

滑移铰空间机器人基于分级 Lyapunov 方法的避障碍非完整运动规划^{*}

郭益深 陈 力

(福州大学机械工程学院 福州 350002)

摘 要 基于分级 Lyapunov 方法, 讨论了载体姿态与位置均不受控制的滑移铰空间机器人末端运动轨迹的避障碍运动学规划问题. 首先以系统动量矩守恒关系及运动 Jacobi 关系为基础, 建立了控制设计所需的系统状态方程及控制输出方程. 此后, 在 Lyapunov 函数的选取上采取分两级采取的方式, 即初级 Lyapunov 函数确保滑移铰空间机器人的末端抓手从初始位置运动到指定的终点位置, 次级 Lyapunov 函数则确保末端抓手避开工作空间中的障碍区域; 两级合成则使空间机器人的末端抓手既实现了指定的位置移动又避开了障碍区域. 系统数值仿真, 证明了方法的有效性.

关键词 滑移铰空间机器人; 分级 Lyapunov 方法; 避障碍运动规划

中图分类号 V 42

Nonholonomic Motion Planning of Space Robots with Prismatic Joint for Obstacle Avoidance via Hierarchical Lyapunov Methods

GUO Yishen CHEN Li

(College of Mechanical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002)

Abstract Based on hierarchical Lyapunov methods, the motion planning of free-flying space robots with prismatic joint for obstacle avoidance is discussed. First, with the momentum conservation and the Jacobian matrix, the system state equations and the control output equations for control design are established. And then the primary and secondary Lyapunov functions are selected. The primary function insures the movement of the endeffector from the start point to the end point. The secondary ascertains obstacle avoidance of the endeffector. Combined the primary and secondary functions, the endeffector implements the specific movement and realizes obstacle avoidance. A planar space robot with prismatic joint is simulated to verify the proposed methods.

Key words Space robots with prismatic joint, Hierarchical Lyapunov methods, Motion planning for obstacle avoidance

^{*} 国家自然科学基金项目 (10372022) 和福建省自然科学基金项目 (E0410008) 共同资助
2004-08-23 收到原稿, 2005-01-10 收到修定稿

1 引言

作为未来空间活动的重要工具, 空间机器人的研究已受到国内外的广泛重视^{[1]~[8]}, 并已在国际空间站上得到实际应用. 由于空间机器人的载体在空间自由浮动不受限制, 系统满足动量及动量矩守恒的动力学约束. 而动量矩守恒关系的不可积性质, 使得系统表现出非完整动力学特性, 大大增加了系统运动学、动力学分析及控制系统设计的难度, 但也为系统运动学规划提供了可以加以利用的非完整冗余度. 如文献 [9] 利用系统的非完整动力学性质讨论了空间机器人关节运动规划的最优控制问题; 文献 [10] 提出了空间机器人非完整运动规划的双向 Lyapunov 方法; 文献 [11] 则利用系统的非完整冗余度, 给出了空间机器人障碍规避的分级 Lyapunov 方法. 值得注意的是, 上述研究多是针对具有转动铰的空间机器人系统的, 文献 * 的研究表明, 此类空间机器人系统的工作空间中存大量不可预知的动力学奇点, 其存在大大破坏了空间机器人系统的运动学性能. 考虑到滑移铰具有远较转动铰好得多的运动学性能, 应该对滑移铰空间机器人系统加以关注. 本文基于分级 Lyapunov 方法, 讨论了载体姿态与位置均不受控制的滑移铰空间机器人末端运动轨迹的避障碍运动学规划问题. 首先以系统动量矩守恒关系及系统运动 Jacobi 关系为基础, 建立了控制系统设计所需的状态方程及控制输出方程. 此后, 在 Lyapunov 函数的选取上我们采取分两级采取的方式, 即: 初级 Lyapunov 函数确保空间机器人的末端抓手从初始位置运动到指定的终点位置, 而次级 Lyapunov 函数则确保末端抓手避开工作空间中的障碍区域; 两级合成的最终结果则使滑移铰空间机器人的末端抓手既实现了指定的位置移动又避开了障碍区域. 其优点在于不需要控制空间机器人的载体姿态, 从而减少了载体姿态控制燃料的消耗, 大大延长了空间机器人的有效使用寿命. 系统数值仿真, 证明了方法的有效性.

2 系统运动学和动力学

如图 1 所示, 考虑作平面运动的滑移铰两杆空间机器人系统. 设系统由自由漂浮的载体 B_0 及机

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 $(O_i - e_x^{(i)} e_y^{(i)})$, 其中 O_0 与 B_0 的质心 O_{c0} 重合, O_1 为联结 B_0 和 B_1 的转动铰中心, O_2 为联结 B_1 和 B_2 的滑移铰中心, $e_x^{(i)} (i = 0, 1, 2)$ 为机械臂的对称轴. 设 O_1 在 $O_0 e_x^{(0)}$ 轴上与 O_0 的距离为 l_0 , B_1 沿 $e_x^{(1)}$ 轴的长度为 l_1 , B_2 沿 $e_x^{(2)}$ 轴的长度为 l_2 ; B_1 质心 O_{c1} 在 $O_1 e_x^{(1)}$ 轴上与 O_1 的距离为 d_1 , B_2 末端在 $O_2 e_x^{(2)}$ 轴上与 O_2 的距离为变量 x' ; 各分体的质量和中心惯量张量分别为 m_i 和 $J_i (i = 0, 1, 2)$.

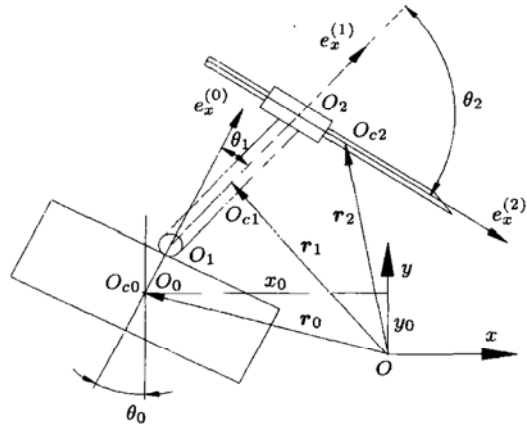


图 1 带滑移铰空间机器人系统

Fig.1 Space robot systems with prismatic joint

建立平动的惯性坐标系 $(O-xy)$, 设各分体沿 (x, y) 平面作平面运动, 各分体质心 O_{ci} 相对 O 的矢径为 $r_i (i = 0, 1, 2)$. 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 $(O-xy)$ 的动量守恒及相对 O 点的动量矩守恒关系. 不失一般性, 设系统的初始动量及动量矩均为零. 由系统总质心定义及系统动量守恒关系, 存在

$$\sum_{i=0}^2 m_i r_i = 0, \quad \sum_{i=0}^2 m_i \dot{r}_i = 0. \quad (1)$$

由系统动量矩守恒关系, 有

$$\sum_{i=0}^2 (J_i \omega_i + m_i r_i \times \dot{r}_i) = 0, \quad (2)$$

其中, $\omega_i (i = 0, 1, 2)$ 为第 i 个物体的绝对角速度.

*Yoshihiko Nakamura. Kinematic studies on the trajectory control of robotic manipulators. Ph.D thesis, Automation Research Laboratory, Kyoto University, 1985

由 (1) 式和 (2) 式, 可得

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} -P_1 M_1/M_0 + P_2 & -P_1 M_2/M_0 + P_3 \\ -P_4 M_1/M_0 + P_5 & -P_4 M_2/M_0 + P_6 \\ -M_1/M_0 & -M_2/M_0 \end{bmatrix} \dot{\theta} = H \dot{\theta}. \quad (3)$$

其中, $\dot{\theta} = (\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{\theta}_0)^T$ 为载体的线速度和角速度变量, $\theta = (\theta_1, \dot{x}')^T$; 而

$$\begin{aligned} M_0 &= J_0 + J_1 + J_2 + (m_0 R_{01} + m_1 R_{11} + m_2 R_{21}) \cdot \\ &\quad [N_0 \cos(\theta_0) + N_1 \cos(\theta_0 + \theta_1) + \\ &\quad N_2 z \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2)] + \\ &\quad (m_0 R_{02} + m_1 R_{12} + m_2 R_{22}) [-N_0 \sin(\theta_0) - \\ &\quad N_1 \sin(\theta_0 + \theta_1) - N_2 z \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2)] + \\ &\quad m_2 R_{23} + m_1 R_{13}, \\ M_1 &= J_1 + J_2 + (m_0 R_{01} + m_1 R_{11} + m_2 R_{21}) \cdot \\ &\quad [N_1 \cos(\theta_0 + \theta_1) + N_2 z \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2)] + \\ &\quad (m_0 R_{02} + m_1 R_{12} + m_2 R_{22}) [-N_1 \sin(\theta_0 + \theta_1) - \\ &\quad N_2 z \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2)] + m_1 R_{14} + m_2 R_{24}, \\ M_2 &= (m_0 R_{01} + m_1 R_{11} + m_2 R_{21}) N_2 \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) + \\ &\quad (m_0 R_{02} + m_1 R_{12} + m_2 R_{22}) \cdot \\ &\quad N_2 \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) + m_2 R_{25}, \\ P_1 &= N_0 \cos(\theta_0) + N_1 \cos(\theta_0 + \theta_1) + \\ &\quad N_2 z \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2), \\ P_2 &= N_1 \cos(\theta_0 + \theta_1) + N_2 z \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2), \\ P_3 &= N_2 \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2), \\ P_4 &= -N_0 \sin(\theta_0) - N_1 \sin(\theta_0 + \theta_1) - \\ &\quad N_2 z \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2), \\ P_5 &= -N_1 \sin(\theta_0 + \theta_1) - N_2 z \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2), \\ P_6 &= -N_2 z \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2). \end{aligned}$$

且

$$\begin{aligned} z &= x' - l_2/2, \quad R_{01} = -D_0, \quad R_{02} = B_0, \\ R_{11} &= -[D_0 + l_0 \cos(\theta_0) + d_1 \cos(\theta_0 + \theta_1)], \\ R_{12} &= B_0 + l_0 \sin(\theta_0) + d_1 \sin(\theta_0 + \theta_1), \\ R_{13} &= -[B_0 l_0 \sin(\theta_0) + D_0 l_0 \cos(\theta_0) + \\ &\quad l_0^2 + d_1^2 + 2l_0 d_1 \cos(\theta_1) + B_0 d_1 \sin(\theta_0 + \theta_1) + \\ &\quad D_0 d_1 \cos(\theta_0 + \theta_1)], \end{aligned}$$

$$R_{14} = -[d_1^2 + l_0 d_1 \cos(\theta_1) + B_0 d_1 \sin(\theta_0 + \theta_1) + D_0 d_1 \cos(\theta_0 + \theta_1)],$$

$$R_{21} = -[D_0 + l_0 \cos(\theta_0) + l_1 \cos(\theta_0 + \theta_1) + z \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2)],$$

$$R_{22} = B_0 + l_0 \sin(\theta_0) + l_1 \sin(\theta_0 + \theta_1) + z \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2),$$

$$\begin{aligned} R_{23} &= -[B_0 l_0 \sin(\theta_0) + B_0 l_1 \sin(\theta_0 + \theta_1) + \\ &\quad B_0 z \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) + D_0 l_0 \cos(\theta_0) + \\ &\quad D_0 l_1 \cos(\theta_0 + \theta_1) + D_0 z \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) + \\ &\quad l_0^2 + z^2 + l_1^2 + 2l_0 l_1 \cos(\theta_1) + \\ &\quad 2l_0 z \cos(\theta_1 + \theta_2) + 2l_1 z \cos(\theta_2)], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{24} &= -[l_1 B_0 \sin(\theta_0 + \theta_1) + z B_0 \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) + \\ &\quad l_1 D_0 \cos(\theta_0 + \theta_1) + z D_0 \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) + \\ &\quad l_1^2 + z^2 + 2l_1 z \cos(\theta_2) + l_1 l_0 \cos(\theta_0 + \theta_1) + \\ &\quad z l_0 \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2)], \end{aligned}$$

$$R_{25} = B_0 \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) - D_0 \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) - l_0 \sin(\theta_1 + \theta_2) - l_1 \sin(\theta_2),$$

$$N_0 = -(m_1 l_0 + m_2 l_0)/M,$$

$$N_1 = -(m_1 d_1 + m_2 l_1)/M,$$

$$N_2 = -m_2/M,$$

$$M = m_0 + m_1 + m_2,$$

$$B_0 = N_0 \sin(\theta_0) + N_1 \sin(\theta_0 + \theta_1) + N_2 z \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2),$$

$$D_0 = N_0 \cos(\theta_0) + N_1 \cos(\theta_0 + \theta_1) + N_2 z \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2).$$

由矢量式 (3) 的最后一个分式, 有

$$\dot{\theta}_0 = H_0 \dot{\theta}. \quad (4)$$

其中, $H_0 = [-M_1/M_0 \quad -M_2/M_0]$.

设机械臂末端相对 O 的矢径为 r_E , 则

$$r_E = r_0 + l_0 e_x^{(0)} + l_1 e_x^{(1)} + x' e_x^{(2)}, \quad (5)$$

将 (5) 式两端对时间 t 求导, 并向惯性坐标系 x, y 轴投影, 得到

$$\dot{X}_E = (\dot{x}_E, \dot{y}_E)^T = J_1 \dot{\theta} + J_2 \dot{\theta}. \quad (6)$$

其中,

$$\begin{aligned} J_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & l_0 \cos(\theta_0) + l_1 \cos(\theta_0 + \theta_1) + x' \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 1 & -l_0 \sin(\theta_0) - l_1 \sin(\theta_0 + \theta_1) - x' \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}, \\ J_2 &= \begin{bmatrix} l_1 \cos(\theta_0 + \theta_1) + x' \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) & \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) \\ -l_1 \sin(\theta_0 + \theta_1) - x' \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

最终将 (3) 式代入 (6) 式, 则有

$$\dot{X}_E = (J_1 H + J_2) \dot{\theta} = \tilde{J} \dot{\theta}, \quad (7)$$

其中, $\tilde{J} = J_1 H + J_2$.

3 基于分级 Lyapunov 方法的避障碍运动规划

3.1 初级 Lyapunov 函数

定义机械臂的关节速度 $\dot{\theta}_1$ 、 $\dot{x}'$ 为系统的控制输入变量, 记为 u ; 同时定义 θ_0 、 θ_1 、 x' 为系统状态变量, 并记为 X ; 即

$$u = \dot{\theta}, \quad X = (\theta_0 \ \theta_1 \ x')^T.$$

则由 (4) 式, 系统状态方程可写为

$$\dot{X} = Gu, \quad (8)$$

其中,

$$G = \begin{bmatrix} H_0 \\ E_{2 \times 2} \end{bmatrix} \in R^{3 \times 2},$$

$E_{2 \times 2}$ 为 2×2 单位阵.

同样, (7) 式亦可写为

$$\dot{X}_E = \tilde{J} u. \quad (9)$$

定义正定函数 v_{10} 为初级 Lyapunov 函数,

$$v_{10} = \Delta h^T A \Delta h / 2. \quad (10)$$

其中, $\Delta h = X_d - X_E$, X_d 为空间机器人末端抓手的期望轨迹, A 为正定常值矩阵.

计算 v 对时间 t 的全导数, 并利用 (9) 式, 有

$$\begin{aligned} \dot{v}_{10} &= \Delta h^T A \dot{\Delta h} = -\alpha^T u, \\ \alpha &= (A \tilde{J})^T \Delta h. \end{aligned} \quad (11)$$

显然, 如将系统的控制输入定义为

$$u = u_1 = \alpha, \quad (12)$$

则有

$$\dot{v}_{10} = -\alpha^T \alpha.$$

显然, $\dot{v}_{10}$ 恒为负定的, 当且仅当 $\Delta h = 0$ 时, $\dot{v}_{10} = 0$; 此时, $v_{10} = 0$. 则根据 Lyapunov 定理,

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 必有 $\Delta h \rightarrow 0$, 即滑移铰空间机器人的末端抓手在一段时间后将由初始位置移动到终点位置.

3.2 次级 Lyapunov 函数

假设空间机器人的工作空间中有一个半径为 r 的圆形障碍区域, 并设其中心在 $(x_0, y_0)^T$ 处, 则其数学表达式可写为

$$g(x, y) = \left(\frac{x - x_0}{r} \right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{r} \right)^2 - 1 = 0. \quad (13)$$

设 $X_G = (x_g, y_g)^T$ 为空间机器人末端抓手在上述圆形障碍区域外的位置坐标, 显然 $g(x_g, y_g)$ 给出了空间机器人末端抓手与圆形障碍区域边界间的距离尺度, 且有 $g(x_g, y_g)$ 恒大于 0. 因此, 定义如下正定函数 v_{20} 为次级 Lyapunov 函数,

$$v_{20} = 1/g(x_g, y_g). \quad (14)$$

计算 v_{20} 对时间 t 的全导数, 有

$$\dot{v}_{20} = - \left\{ \frac{2}{[g(x_g, y_g)]^2 r^2} \right\} [(x_g - x_0)(y_g - y_0)] \dot{X}_G. \quad (15)$$

由于定义 X_G 为空间机器人末端抓手在上述圆形障碍区域外的位置坐标, 则有 $X_G = X_E$; 由 (7) 和 (9) 式, 又有

$$\dot{X}_G = \tilde{J} \dot{\theta} = \tilde{J} u, \quad (16)$$

显然, 若将系统的控制输入选为

$$\begin{aligned} u &= u_2 \\ &= \left\{ \frac{2}{[g(x_g, y_g)]^2 r^2} \right\} \tilde{J}^T [(x_g - x_0)(y_g - y_0)]^T. \end{aligned} \quad (17)$$

则由 (16)、(17) 和 (15) 式, 最终可得

$$\dot{v}_{20} = -u_2^T u_2.$$

显然, 只要 $\tilde{J}$ 非奇异, 则上式恒为负定函数. 因此, (14) 式作为次级 Lyapunov 函数可行.

3.3 基于分级 Lyapunov 方法的避障碍非完整运动规划

综上所述, 由 2.1 的初级 Lyapunov 函数的选取, 可实现空间机器人末端抓手从初始位置到终点

位置的期望移动; 显然若再结合 2.2 的次级 Lyapunov 函数的选取, 则最终可实现有障碍区域情况下, 空间机器人末端抓手避开障碍从初始位置到终点位置的期望移动.

因此, 遵循上面的思路同前面一样定义机械臂的关节速度 $\dot{\theta}_1$ 、 $\dot{x}'$ 为系统的控制输入变量, 记为 u ; 即: $u = \dot{\theta}$. 同时, 定义空间机器人末端抓手在惯性空间的位置 X_E 为系统的控制输出变量; 并同样有 (9) 式的结果存在. 此外, 初级 Lyapunov 函数 v_{10} 的选取亦如 2.1 部分 (10) 式的定义, 其中相关符号的定义亦相同; 但为了结合次级 Lyapunov 函数, 此时将系统的控制输入选为

$$u = \alpha + (E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) \omega_1, \quad (18)$$

其中, α 的定义同 (11) 式, 而 $\alpha^\#$ 为 α 的伪逆^[12], 并有 $\alpha^\# = \alpha^T / (\alpha^T \alpha)$.

同样, 计算 v_{10} 对时间 t 的全导数, 并利用 (9) 式及 (18) 式, 有

$$\dot{v}_{10} = -\alpha^T u = -\alpha^T \alpha - \alpha^T (E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) \omega_1, \quad (19)$$

其中, ω_1 为待定向量, 并由次级 Lyapunov 函数决定.

由于, $\alpha^T (E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) = (\alpha - \alpha \alpha^\# \alpha)^T = 0$, 则有

$$\dot{v}_{10} = -\alpha^T \alpha, \quad (20)$$

显然, 上式恒小于等于 0, 当且仅当 $\Delta h = 0$ 时, $\dot{v}_{10} = 0$.

同样, 将次级 Lyapunov 函数 v_{20} 选为 2.2 部分 (14) 式形式, 并令

$$p = \left(\frac{2}{(g(x_g, y_g))^{2r_2}} \right) \tilde{J}^T [(x_g - x_0)(y_g - y_0)]^T,$$

则同样存在

$$\dot{v}_{20} = -p^T u. \quad (21)$$

将 (18) 式代入上式, 并令上式右端恒为 $-p^T p$, 即令: $\dot{v}_{20} = -p^T p$; 则恒有下面结果

$$p^T (E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) \omega_1 = p^T (p - \alpha). \quad (22)$$

显然, 除非 $(E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) p = 0$; 否则有

$$\omega_1 = (\tilde{p}^\#)^T p^T (p - \alpha) + (E_{2 \times 2} - \tilde{p} \tilde{p}^\#) \omega_2, \quad (23)$$

其中, $\tilde{p} = (E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) p$; $\tilde{p}^\#$ 为 $\tilde{p}$ 的伪逆, ω_2 则为任意向量.

将 (23) 式代入 (18) 式, 可得

$$u = \alpha + (E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) (\tilde{p}^\#)^T p^T (p - \alpha)$$

$$+ (E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) (E_{2 \times 2} - \tilde{p} \tilde{p}^\#) \omega_2. \quad (24)$$

若, $\tilde{p} \neq 0$; 将 (24) 式代入 (21) 式, 得到

$$\begin{aligned} \dot{v}_{20} &= -p^T \alpha - \frac{p^T (E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) (E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) p}{p^T (E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) (E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) p} \\ &\quad p^T (p - \alpha) - \\ &\quad p^T (E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) (E_{2 \times 2} - \tilde{p} \tilde{p}^\#) \omega_2 \\ &= -p^T \alpha - p^T (p - \alpha) = -p^T p \end{aligned} \quad (25)$$

显然, 若 $\tilde{J}$ 非奇异, 则上式恒是负定的.

由于只用到次级 Lyapunov 函数, 故可设 $\omega_2 = 0$. 则由 (24) 式得到

$$\begin{aligned} u &= \alpha + k (E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) p, \\ k &= \frac{p^T (p - \alpha)}{p^T (E_{2 \times 2} - \alpha \alpha^\#) p}. \end{aligned} \quad (26)$$

显然, (26) 式的控制输入令系统的初级 Lyapunov 函数及次级 Lyapunov 函数的全导数均为负定函数.

因此, 其结果最终则使空间机器人的末端抓手既完成了惯性空间的指定移动 (初级 Lyapunov 函数的结果), 又避开了障碍区域 (次级 Lyapunov 函数的结果).

4 系统数值仿真

为了证实上述分级 Lyapunov 方法对滑移铰空间机器人避障碍非完整运动规划应用的有效性, 利用 (8)、(9) 和 (26) 式进行系统数值仿真.

仿真时, 系统结构如图 1 所示; 并已知系统几何参数为: $l_0 = 0.5 \text{ m}$, $l_1 = 1 \text{ m}$, $l_2 = 1 \text{ m}$, $d_1 = 0.48 \text{ m}$, $\theta_2 = 60^\circ$ (常值); 各分体质量: $m_0 = 30 \text{ kg}$, $m_1 = 1 \text{ kg}$, $m_2 = 1 \text{ kg}$; 中心惯性矩: $J_0 = 2.340 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $J_1 = 0.084 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $J_2 = 0.072 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. 并设滑移铰空间机器人的初始状态为 $(\theta_0 \theta_1 x') = (0.524, 0.174, 0.1)$, 此时末端抓手的相应位置为 $x_E = (0.96, 1.12)$; 而末端抓手的期望移动终止位置则为 $x_E = (1.3, 1.5)$.

4.1 无避障碍措施的末端抓手运动轨迹规划

考虑仅利用初级 Lyapunov 函数进行的滑移铰空间机器人末端抓手运动轨迹规划. 注意, 仿真过程中当 $\tilde{J}$ 接近奇异而同时 Δh 又在 $\tilde{J}$ 的病态域时, 系统输入 u_1 会变得很小. 此时, 为使初级 Lyapunov 函数能够收敛得快一点, 需要在 (26) 式 α 的前面

乘上一个补偿标量 k_1 . 在此, 我们取 $k_1 = 10$. 此外, 当 $u_1^T u_1 \geq 1.0$ 时, k_1 值还要相应地减小, 直到等式满足. 需要指出的是, k_1 值按比例变化只会引起输入角速度的变化, 并不会引起末端抓手运动轨迹的变化. 为了减少仿真运算的耗时, 我们设定仿真结束条件为初级 Lyapunov 函数的 v 值不小于 0.0001. 图 2 为无避障碍措施情况下滑移铰空间机器人末端抓手在惯性空间的运动轨迹; 图 3 为此时滑移铰空间机器人关节及载体姿态的变化情况.

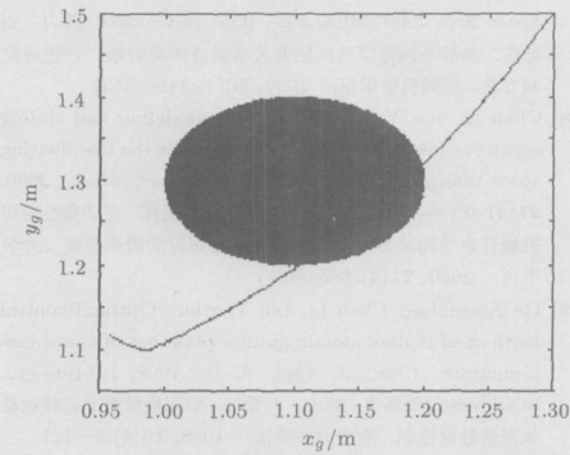


图 2 无避障碍措施情况下末端抓手的运动轨迹
Fig.2 Trajectory of the endeffector without obstacle avoidance measure

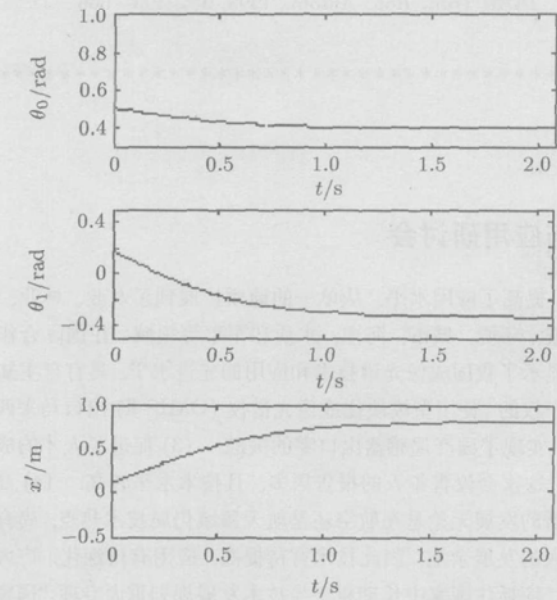


图 3 空间机器人关节、姿态变化情况
Fig.3 Variety of the space robot's joints and gesture

4.2 有避障碍措施的末端抓手运动轨迹规划

考虑综合初级和次级 Lyapunov 函数进行的滑移铰空间机器人末端抓手运动轨迹规划. 为此设在空间机器人惯性工作空间内存在一个圆形障碍区域, 设其半径 r 为 0.1m, 圆心在 $x_0 = 1.1\text{m}$, $y_0 = 1.3\text{m}$ 处. 为了简化计算, 同样将 (26) 式 α 前面乘上的补偿标量 k_1 取为 10. 但是, 当机器人末端抓手接近圆形障碍区域时, (26) 式第二项的值会变得很大. 因此, 为了简化计算, (26) 式中的变量 k 设为常值, 且当第二项的值大于 1.0 时, k 值要相应地

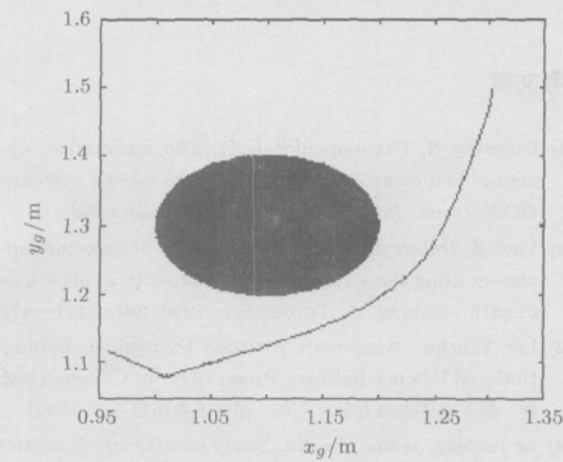


图 4 有避障碍措施情况下末端抓手的运动轨迹
Fig.4 Trajectory of the endeffector with obstacle avoidance measure

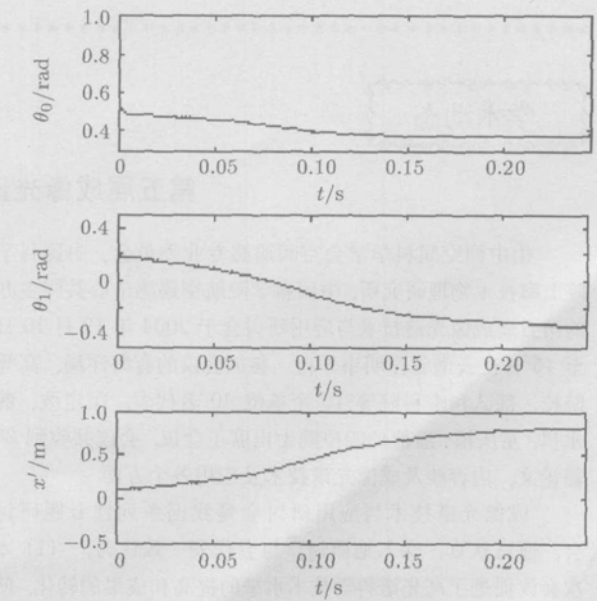


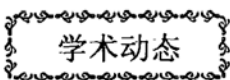
图 5 空间机器人关节、姿态变化情况
Fig.5 Variety of the space robot's joints and gesture

减小,直至其值为 1.0。为了减少仿真运算的耗时,我们设定仿真结束条件为初级 Lyapunov 函数的 v 值不小于 0.0001。图 4 为有避障碍措施情况下,滑移铰空间机器人末端抓手在惯性空间的运动轨迹;图 5 为此时空间机器人关节及载体姿态的变化情况。

由图 2 可见,在无避障碍措施情况下,滑移铰空间机器人末端抓手的运动轨迹穿过了圆形障碍区域;而由图 4 可见,在有避障碍措施情况下,滑移铰空间机器人末端抓手的运动轨迹成功地避开了圆形障碍区域;结果证实了上述非完整运动规划方法在滑移铰空间机器人系统应用中的有效性。

参考文献

- [1] Dubowsky S, Papadopoulos E G. The kinematics, dynamics and control of free-flying space robotic systems. *IEEE Trans. Rob. Autom.*, 1993, 9(5):531—543
- [2] Vava Z, Dubowsky S. On the dynamics of space manipulators using the virtual manipulator, with applications to path planning. *J. Astron. Sci.*, 1990, 38(4):441—472
- [3] Liu Yanzhu. Spacecraft Attitude Dynamics. Beijing: National Defence Industry Press, 1995. in Chinese (刘延柱. 航天器姿态动力学. 北京: 国防工业出版社, 1995)
- [4] Li Junfeng, Wang Zhaolin. Study on attitude dynamics of a liquid-filled spacecraft with manipulators. *J. Astron.*, 1999, (2):81—86. in Chinese (李俊峰, 王照林. 带空间机械臂的充液航天器姿态动力学研究. 宇航学报, 1999, (2):81—86)
- [5] Chen Li. Robust and adaptive composite control of coordinated motion of space-based manipulator system. *Acta Mech. Solida Sinica*, 2003.9, 24(3):327—333. in Chinese (陈力. 空间机械臂载体与末端抓手协调运动的鲁棒与自适应混合控制方案. 固体力学, 2003.9, 24(3):327—333)
- [6] Chen Li, Liu Yanzhu. The adaptive control of coordinated motion of spacecraft attitude and its manipulator. *Cont. Theo. Appl.*, 2002.4, 19(2):274—278. in Chinese (陈力, 刘延柱. 空间机械臂本体与末端抓手协调运动的自适应控制方法. 控制理论与应用, 2002.4, 19(2):274—278)
- [7] Chen Li. 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)
- [8] Chen Li, Liu Yanzhu. Dynamic modeling and sliding control of inertial trajectory tracking for the free-floating space manipulator systems. *Chin. Quar. Mech.*, 2000, 21(4):482—487. in Chinese (陈力, 刘延柱. 浮动基座空间机械臂系统的动力学建模与惯性轨迹跟踪的滑模控制. 力学季刊, 2000, 21(4):482—487)
- [9] Ge Xingsheng, Chen Li, Liu Yanzhu. Optimal control method of nonholonomic motion planning of space manipulators. *Chin. J. Appl. Mech.*, 1998, 15(4):6—12. in Chinese (戈新生, 陈力, 刘延柱. 空间机械臂非完整运动规划的最优控制. 应用力学学报, 1998, 15(4):6—12)
- [10] Nakamura Y, Mukherjee R. Nonholonomic path planning of space robots via a bidirectional approach. *IEEE Tran. Rob. Autom.*, 1991, 7(4):500—514
- [11] Yoshihiko Nakamura and Ranjan Mukherjee. Exploiting nonholonomic redundancy of Free-flying space robots. *IEEE Tran. Rob. Autom.*, 1993, 9(4):499—506



第五届成像光谱技术与应用研讨会

由中国空间科学学会空间遥感专业委员会、中国科学院上海技术物理研究所,中国科学院航空遥感中心共同主办的第五届成像光谱技术与应用研讨会于 2004 年 12 月 10 日至 15 日在云南省昆明市举行。参加会议的有海洋局、高等院校、部队和中科院等 10 个单位 40 名代表,匡定波、薛永祺、童庆禧、潘德炉四位院士出席了会议。会议共收到 30 篇论文,内容涉及成像光谱技术及应用各个方面。

成像光谱技术与应用研讨会是我国系列性专题研讨会,通过认真、深入地研讨,与会代表一致认为, (1) 本次会议促进了高光谱科学技术水平的提高和成果的转化,使整个成像光谱技术与国际同步。 (2) 扩大了应用的深度和广

度,提高了应用水平。从单一的地质扩展到了农业、林业、植被、环境、城市、海洋、水质和军事等领域。在国际合作中显示了我国成像光谱技术和应用的先进水平。具有自主知识产权的“使用型模块化成像光谱仪 (OMIS-II) 出口马来西亚,实现了国产遥感器出口零的突破。 (3) 促进了人才的成长。这次会议青年人的报告居多,且技术水平较高。 (4) 高光谱的发展无论是在航空还是航天领域仍属技术热点,尚有很大的发展余地。因此技术有待提高,应用有待深化。广大同仁应抓住国家中长期科学与技术发展规划重大专项“国家对地观测系统建设”新的发展机遇,使成像光谱技术与应用再上一个台阶。