf{J}_r$ 非奇异, 矩阵 $\mathbf{J}_a$ 可逆, 从 (6) 式可解出:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_a^{-1} \dot{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{O} \\ -\mathbf{J}_r^{-1} \mathbf{J}_b & \mathbf{J}_r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_0 \\ \dot{\mathbf{X}}_P \end{bmatrix}. \quad (7)$$

设 $\mathbf{Y}_D = [\theta_0 \ \mathbf{X}_D^T]^T$ 为系统的增广期望输出变量, 其中, $\mathbf{X}_D$ 为空间机械臂末端抓手在惯性空间的期望运动轨迹; 并定义 $\mathbf{e}_1 = (\mathbf{X}_D - \mathbf{X}_P)$ 为实际轨迹与期望轨迹之间的实际误差, 则 $\mathbf{Y}$ 与 $\mathbf{Y}_D$ 之间的增广输出误差矢量 $\mathbf{e}$ 为

$$\mathbf{e} = \mathbf{Y}_D - \mathbf{Y} = [0 \ (\mathbf{X}_D - \mathbf{X}_P)^T]^T = [0 \ \mathbf{e}_1^T]^T. \quad (8)$$

利用实测的输出误差 $\mathbf{e}$ 计算系统的参考铰速度 $\dot{\eta}$,

$$\dot{\eta} = \tilde{\mathbf{J}}_a^{-1} [\dot{\mathbf{Y}}_D + \mathbf{K}_1 \mathbf{e}] = [\dot{\theta}_0 \ \dot{\eta}_r^T]^T, \quad \dot{\eta}_r = (-\tilde{\mathbf{J}}_r^{-1} \tilde{\mathbf{J}}_b) \dot{\theta}_0 + \tilde{\mathbf{J}}_r^{-1} (\dot{\mathbf{X}}_D + \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_1). \quad (9)$$

其中, $\mathbf{K}_1$ 为任选对称正定常值矩阵, 将系统的实际铰速度 $\dot{\mathbf{q}}$ 与参考铰速度 $\dot{\eta}$ 之差记作 $\dot{\mathbf{s}}$

$$\dot{\mathbf{s}} = \dot{\eta} - \dot{\mathbf{q}} = (0 \ \dot{\mathbf{s}}_1^T)^T, \quad \dot{\mathbf{s}}_1 = \dot{\eta}_r - \dot{\theta}. \quad (10)$$

将 (8), (9), (10) 式代入 (6) 式, 导出误差方程:

$$\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_1 \mathbf{e} = \mathbf{J}_a \dot{\mathbf{s}} - \mathbf{W}_1 \tilde{\Phi}_1. \quad (11)$$

其中, $\mathbf{W}_1 \tilde{\Phi}_1 = (\mathbf{J}_a - \tilde{\mathbf{J}}_a) \dot{\eta}$, $\tilde{\Phi}_1 = (\Phi_1 - \tilde{\Phi}_1) \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$; 此处, $\Phi_1, \tilde{\Phi}_1$ 分别为 $\mathbf{J}_a, \tilde{\mathbf{J}}_a$ 中惯性参数的待估计参数值和可调参数值.

将 (9) 式对时间 t 求导, 得到:

$$\begin{aligned} \ddot{\eta} &= \tilde{\mathbf{J}}_a^{-1} (\ddot{\mathbf{Y}}_D + \mathbf{K}_1 \dot{\mathbf{e}} - \dot{\tilde{\mathbf{J}}}_a \dot{\eta}) = (\ddot{\alpha} \ \ddot{\eta}_r^T)^T, \\ \ddot{\eta}_r &= (-\tilde{\mathbf{J}}_r^{-1} \tilde{\mathbf{J}}_b) \ddot{\theta}_0 + \tilde{\mathbf{J}}_r^{-1} [\ddot{\mathbf{X}}_D + \mathbf{K}_1 \dot{\mathbf{e}}_1 - (\dot{\tilde{\mathbf{J}}}_b \dot{\theta}_0 + \dot{\tilde{\mathbf{J}}}_r \dot{\eta}_r)]. \end{aligned} \quad (12)$$

利用 (10) 式, 系统动力学方程 (2) 可化作:

$$D\ddot{s} + h\dot{s} = D\ddot{\eta} + h\dot{\eta} - [0 \ \tau^T]^T. \quad (13)$$

显然, 上式继续保持了前述的关于惯性参数的线性关系, 这一结果正是我们所期望的. 由 (13) 式可见, 为了保持上述线性关系不仅需要虚拟扩展系统的输出 $X_P = [x_P, y_P]^T$ 为 $Y = [\theta_0 \ X_P^T]^T$, 还需要扩展系统的控制输入 $\tau = [\tau_1 \ f_2]^T$ 为 $\tau = [0 \ \tau^T]^T$.

5 复合自适应控制方案设计

设计如下虚拟增广控制输入规律:

$$[0 \ \tau^T]^T = \tilde{D}\ddot{\eta} + \tilde{h}\dot{\eta} + [\delta \ (K_2\dot{s}_1)^T]^T. \quad (14)$$

其中, $\tilde{D}, \tilde{h}$ 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.

控制输入 (14) 亦可分解为如下两部分:

$$\begin{aligned} 0 &= \tilde{D}_{11}\ddot{\theta}_0 + \tilde{D}_{12}\ddot{\eta}_r + \tilde{h}_{11}\dot{\theta}_0 + \tilde{h}_{12}\dot{\eta}_r + \delta, \\ \tau &= \tilde{D}_{21}\ddot{\theta}_0 + \tilde{D}_{22}\ddot{\eta}_r + \tilde{h}_{21}\dot{\theta}_0 + \tilde{h}_{22}\dot{\eta}_r + K_2\dot{s}_1. \end{aligned} \quad (15)$$

其中, 参数 δ 的作用在于使 (15) 中第一式右端恒为零得到满足.

将 (14) 式确定的控制输入规律代入 (13) 式, 得到:

$$D\ddot{s} + h\dot{s} + [\delta \ (K_2\dot{s}_1)^T]^T = W_2\bar{\Phi}_2. \quad (16)$$

矩阵 $W_2\bar{\Phi}_2$ 定义为:

$$W_2\bar{\Phi}_2 = (D - \tilde{D})\ddot{\eta} + (h - \tilde{h})\dot{\eta}.$$

其中, $\bar{\Phi}_2 = (\Phi_2 - \tilde{\Phi}_2) \in \mathbb{R}^{10 \times 1}$, Φ_2 为系统真实模型中从 D, h 分离出的待估计参数矢量, $\tilde{\Phi}_2$ 为参考模型中从 $\tilde{D}, \tilde{h}$ 分离出的可调参数矢量; $W_2 \in \mathbb{R}^{3 \times 10}$ 为 $q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{\eta}$ 的不含待估计参数的函数矩阵. 则有以下定理.

定理 系统的虚拟增广控制输入规律 (14) 和如下的可调参数 $\tilde{\Phi}_1, \tilde{\Phi}_2$ 的自适应规律:

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

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

证明 设 $e = 0, \dot{s} = 0$ 为无扰运动, (11), (16) 式为受扰运动方程, 选择如下正定函数 V 作为 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2}(e^T H e + \gamma \dot{s}^T D \dot{s} + \tilde{\Phi}_1^T \tilde{\Phi}_1 + \tilde{\Phi}_2^T \tilde{\Phi}_2).$$

计算 V 通过动力学方程构成的全导数 $\dot{V}$, 并利用 (11), (16), (17) 式及前面的关系, 有:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T H \dot{e} + \gamma \dot{s}^T D \ddot{s} + \frac{1}{2} \gamma \dot{s}^T \dot{D} \dot{s} + \tilde{\Phi}_1^T \dot{\tilde{\Phi}}_1 + \tilde{\Phi}_2^T \dot{\tilde{\Phi}}_2 \\ &= e^T H (-K_1 e - W_1 \tilde{\Phi}_1 + J_a \dot{s}) + \gamma \dot{s}^T (D \ddot{s} + h \dot{s}) - \tilde{\Phi}_1^T \dot{\tilde{\Phi}}_1 - \tilde{\Phi}_2^T \dot{\tilde{\Phi}}_2 \\ &= -e^T H K_1 e + e^T H J_a \dot{s} + \gamma \dot{s}^T [W_2 \bar{\Phi}_2 - (\delta (K_2 \dot{s}_1)^T)^T] - \tilde{\Phi}_2^T \dot{\tilde{\Phi}}_2 \end{aligned}$$

$$= -\mathbf{e}^T \mathbf{H} \mathbf{K}_1 \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{H} \mathbf{J}_a \dot{\mathbf{s}} - \gamma \dot{\mathbf{s}}^T \mathbf{K} \dot{\mathbf{s}}. \quad (18)$$

其中, $\mathbf{K} = \text{diag}(1 \ \mathbf{K}_2)$, 显然 $\dot{\mathbf{V}}$ 为 $\mathbf{e}, \dot{\mathbf{s}}$ 的二次型. 因 $\mathbf{J}_a$ 有界, 当参数 γ 选择得足够大时可保证它们的和小于零, 且 $\dot{\mathbf{V}} = 0$, 当且仅当 $\mathbf{e} = 0, \dot{\mathbf{s}} = 0$.

分析 因为 $\dot{\mathbf{V}} \leq 0$, 且 $\mathbf{V}$ 有下界 (为零), 则当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\mathbf{V}$ 趋于某一常数, 故在区间 $t \in [0, \infty]$ 是有界的. 又因为 $\mathbf{D}$ 一致正定, 则由 $\mathbf{V}$ 的定义可导出 $\mathbf{e}, \dot{\mathbf{s}}$ 亦有界, 从而 $\dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{e}}$ 有界, $\bar{\Phi}_1, \bar{\Phi}_2$ 也有界. 由 (16) 可知 $\ddot{\mathbf{s}}$ 也是有界的. 由于 $\dot{\mathbf{e}}, \ddot{\mathbf{s}}, \mathbf{J}_a$ 及 $\dot{\mathbf{J}}_a$ 是有界的, 则 $\dot{\mathbf{V}}$ 在区间 $t \in [0, \infty]$ 是一致连续的; 则由 $\mathbf{V}$ 有界及 $\dot{\mathbf{V}}$ 不变号 ($\dot{\mathbf{V}} \leq 0$) 可知, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\mathbf{V}} = 0$. 则由 (18) 式可知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\mathbf{e} \rightarrow 0, \dot{\mathbf{s}} \rightarrow 0$. (证毕).

进一步, 如有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{\Phi}_1 = 0$, 则由 (11) 式还可导出, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\mathbf{e}} = 0$.

6 仿真算例

以作平面运动的漂浮基带滑移铰两杆空间机械臂系统为例, 系统中载体及机械臂的相关参数分别为: $m_0 = 40\text{kg}$, $2m_1 = m_2 = 4\text{kg}$; $l_0 = 0.5\text{m}$, $l_1 = 2a_1 = 0.8\text{m}$, $l_2 = 2a_2 = 6\text{m}$; $\beta = -\pi/10$; $\mathbf{I}_0 = 26.7\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $\mathbf{I}_2 = 2\mathbf{I}_1 = 4\text{kg}\cdot\text{m}^2$. 仿真时, 假定机械臂的质量 m_1, m_2 及中心惯量矩 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ 为未知参数, 并设机械臂末端抓手在惯性空间的期望运动轨迹为

$$x_D = 4.0 - 1.6 \cos(0.2\pi t), \quad y_D = 1.6 \sin(0.2\pi t).$$

仿真的追踪过程为 10s; 运动初始值取为: $\theta_0 = -1.65\text{rad}$, $\theta_1 = 3.44\text{rad}$, $\mathbf{x}' = 1.86\text{m}$; 机械臂的质量 m_1, m_2 和中心惯量矩 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ 的初始估计值均取为零; 利用上面给出的复合自适应控制方案 (14) 及 (17) 式进行系统仿真运算. 图 2 为得到的末端抓手实际运动轨迹 (虚线) 与期望运动轨迹 (实线) 的比较情况; 图 3 为此期间载体姿态角 (虚线) 及机械臂第 1 个 (转动) 关节角 (实线) 的变化情况; 图 4 为机械臂第 2 个 (滑移) 关节角的变化情况.

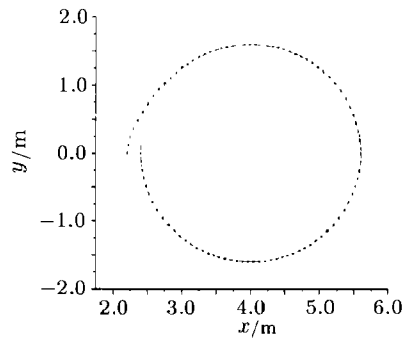


图 2 末端抓手实际轨迹与期望轨迹比较

Fig.2 The desired and actual trajectory of the end-effector

仿真结果表明, 本文提出的复合自适应控制方案能够消除惯性参数未知对控制精度的影响, 有效地控制空间机械臂的末端抓手稳定地跟踪惯性空间的期望运动轨迹. 此外, 由于不需要对载体的位置、姿态加以控制, 大大减少了喷气装置的燃料消耗, 能够有效延

长空间机械臂的在轨使用寿命.

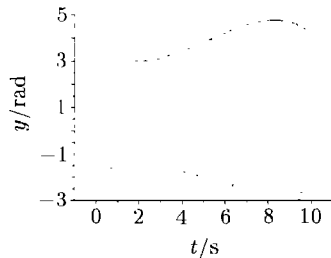


图3 载体姿态及机械臂转动关节角的变化情况
Fig.3 The angle change curves of the base and the first joint

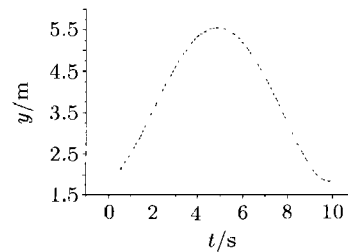


图4 机械臂滑移关节角的变化情况
Fig.4 The change curve of prismatic joint

参 考 文 献

- [1] Papadopoulos E G, Dubwsky S. On the nature of control algorithms for free-floating space manipulators. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 1991, **7**(6):750—758
- [2] Gu Y L, Xu Y S. A normal form augmentation approach to adaptive control of space robot systems. *J. Dyn. Cont.*, 1995, **5**:275—294
- [3] Ge Xinsheng, Zhang Qizhi, Liu Yanzhu. An optimized method to control the motion planning of space manipulators base genetic algorithm. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, **20**(2):185—190, in Chinese (戈新生, 张奇志, 刘延柱. 基于遗传算法的空间机械臂运动规划的最优控制. 空间科学学报, 2000, **20**(2):185—190)
- [4] Chen Li, Liu Yanzhu. The robust adaptive control of free-floating space manipulator systems. Proceedings of 2001 ASME Design Engineering Technical Conferences, 2001, Pittsburgh, Pennsylvania, USA
- [5] Chen Li, Liu Yanzhu. Adaptive control for space manipulator to track the desired trajectory in joint space. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, **20**(4):348—355, in Chinese (陈力, 刘延柱. 参数不确定空间机械臂关节轨迹跟踪的增广自适应控制方案. 空间科学学报, 2000, **20**(4):348—355)
- [6] Michael W, Walker. Adaptive control of space-based robot manipulators. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 1992, **7**(6):828—835
- [7] Ma Baoli, Huo Wei. Adaptive control of space robot system. *Chin. J. Cont. The. Appl.*, 1996, **13**(2):191—197, in Chinese (马保离, 霍伟. 空间机器人系统的自适应控制. 控制理论与应用, 1996, **13**(2):191—197)
- [8] Chen Li, Liu Yanzhu. The adaptive control schemes of resolved motion of space-based manipulator with prismatic joint. *Chin. J. Appl. Mech.*, 2000, **17**(4):131—137, in Chinese (陈力, 刘延柱. 漂浮基带滑移铰空间机械臂的分解运动自适应控制算法. 应用力学学报. 2000, **17**(4):131—137)
- [9] Slotin J E, Li W P. On the adaptive control of robot manipulators. *J. Robot. Res.*, 1987, **6**(3):49—59
- [10] Umetani Y, Yoshida K. Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix. *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 1989, **5**(3):303—314

COMPOSITE ADAPTIVE CONTROL OF SPACE MANIPULATOR SYSTEM WITH PRISMATIC JOINT

CHEN Li

(*Department of Mechanical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002*)

Abstract

In this paper, the control problem of free-floating space manipulator system with prismatic joint was studied. It is shown that the Jacobian matrix and the dynamic equations of the system could not easily be linearly parameterized, if we deduced it by use of the conservation relationship of the momentum and the angular momentum of the system. With the augmentation approach, we got the augmented generalized Jacobi matrix and the dynamic equation of the system that could be linearly dependent on a group of inertial parameters. Based on the results, the composite adaptive control scheme for free-floating space manipulator system with prismatic joint and unknown inertial parameters to track the desired trajectory in inertia space is proposed. The advantages of the control scheme proposed are that it needs not to measure the position, velocity and acceleration of the base. A two-link planar space manipulator system is simulated to verify the proposed control scheme.

Key words Space manipulator system with prismatic joint, Augmentation approach, Composite adaptive control

书讯

《中国现代科学全书·空间科学》分卷的《空间生物学》是我国第一本系统、全面介绍空间生物学的书籍。该书系统地、全面地介绍了空间生物学和空间生物技术领域的国内外发展情况,以及近年来利用分子生物学、细胞生物学和分子遗传学等新进展所取得的成果,内容涉及生物结构的各个层次:分子、细胞、器官、个体和种群。

该书分为四个部分,分别介绍了植物、微生物、水生生物、动物和人体在空间条件下的效应,空间放射生物学,受控生态生命支持系统,地外生物学与生命起源问题,空间生物技术及其流体力学基础,以及空间生物学实验的机会和仪器设备条件。

该书为从事生物科学、空间科学技术等专业人员,对于人类航天活动和开发太空资源感兴趣,以及希望了解在地球之外是否有生物的广大读者,提供了很好的参考读物。该书由青岛出版社出版,定价为34.00元,购买者与《空间科学学报》编辑部联系。编辑部地址:北京 8701 信箱,邮编 100080,电话: 010-62582788, email: cjss@center.cssar.ac.cn。