

一类空间机械臂系统的自适应控制与鲁棒控制*

陈 力

(南京航空航天大学理学院·南京, 210016)

刘延柱

(上海交通大学工程力学系·上海, 200030)

吴文龙

(南京航空航天大学理学院·南京, 210016)

摘要: 讨论载体位置与姿态均不受控制的自由浮动空间机械臂系统的控制问题. 基于增广静态反馈控制模型, 提出当载荷参数不确定时空间机械臂追踪惯性空间期望轨迹的自适应和鲁棒控制方法, 通过仿真运算, 证实了方法的有效性.

关键词: 自由浮动空间机械臂系统; 多刚体系统动力学; 自适应控制; 鲁棒控制

Adaptive and Robust Control of Space Manipulator System

Chen Li

(College of Science, Nanjing University of Aeronautics Astronautics·Nanjing, 210016, P. R. China)

Liu Yanzhu

(Department of Engineering, Shanghai Jiaotong University·Shanghai, 200030, P. R. China)

Wu Wenlong

(College of Science, Nanjing University of Aeronautics Astronautics·Nanjing, 210016, P. R. China)

Abstract: In this paper, the adaptive and robust control schemes are proposed for a free-floating space manipulator system, with the augmented state-feedback control model. When the load parameters is unknown, both schemes gurantees a zero Cartesian tracking error. A two-link planar space manipulator system is simulated to verify the both proposed control schemes.

Key words: space manipulator; multibody dynamics; adaptive control; robust control

1 引言(Introduction)

航天技术的发展使机械臂在其中的作用日益重要. 由于载体自由浮动, 位置、姿态控制系统在机械臂操作期间处于关闭状态, 机械臂的运动必然引起载体的耦合运动. 因此空间机械臂的动力学和控制问题远较地面固定机械臂复杂. 关于空间机械臂的动力学与控制的一般性问题可参见 Vafa, Dubovsky 等人的工作^[1,2]. 国内的研究工作涉及空间机械臂的逆动力学问题^[3]. 实际的空间臂系统中常存在一些难以确定的参数, 如所夹持载荷的质量等. 因此它的控制系统必须具有在这些参数波动的条件下仍能使手端稳定地实现期望轨迹的能力. 由于载体自由浮动, 位置和姿态不受控制, 空间机械臂形式上为欠驱动机械臂, 且满足动量和动量矩守恒的动力学约束, 以致系统的控制方程不是惯性参数的线性函数. 因此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在此难以直接应用. Walker^[4]和马保离

等^[5]讨论了载体位置无控, 姿态受控条件下的自适应控制问题. Gu 等^[6]对载体位置和姿态均无控制情形, 提出将手端与铰坐标组成增广变量, 使动力学方程中的惯性参数符合线性规律. 本文对增广变量法作了改进, 引入新的参考角速度变量和增广误差向量, 给出了空间机械臂末端抓手惯性空间期望轨迹跟踪的自适应和鲁棒控制规律, 并利用 Lyapunov 直接方法证明了两种控制规律均能使系统满足渐近稳定性条件. 通过对载体位置与姿态均不受控制且载荷参数不确定的平面二杆空间机械臂系统的应用, 表明提出的控制方法形式更为简洁、计算量更小. 仿真计算结果表明两种控制方法的有效性. 经适当拓展上述控制方法对于一般空间机械臂系统也有意义.

2 系统动力学方程(Dynamic equations of the system)

空间机械臂系统为无根多体系统. 设系统由自由浮动的载体 B_1 , 机械臂 B_2, B_3 和固定于 B_3 端部

* 国家自然科学基金(19332020)及博士点专项科研基金重点资助项目.
本文于 1996 年 7 月 31 日收到. 1998 年 3 月 3 日收到修改稿.

的载荷 P 组成. 如图 1 载体的位置与姿态均不受控制, 建立各分体 $B_i (i = 1, 2, 3)$ 的主轴连体基 $(O_i, e^{(i)})$, $(i = 1, 2, 3)$. 其中 O_1 与 B_1 的质心 C_1 重合, O_2, O_3 分别为联结 B_2 与 B_1, B_3 与 B_2 的圆柱铰的中心. $e_x^{(i)} (i = 2, 3)$ 为机械臂的对称轴. 设 O_2 沿 $e_x^{(1)}$ 与 O_1 的距离为 $l_1, B_i (i = 2, 3)$ 沿 $e_x^{(i)}$ 的长度为 $l_i (i = 2, 3)$. 质心 C_i 沿 $e_x^{(i)}$ 与 O_i 的距离为 $a_i (i = 2, 3)$; 各分体的质量为 $m_i (i = 1, 2, 3)$, 中心惯量张量为 $J_i (i = 1, 2)$, 载荷 P 的质量 m_p 为不确定参数, 末杆与载荷组合体的质量为 $(m_3 + m_p)$, 中心惯量张量为 J_3 .

以航天器-机械臂系统的总质心 O 点作为原点建立平动坐标系 $(O-XYZ)$. 忽略微弱的重力梯度, $(O-XYZ)$ 为惯性参考系. 设各分体沿 (X, Y) 平面作平面运动, $e_z^{(i)}$ 与 Z 轴保持平行. 载体以与载体质心

$$D(q) = \alpha^T \cdot m \cdot \alpha + \beta^T \cdot J \cdot \beta, C(q, \dot{q}) = \alpha^T \cdot m \cdot u, \quad (3)$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} e_x & e_y & 0 & 0 & 0 \\ e_x & e_y & l_2 e_y^{(2)} + a_2 e_y^{(2)} & a_2 e_y^{(2)} & 0 \\ e_x & e_y & l_1 e_y^{(1)} + l_2 e_y^{(2)} + a_3 e_y^{(3)} & l_2 e_y^{(2)} + a_3 e_y^{(3)} & a_3 e_y^{(3)} \end{bmatrix},$$

$$m = \text{diag}[m_1 \quad m_2 \quad m_3 + m_p], \quad J = \text{diag}[J_1 \quad J_2 \quad J_3],$$

$$\beta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e_z & e_z & 0 \\ 0 & 0 & e_z & e_z & e_z \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_1^2 l_1 e_x^{(1)} + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 a_2 e_x^{(2)} \\ \dot{\theta}_1^2 l_1 e_x^{(1)} + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 l_2 e_x^{(2)} + (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 a_3 e_x^{(3)} \end{bmatrix}.$$

为便于分析, 将方程(2)作准线性化处理, 写作:

$$D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})\dot{q} = (0^T \quad \tau^T)^T. \quad (4)$$

其中 $h(q, \dot{q})$ 为 5×5 矩阵, 其元素 h_{ij} 为

$$h_{ij} = \sum_{k=1}^5 \frac{1}{2} \left(\frac{\partial D_{ij}}{\partial q_k} + \frac{\partial D_{ik}}{\partial q_j} - \frac{\partial D_{kj}}{\partial q_i} \right) \dot{q}_k. \quad (5)$$

且对任意变量 $z \in \mathbb{R}^5$ 有如下关系式存在^[8]:

$$z^T h z = \frac{1}{2} z^T \dot{D} z. \quad (6)$$

将对称的质量矩阵 D 写作分块形式

$$D = \begin{bmatrix} D_{bb} & D_{br} \\ D_{rb} & D_{rr} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Y 相对 q 的 Jacobi 矩阵为

$$J = \partial Y / \partial q = (J_b \quad J_r). \quad (10)$$

其中 $J_b = \partial Y / \partial q_b, J_r = \partial Y / \partial q_r$ 分别为 2×3 和 2×2 子矩阵.

C_1 重合的虚铰 O_1 与 $(O-XYZ)$ 联结. O_1 可视为沿 X 轴和 Y 轴的两个滑移铰和绕 $e_z^{(1)}$ 轴的转动铰三个虚铰的组合.

带机械臂航天器的动力学方程可利用多刚体系系统动力学的任何一种建模方法导出, 例如可利用 Roberson-Wittenburg 方法^[7]. 将载体质心坐标 x_c, y_c 和相对 Y 轴的转角 θ_1 以及各杆的相对转角 θ_2, θ_3 构成广义坐标 q :

$$q = [q_b^T, q_r^T]^T, \quad q_b = [x_c, y_c, \theta_1]^T, \quad q_r = [\theta_2, \theta_3]^T. \quad (1)$$

列出系统的动力学方程:

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

其中 $D(q)$ 为 5×5 质量矩阵, $C(q, \dot{q})$ 为包含哥氏力、离心力的 5 阶列向量, $\tau = (\tau_2 \quad \tau_3)^T$ 为 O_2, O_3 铰的控制力矩 τ_2, τ_3 组成的 2 阶列向量:

其中 D_{bb} 和 D_{rr} 为 3×3 和 2×2 对称子矩阵, $D_{br} = D_{rb}^T$ 为 3×2 子矩阵, 则方程(4)分解为

$$\begin{aligned} (D_{bb} \quad D_{br})\ddot{q} + (I \quad 0)h\dot{q} &= 0, \\ (D_{rb} \quad D_{rr})\ddot{q} + (0 \quad I)h\dot{q} &= \tau. \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式中的第一式积分表示自由浮动空间机械臂系统的动量和动量矩守恒关系.

3 增广变量 (Augmented vector)

机械臂控制系统要求与机械臂抓手固定的载荷实现沿惯性空间预期轨迹的运动, 载荷质心相对惯性参考系的坐标 $Y = (x_p, y_p)^T$ 可表示为广义坐标 q 的函数:

$$Y = \begin{bmatrix} x_c + l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ y_c + l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

为保证系统动力学方程中的动力学参数以线性式出现, 将 Y 代替铰坐标 q_r , 使 q_b 与 Y 构成新的增广变量 $X = [q_b^T \quad Y^T]^T$. 可导出增广速度 \dot{X} 与广义速度 \dot{q} 之间的关系:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ J_b & J_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_b \\ \dot{q}_r \end{bmatrix} = J_a \dot{q}. \quad (11)$$

其中 I 为 3 阶单位阵, 若 J_r 非奇异, 则矩阵 J_a 可逆, 且

$$J_a^{-1} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -J_r^{-1}J_b & J_r^{-1} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

则从方程(11)解出

$$\dot{q} = J_a^{-1} \dot{X}. \quad (13)$$

设 $X_D = [q_b^T \ Y_D^T]^T$, 其中 Y_D 为载荷的期望运动轨迹, $e_1 = Y_D - Y$ 为实际轨迹与期望轨迹之间的误差, 则 X 与 X_D 之间的增广输出误差 e 为

$$e = X_D - X = [0^T \ Y_D^T - Y^T]^T = [0^T \ e_1^T]^T. \quad (14)$$

利用实测的输出误差 e 计算系统的参考铰速度 \dot{q} :

$$\dot{q} = J_a^{-1} [\dot{X}_D + K_1 e] = [\dot{q}_b^T \ \dot{q}_r^T]^T. \quad (15)$$

其中 K_1 为任意的对称正定常值矩阵. 将实际铰速度 \dot{q} 与参考铰速度 \dot{q} 之差记作 \dot{S} :

$$\begin{cases} \dot{S} = \dot{q} - \dot{q} = (0^T \ \dot{S}_1^T)^T, \ \dot{S}_1 = \dot{q}_r - \dot{q}_r, \\ \dot{q}_r = (-J_r^{-1}J_b \ J_r^{-1})(\dot{X}_D + K_1 e). \end{cases} \quad (16)$$

将式(13), (14), (15)代入式(16), 导出

$$\dot{e} + K_1 e = J_a \dot{S}. \quad (17)$$

将式(15)对时间 t 求导, 得到

$$\ddot{q} = J_a^{-1} (\ddot{X}_D + K_1 \dot{e} - \dot{J}_a \dot{q}) = (\ddot{q}_b^T \ \ddot{q}_r^T)^T. \quad (18)$$

其中 $\ddot{q}_r = (-J_r^{-1}J_b \ J_r^{-1})(\ddot{X}_D + K_1 \dot{e} - \dot{J}_a \dot{q})$. 利用式(16)将动力学方程(4)化作

$$D\ddot{S} + h\dot{S} = D\ddot{\eta} + h\dot{\eta} - (0^T \ \tau^T)^T. \quad (19)$$

4 自适应控制设计 (Adaptive control)

设计如下控制规律

$$(0^T \ \tau^T)^T = \hat{D}\ddot{\eta} + \hat{h}\dot{\eta} + [\delta^T \ (K_2\dot{S}_1)^T]^T. \quad (20)$$

其中 \hat{D}, \hat{h} 为参考模型中相应的 D, h 矩阵, K_2 为任意的对称正定常值矩阵. 方程(20)可分解为两部分

$$\begin{aligned} 0 &= (\hat{D}_{bb} \ \hat{D}_{br})\ddot{\eta} + (\hat{h}_{bb} \ \hat{h}_{br})\dot{\eta} + \delta, \\ \tau &= (\hat{D}_{rb} \ \hat{D}_{rr})\ddot{\eta} + (\hat{h}_{rb} \ \hat{h}_{rr})\dot{\eta} + K_2\dot{S}_1. \end{aligned} \quad (21)$$

向量 δ 的作用在于使(21)中第一式得到满足. 将式(20)确定的控制力矩代入方程(19), 得到

$$D\ddot{S} + h\dot{S} + (\delta^T \ (K_2\dot{S}_1)^T)^T = W\Phi. \quad (22)$$

矩阵 $W\Phi$ 定义为

$$W\Phi = (D - \hat{D})\ddot{\eta} + (h - \hat{h})\dot{\eta}. \quad (23)$$

其中 $\Phi = \xi - \hat{\xi}$, ξ 为真实模型中从 D, h 分离出的待

估计参数值, $\hat{\xi}$ 为参考模型中从 \hat{D}, \hat{h} 分离出的可调的参数值, W 为 $q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{\eta}$ 的不含待估计参数的函数矩阵.

设计如下参数调节规律

$$\dot{\Phi} = -\gamma W^T \dot{S}. \quad (24)$$

其中 γ 为正常数.

定理 1 控制规律(20)和参数调节规律(24)可保证

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

证 设 $e = 0, \dot{S} = 0$ 为无扰运动, (17), (22), (24)为受扰运动方程, 选择如下正定函数作为 Lyapunov 函数 V :

$$V = \frac{1}{2}(e^T e + \gamma \dot{S}^T D \dot{S} + \Phi^T \Phi). \quad (25)$$

计算 V 的通过动力学方程构成的全导数 \dot{V} , 利用方程(17), (22), (24)和关系式(6)化作

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T \dot{e} + \gamma \dot{S}^T [D\ddot{S} + \frac{1}{2}\dot{D}\dot{S}] + \Phi^T \dot{\Phi} = \\ &= e^T K_1 e + e^T J_a \dot{S} - \gamma \dot{S}^T K \dot{S}. \end{aligned} \quad (26)$$

其中 $K = \text{diag}(I \ K_2)$, 显然 \dot{V} 为 e, \dot{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 $e = 0, \dot{S} = 0$.

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, \dot{S} 亦有界, 从而 $\dot{q}, \dot{\eta}, \dot{e}$ 有界, Φ 也有界. 由(22)可知 \ddot{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(26)式可知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e \rightarrow 0, \dot{S} \rightarrow 0$. 最终由式(17)导出

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e} = 0. \quad \text{证毕}$$

因此, 控制规律(20)、(24)可保证机械臂末端的载荷渐近稳定地追踪由 Y_D 所描写的期望轨迹.

5 鲁棒控制设计 (Robust control)

载荷参数有时并非完全不确定, 若参数的实际值与估计值之间的误差范围可以预先估计,

$$|\xi_i - \hat{\xi}_i| \leq c_i. \quad (27)$$

其中 $\xi_i, \hat{\xi}_i$ 分别为载荷的真实值及估计值, c_i 为正常数. 对于这种情况只要使控制器对参数的不确定性具有鲁棒性, 就能使机械臂手端载荷稳定地追踪期望轨迹. 从而简化控制器的结构, 更便于实时控制.

为此, 设计如下控制规律:

$$(0^T \ \tau^T)^T = \hat{D}\ddot{\eta} + \hat{h}\dot{\eta} + [\delta^T \ (K_2\dot{S}_1)^T]^T +$$

$$[\mathbf{0}^T \quad (\mathbf{K}_3 \text{sgn}(\dot{\mathbf{S}}_1))^T]^T. \quad (28)$$

其中 $\hat{\mathbf{D}}, \hat{\mathbf{h}}$ 中的载荷参数值为常估计值, \mathbf{K}_2 为任意的对称正定常值矩阵, $\mathbf{K}_3 \text{sgn}(\dot{\mathbf{S}}_1)$ 为 2 阶列向量, 其元素 $\mathbf{K}_3 \text{sgn}(\dot{S}_{1i})$ 中的 \mathbf{K}_{3i} 为待定系数. 方程(28)也可分解为两部分:

$$\mathbf{0} = (\hat{\mathbf{D}}_{bb} \quad \hat{\mathbf{D}}_{br}) \ddot{\boldsymbol{\eta}} + (\hat{\mathbf{h}}_{bb} \quad \hat{\mathbf{h}}_{br}) \dot{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{\delta}, \quad (29a)$$

$$\boldsymbol{\tau} = (\hat{\mathbf{D}}_{rb} \quad \hat{\mathbf{D}}_{rr}) \ddot{\boldsymbol{\eta}} + (\hat{\mathbf{h}}_{rb} \quad \hat{\mathbf{h}}_{rr}) \dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{K}_2 \dot{\mathbf{S}}_1 + \mathbf{K}_3 \text{sgn}(\dot{\mathbf{S}}_1). \quad (29b)$$

其中向量 $\boldsymbol{\delta}$ 的作用在于令(29a)成为恒等式.

将式(28)确定的控制力矩代入动力学方程(19)式, 得到

$$\mathbf{D}\ddot{\mathbf{S}} + \mathbf{h}\dot{\mathbf{S}} + [\boldsymbol{\delta}^T \quad (\mathbf{K}_2 \dot{\mathbf{S}}_1)^T]^T + [\mathbf{0}^T \quad (\mathbf{K}_3 \text{sgn}(\dot{\mathbf{S}}_1))^T]^T = \mathbf{W}\boldsymbol{\Phi}. \quad (30)$$

其中 $\mathbf{W}\boldsymbol{\Phi}$ 的定义同(23)式. 由(27)式导出:

$$|\Phi_i| = |\xi_i - \hat{\xi}_i| \leq c_i, \quad (i = 1, 2, 3). \quad (31)$$

定理 2 控制规律(28)可保证,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e} = \mathbf{0}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{0}.$$

证 取如下正定函数作为准 Lyapunov 函数 V

$$V = \frac{1}{2} (\mathbf{e}^T \mathbf{e} + \gamma \dot{\mathbf{S}}^T \mathbf{D} \dot{\mathbf{S}}). \quad (32)$$

计算 V 的通过动力学方程构成的全导数 \dot{V} , 利用方程(17), (30)和关系式(6), 化作

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \mathbf{e}^T \dot{\mathbf{e}} + \gamma \dot{\mathbf{S}}^T (\mathbf{D}\ddot{\mathbf{S}} + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{D}}\dot{\mathbf{S}}) = \\ & - \mathbf{e}^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{J}_a \dot{\mathbf{S}} - \gamma \dot{\mathbf{S}}^T \mathbf{K} \dot{\mathbf{S}} + \\ & \gamma \dot{\mathbf{S}}^T [\mathbf{W}\boldsymbol{\Phi} - (\mathbf{0}^T \quad (\mathbf{K}_3 \text{sgn}(\dot{\mathbf{S}}_1))^T)^T]. \end{aligned}$$

其中 $\mathbf{K} = \text{diag}(\mathbf{I} \mathbf{K}_2)$, 式中前三项为 $\mathbf{e}, \dot{\mathbf{S}}$ 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. 将上式中最后一项写作

$$\begin{aligned} & \gamma \dot{\mathbf{S}}^T [\mathbf{W}\boldsymbol{\Phi} - (\mathbf{0}^T \quad (\mathbf{K}_3 \text{sgn}(\dot{\mathbf{S}}_1))^T)^T] = \\ & \gamma (\mathbf{0}^T \quad \dot{\mathbf{S}}_1^T) [\mathbf{0}^T \quad (\sum_{j=1}^3 \mathbf{W}_{4j} \Phi_j - \mathbf{K}_{31} \text{sgn}(\dot{S}_{11})) \\ & \quad (\sum_{j=1}^3 \mathbf{W}_{5j} \Phi_j - \mathbf{K}_{32} \text{sgn}(\dot{S}_{12}))]^T. \quad (33) \end{aligned}$$

将参数 $\mathbf{K}_{31}, \mathbf{K}_{32}$ 选择为:

$$\mathbf{K}_{31} = \sum_{j=1}^3 |W_{4j}| c_j + \mu_1, \quad (34)$$

$$\mathbf{K}_{32} = \sum_{j=1}^3 |W_{5j}| c_j + \mu_2.$$

其中 μ_1, μ_2 为正数, W_{ij} 为矩阵 \mathbf{W} 的元素. 得到:

$$\begin{aligned} & \gamma \dot{\mathbf{S}}^T [\mathbf{W}\boldsymbol{\Phi} - (\mathbf{0}^T \quad (\mathbf{K}_3 \text{sgn}(\dot{\mathbf{S}}_1))^T)^T] \leq \\ & - \gamma \sum_{i=1}^2 \mu_i |\dot{S}_{1i}| \leq 0. \quad (35) \end{aligned}$$

可知当 γ 足够大, 且按式(34)选取 $\mathbf{K}_{31}, \mathbf{K}_{32}$ 时, \dot{V} 为负定的. 同前面一样, 可证无扰运动 $\mathbf{e} = \mathbf{0}, \dot{\mathbf{S}} = \mathbf{0}$ 为渐近稳定. 由式(17)最终导出

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e} = \mathbf{0}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{0}. \quad \text{证毕}$$

6 仿真算例 (Simulation study)

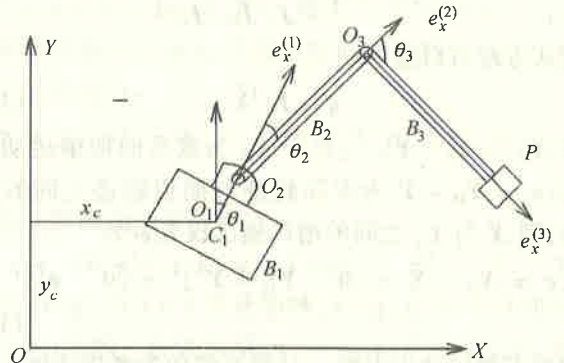


图 1 平面两杆自由浮动空间机械臂系统
Fig. 1 A planar two-link free-floating space manipulator system

以图 1 所示作平面运动的空间机械臂为例. 已知, $l_1 = 1.5\text{m}, l_2 = l_3 = 3\text{m}$, 各分体质量为 $m_1 = 40\text{kg}, m_2 = 2\text{kg}, m_3 = 1\text{kg}$, 设载荷质量 m_p 为不确定参数, 则机械臂系统待估计的参数向量为

$$\boldsymbol{\xi} = ((m_3 + m_p) (m_3 + m_p) a_3 \quad \mathbf{I})^T. \quad (36)$$

其中 a_3 为末杆与载荷组成的分体的总质心至 O_3 的距离, \mathbf{I} 为此分体相对 O_3 的惯量矩.

设空间机械臂手端在惯性工作空间的期望轨迹为圆:

$$\begin{aligned} x_D &= 4.2 - 0.6 \cos(1.5t), \\ y_D &= 4.0 + 0.6 \sin(1.5t). \end{aligned} \quad (37)$$

初始追踪误差为 0.05m, 分别利用上面给出的两种控制规律进行仿真运算.

a) 自适应控制仿真.

载荷实际参数值为 $m_p = 2\text{kg}, \boldsymbol{\xi} = (3 \quad 7.5 \quad 21)^T$. 仿真时载荷质量 m_p 未知, 并假定 $\hat{\boldsymbol{\xi}}$ 中各分量的初始估计值均为 1. 图 2 为采用控制规律(20) 和参数调节规律(24) 得到的手端实际轨迹与期望轨迹的比较.

载荷实际参数值为 $m_p = 4\text{kg}, \boldsymbol{\xi} = (5 \quad 13.5 \quad 39)^T$ 仿真时的估计值为 $\hat{m}_p = 3.5\text{kg}, \hat{\boldsymbol{\xi}} = (4.5 \quad 12 \quad 38)^T$. 且已知参数的实际值与估计值之间的误差范围为 $c_1 = 1, c_2 = 2, c_3 = 2$. 图 3 为采用鲁棒控制规律(28)和(34)得到的手端实际轨迹与期望轨迹的比较.

b) 鲁棒控制仿真.

仿真结果表明, 文中提出的两种控制方法的有效性.

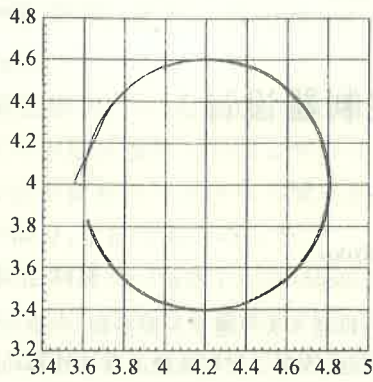


图 2 手端实际轨迹与期望轨迹

Fig. 2 The actual trajectory and desired trajectory of space manipulator

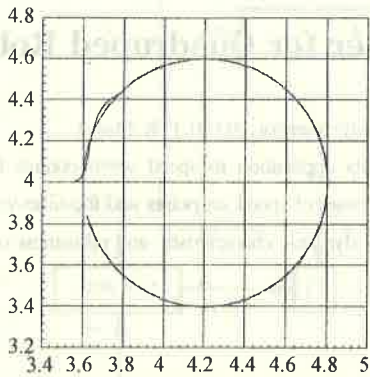


图 3 手端实际轨迹与期望轨迹

Fig. 3 The actual trajectory and desired trajectory of space manipulator

参考文献 (References)

1 Papadopoulos E G and Dubwsky S. On the nature of control algorithms for free-floating space manipulators. IEEE Trans. Robotics and Automa-

tion, 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. the Astronautical Science, 1990, 38(4): 441 - 472

3 刘延柱, 顾晓勤. 空间机械臂逆动力学的 Lyapunov 方法. 力学学报, 1996, 28(6): 558 - 563

4 Michael W Walker. Adaptive control of space-based robot manipulators. IEEE Trans. Robotics and Automation, 1992, 7(6): 828 - 835

5 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

6 Gu Y L and Xu Y S. A normal form augmentation approach to adaptive control of space robot systems. J. Dynamics and Control, 1995, (5): 275 - 294

7 刘延柱, 洪嘉振, 杨海兴. 多刚体系统动力学. 北京: 高等教育出版社, 1989

8 Slotin J E and Li W P. On the adaptive control of robot manipulators. J. 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系力学专业, 1994 年获东北大学一般力学硕士学位, 1997 年获上海交通大学一般力学博士学位. 现在南京航空航天大学理学院工作. 主要研究兴趣为多体系统动力学, 机器人动力学与控制, 非线性振动及振动控制.

刘延柱 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. 主要研究领域为陀螺力学, 多体动力学, 航天器姿态动力学和运动生物力学. 主要著作有《陀螺力学》, 《多刚体系统动力学》, 《航天器姿态动力学》等.

吴文龙 1940 年生. 1963 年毕业于东南大学. 现为南京航空航天大学理学院院长, 教授. 主要研究兴趣为多体系统动力学, 机器人动力学与控制, 振动理论与应用.

