

动力学奇点在漂浮基双臂空间机器人姿态 无扰运动规划中的应用^{*}

高子坤 陈 力

(福州大学机械系 福州 350002)

摘 要

讨论了载体位置、姿态均不受控制的双臂自由浮动空间机器人的无扰运动规划问题。结合系统的动量及动量矩守恒关系,证明了动力学奇点的存在,并导出了动力学奇点的数学解析求解公式。在此基础上,利用动力学奇点给出了双臂自由浮动空间机器人载体姿态无扰运动路径的规划设计方法。该方法有助于空间环境下遥控机械手辅助航天器对接等任务操作的运动规划。

关键词 漂浮基双臂空间机器人; 动力学奇点; 姿态无扰运动规划

1 引言

利用空间机器人从事未来空间站的日常维护工作可以大大节省费用,而航天技术的迅速发展使空间机器人有了更广泛的应用前景。当空间机器人载体的位置、姿态控制系统处于关闭状态下,空间机器人自由漂浮于空间,系统满足动量及动量矩守恒关系的动力学约束,以致机械臂与载体之间存在强烈的动力学耦合作用,即机器人爪手的任意运动都能引起载体的姿态改变,从而影响载体的某些功能。如太阳能帆板无法正常工作、卫星无线电接收系统无法正常使用等。实际设计中,常采用反应轮或喷气装置来调整载体姿态。由于在空间环境下姿态控制燃料极其宝贵,为了节省燃料以便有效地延长空间机器人系统的使用寿命,有必要使用载体位置、姿态均不受控制的自由浮动空间机器人系统,目前相关的研究已有很多^{[1]~[6]}。如上所述,此类空间机器人系统满足动量及动量矩守恒关系的动力学约束,且由于动量矩守恒关系的不可积性,使系统具有非完整动力学性质,增加了系统运动学、动力学和控制问题研究的难度。但反过来,系统的非完整动力学性质,也为我们在系统运动学规划方面提供了某些便利。如文献[7]利用系统的非完整动力学性质,给出了自由浮动空间机器人载体姿态无扰运动规划的双向法;文献[8]则以利用系统的非完整动力学性质,设计了空间机器人非完整运动规划的最优控制方法;文献[9],[10]提出了动力学奇点的概念,并利用动力学奇点研究了自由浮动单臂空间机器人姿态无扰运动规划问题。本文基于文献[9],[10]的思想,讨论了自由浮动双臂空间机器人抓住物体后的无扰运动规划问题,导出了构成闭环双臂空间机器人系统动力学奇点的解析求解公式,并以此为基础给出了闭环双臂空间机器人载体姿态无扰路径规划的设计方法。在计算机上

^{*} 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
2002-09-26 收到原稿, 2003-05-06 收到修定稿

对上述无扰运动规划算法进行的数值仿真表明, 在双臂空间机器人关节空间任意两个指定位置之间, 总可以找到一条移动路径, 当双臂空间机器人沿着这一路径从其中一个指定位置移动到另一个指定位置时, 对载体的姿态无任何影响.

2 系统动力学模型

设系统由自由漂浮的载体 B_0 、机械臂 B_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 及被抓住的物块 B_c 组成, 如图 1 示. 由于系统处于失重状态, 且无外力及外力矩作用, 系统动量与动量矩保持守恒关系. 设各分体的轴线共面, B_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) 与 B_c 的质心分别为 O_{ic} ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) 和 O_c , 质量分别为 m_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) 和 m_c , 中心惯量张量分别为 I_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) 与 I_c ; O_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) 分别为 4 个转动铰的中心, O_{2e} , O_{4e} 分别为分体 B_2 , B_4 末端的抓铰点. 建立随系统总质心作平动运动的惯性坐标系 Oxy , 各分体的主轴坐标系为 $O_i x_i y_i$ ($i = 0, 1, 2, 3, 4$). 设 (x_0, y_0) 为载体 B_0 在惯性坐标系 Oxy 中的质心坐标, $O_0 x_0$ 相对于惯性坐标系的夹角 θ_0 为其角位移, θ_i ($i = 1, 2, 4$) 为 $O_i x_i$ 相对于 $O_{i-1} x_{i-1}$ 的夹角, θ_3 为 $O_3 x_3$ 相对于 $O_0 x_0$ 的夹角, 且以上转角均假设逆时针方向为正. 系统的几何参数定义如下:

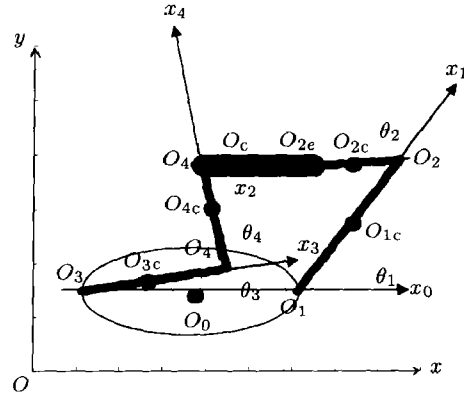


图 1 空间机械人模型

Fig.1 Free-floating robot system

$$\begin{aligned} L_0 &= O_1 O_3 = 2O_1 O_0, & L_c &= O_{4e} O_c + O_c O_{2e} = a_c + b_c, \\ L_1 &= O_1 O_{1c} + O_{1c} O_2 = a_1 + b_1, & L_2 &= O_2 O_{2c} + O_{2c} O_{2e} = a_2 + b_2, \\ L_3 &= O_3 O_{3c} + O_{3c} O_4 = a_3 + b_3, & L_4 &= O_4 O_{4c} + O_{4c} O_{4e} = a_4 + b_4. \end{aligned}$$

设 e_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) 为 $O_i x_i$ 轴的基矢量, e_c 为 B_c 的基矢量, $O_{2d} O_{4e}, O_c$ 相对于 O 的矢径分别为 r_{2e}, r_{4e}, r_c , 各分体质心 O_{ic} ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) 相对于 O 的矢径为 r_i , 则由系统位置几何关系, 有

$$\begin{aligned} r_1 &= r_0 + 0.5L_0 e_0 + a_1 e_1, \\ r_2 &= r_0 + 0.5L_0 e_0 + L_1 e_1 + a_2 e_2, \\ r_3 &= r_0 - 0.5L_0 e_0 + a_3 e_3, \\ r_4 &= r_0 - 0.5L_0 e_0 + L_3 e_3 + a_4 e_4, \\ r_{2e} &= r_0 + 0.5L_0 e_0 + L_1 e_1 + L_2 e_2, \\ r_{4e} &= r_0 - 0.5L_0 e_0 + L_3 e_3 + L_4 e_4, \\ r_c &= r_0 + 0.5L_0 e_0 + L_1 e_1 + L_2 e_2 + b_c e_c. \end{aligned} \quad (1)$$

由于系统动量守恒, 且系统总质心与惯性坐标系原点重合, 则有

$$\sum_{i=0}^4 m_i \mathbf{r}_i + m_c \mathbf{r}_c = 0, \quad \sum_{i=0}^4 m_i \dot{\mathbf{r}}_i + m_c \dot{\mathbf{r}}_c = 0. \quad (2)$$

在机械臂操作过程中, 设目标物体的几何长度为常量 L_c , 并设定目标物体的姿态角亦保持为常量 α , 则存在几何约束关系:

$$\mathbf{r}_{2e} - \mathbf{r}_{4e} = L_c \mathbf{e}^{\alpha \hat{i}}. \quad (3)$$

由于系统无外力及外力矩作用, 系统还满足动量矩守恒关系:

$$\sum_{i=1}^n I_i \dot{\theta}_i + \sum_{i=1}^n |\mathbf{r}_i \times m_i \dot{\mathbf{r}}_i| = \text{const}$$

根据上面的系统动量矩守恒关系, 结合 (1) 和 (2) 式, 有

$$5\dot{\theta}_0 \sum_{i=0}^4 I_i + I_1 \dot{\theta}_1 + I_2 \sum_{i=1}^2 \dot{\theta}_i + I_3 \dot{\theta}_3 + I_4 \sum_{i=3}^4 \dot{\theta}_i + I_c \dot{\theta}_c + \sum_{i=0}^4 |\mathbf{r}_i \times m_i \dot{\mathbf{r}}_i| + |\mathbf{r}_c \times m_i \dot{\mathbf{r}}_c| = \text{const} \quad (4)$$

整理后, 上式可简化为

$$\sum_{i=0}^4 \bar{D}_i(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) d\theta_i = 0. \quad (5)$$

令:

$$(D_0, D_1, D_2, D_3, D_4) = (\bar{D}_0, \bar{D}_1, \bar{D}_2, \bar{D}_3, \bar{D}_4)|_{\theta_0} = \text{const}$$

D_0, D_1, D_2, D_3, D_4 为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 的函数, 且需满足 $D_0 \neq 0$.

若载体姿态保持不变, 则有 $\theta_0 = \text{Const}$, $d\theta_0 = 0$; 将这一结果代入 (5) 式, 得到

$$\sum_{i=1}^4 E_i(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) d\theta_i = 0. \quad (6)$$

其中, $E_1 = -D_1/D_0$, $E_2 = -D_2/D_0$, $E_3 = -D_3/D_0$, $E_4 = -D_4/D_0$.

将 (3) 式展开, 得到

$$\sqrt{(x_{2e} - x_{4e})^2 + (y_{2e} - y_{4e})^2} = L_c, \quad (y_{2e} - y_{4e})/(x_{2e} - x_{4e}) = \tan \alpha. \quad (7)$$

其中, (x_{2e}, x_{4e}) 、 (y_{2e}, y_{4e}) 分别为矢径 $\mathbf{r}_{2e}, \mathbf{r}_{4e}$ 的坐标值.

对 (7) 式求全微分, 得到

$$\sum_{i=1}^4 M_i(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) d\theta_i = 0, \quad \sum_{i=1}^4 N_i(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) d\theta_i = 0. \quad (8)$$

其中,

$$M_i(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) = \partial \sqrt{(x_{2e} - x_{4e})^2 + (y_{2e} - y_{4e})^2} / \partial \theta_i,$$

$$N_i(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) = \partial [(y_{2e} - y_{4e}) / (x_{2e} - x_{4e})] / \partial \theta_i.$$

联立 (6) 和 (8) 式, 并将两边同除以 $d\theta_1$, 得到

$$\begin{cases} N_2 \frac{d\theta_2}{d\theta_1} + N_3 \frac{d\theta_3}{d\theta_1} + N_4 \frac{d\theta_4}{d\theta_1} = -N_1, \\ M_2 \frac{d\theta_2}{d\theta_1} + M_3 \frac{d\theta_3}{d\theta_1} + M_4 \frac{d\theta_4}{d\theta_1} = -M_1, \\ E_2 \frac{d\theta_2}{d\theta_1} + E_3 \frac{d\theta_3}{d\theta_1} + E_4 \frac{d\theta_4}{d\theta_1} = -E_1. \end{cases} \quad (9)$$

3 动力学奇点的设计

微分方程组 (9) 可分解写为

$$\begin{Bmatrix} \frac{d\theta_2}{d\theta_1} \\ \frac{d\theta_3}{d\theta_1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_2 & N_3 \\ M_2 & M_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} -(N_1 + N_4 \frac{d\theta_4}{d\theta_1}) \\ -(M_1 + M_4 \frac{d\theta_4}{d\theta_1}) \end{Bmatrix}, \quad (10)$$

$$\{E_2 \ E_3\} \begin{Bmatrix} \frac{d\theta_2}{d\theta_1} \\ \frac{d\theta_3}{d\theta_1} \end{Bmatrix} = -(E_1 + E_4 \frac{d\theta_4}{d\theta_1}). \quad (11)$$

将 (10) 式代入 (11) 式, 得到

$$\{E_2 \ E_3\} \begin{bmatrix} N_2 & N_3 \\ M_2 & M_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} -(N_1 + N_4 \frac{d\theta_4}{d\theta_1}) \\ -(M_1 + M_4 \frac{d\theta_4}{d\theta_1}) \end{Bmatrix} + (E_1 + E_4 \frac{d\theta_4}{d\theta_1}) = 0. \quad (12)$$

将 (12) 式展开, 有

$$H_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)d\theta_1 + H_4(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)d\theta_4 = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_4}{d\theta_1} = -\frac{H_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)}{H_4(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)}. \quad (13)$$

其中,

$$\begin{aligned} H_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) &= -(J_2 N_1 + J_3 M_1 - E_1), \\ H_4(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4) &= -(J_2 N_4 + J_3 M_4 - E_4), \end{aligned} \quad \{J_2 \ J_3\} = \{E_2 \ E_3\} \begin{bmatrix} N_2 & N_3 \\ M_2 & M_3 \end{bmatrix}^{-1}.$$

由 (13) 式可知, 若存在铰空间点 $(\theta_{10}, \theta_{20}, \theta_{30}, \theta_{40})$, 使 $H_1 = 0, H_4 = 0$; 则在点 $(\theta_{10}, \theta_{20}, \theta_{30}, \theta_{40})$ 处, 对任意微小变量 $(d\theta_1, d\theta_4)$, 有 $H_1 d\theta_1 + H_4 d\theta_4 \equiv 0$, 即该点是一组曲线的交点, 称为动力学奇点^{[9],[10]}. 从上述分析可知, 在机械臂铰空间任意两点之间总存在着某个路径, 当机械臂沿铰空间该路径运动时, 理论上对载体姿态无任何干扰.

因为 H_1, H_4 的值与双臂空间机器人系统的几何参数及动力学参数有关, 故只要适当选取系统的几何及动力学参数, 动力学奇点是可能设计出来的.

以上仅是以 $\theta_1 \rightarrow \theta_4$ 为例来讨论动力学奇点的存在的, 显然对于 $\theta_1 \rightarrow \theta_2, \theta_2 \rightarrow \theta_3$ 等其他各种情况, 只要对 (13) 式稍作改变, 上述方法将同样适用. 由于动力学奇点与系统的几何及动力学参数有关, 我们将通过后面的具体算例来阐明上述方案的合理性.

4 双臂机器人无扰运动规划仿真

显然, 满足 (7) 式的所有铰空间点 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$, 都为微分方程组 (9) 的初始条件.

算例 1 选取双臂空间机器人系统的几何及动力学参数如下:

$$m_0 = 12 \text{ kg}, m_1 = 0.1 \text{ kg}, m_2 = 0.1 \text{ kg}, m_3 = 1 \text{ kg}, m_4 = 1 \text{ kg}, m_c = 8 \text{ kg};$$

$$I_0 = (8/3) \text{ kg} \cdot \text{m}^2, I_1 = 0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, I_2 = 0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, I_3 = 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$I_4 = 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, I_c = 4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; L_0 = 2.5 \text{ m}, a_c = 0.8 \text{ m}, b_c = 0.5 \text{ m}, a_1 = 1 \text{ m},$$

$$b_1 = 0.7 \text{ m}, a_2 = 0.5 \text{ m}, b_2 = 0.5 \text{ m}, a_3 = 1 \text{ m}, b_3 = 0.7 \text{ m}, a_4 = 0.5 \text{ m}, b_4 = 0.5 \text{ m}.$$

根据不同的初始条件分别求解微分方程组 (9), 得到图 2. 由图 2 可见, 当初始条件不同时, 由 (9) 式的积分可得一组曲线. 因为 (9) 式满足 $\theta_0 = \text{const}$, $d\theta_0 = 0$, 所以从其中任一曲线上的一点移动到该曲线上的另一任意点时, 都将不会改变载体的姿态, 这组曲线称为对载体姿态不产生扰动的“无扰曲线”. 其中, $\theta_1 \rightarrow \theta_2$ 的积分曲线在 θ_1 的该积分区间没有交点, 而对应的 $\theta_1 \rightarrow \theta_3$, $\theta_1 \rightarrow \theta_4$ 的积分曲线在 θ_1 的该积分区间有相交点, 且交点所对应的 θ_1 值不相同. 考虑 $\theta_1 \rightarrow \theta_3$, $\theta_1 \rightarrow \theta_4$ 图, 显然任一曲线上的点都可以通过交点移动到其他曲线上的任意点, 而不改变载体的姿态, 这些交点即前面所说的动力学奇点.

如果双臂空间机器人系统存在奇点, 则铰空间点可以沿无扰曲线通过动力学奇点到达其他任意与之相交的曲线上的任意铰空间点, 而不对载体姿态产生任何干扰; 即任何两个铰空间点之间都可能找到一条对载体姿态无干扰的运动路径, 从而实现对载体姿态无干扰的运动规划.

由以上分析可知, 对载体姿态无干扰路径规划的关键, 是确定动力学奇点是否存在及其分布的情况. 为验证上述方法的正确性, 对其进行机器人实际运动过程的计算机动态仿真试验, 结果如图 3 所示. 显然, 在机械臂运动过程中载体本身始终只有平动, 没有转动, 这与以上对无扰曲线的分析相符.

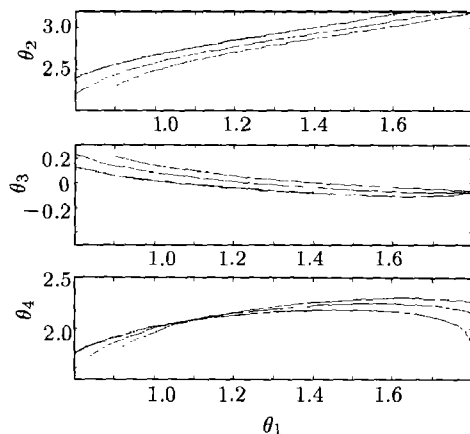


图 2 铰空间曲线图

Fig.2 Rotation angle curves of the arms' links

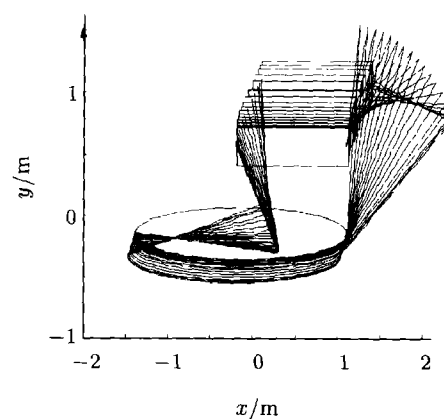


图 3 机械臂运动过程仿真

Fig.3 Actual movement process of robot

算例 2 设双臂空间机器人系统的几何及动力学参数取为

$m_0 = 120 \text{ kg}$, $m_1 = 20 \text{ kg}$, $m_2 = 20 \text{ kg}$, $m_3 = 10 \text{ kg}$, $m_4 = 10 \text{ kg}$, $m_c = 30 \text{ kg}$;
 $I_0 = 500 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $I_1 = 30 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $I_2 = 15 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $I_3 = 15 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $I_4 = 20 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,
 $I_c = 40 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; $L_0 = 5 \text{ m}$, $L_c = 3 \text{ m}$, $a_1 = 2 \text{ m}$, $b_1 = 1.5 \text{ m}$, $a_2 = 2 \text{ m}$, $b_2 = 1.5 \text{ m}$,
 $a_3 = 3 \text{ m}$, $b_3 = 2 \text{ m}$, $a_4 = 3 \text{ m}$, $b_4 = 2 \text{ m}$.

并令 $\theta_1 = 0.6 + \sin(t)$, 其中 t 为仿真时间, 同样以不同的初始条件分别求解微分方程组 (9). 类似地, 可以得到图 4, 图 5.

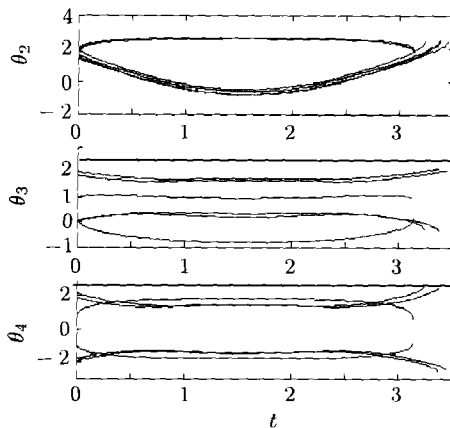


图 4 铰空间曲线图

Fig.4 Rotation angle curves of the arms' links

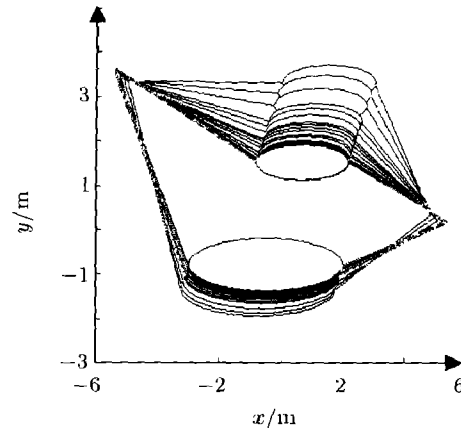


图 5 机械臂运动过程仿真

Fig.5 Actual movement process of robot

从上面的分析还可以看到, 在实际应用中, 只要预先算出足够多条的无扰图曲线, 并使其覆盖机器人系统所必须到达的工作区域, 该方法就可以实现双臂空间机器人姿态无扰运动的目的.

5 结论

本文分析表明, 对于双臂空间机器人系统只要适当选取系统的几何及动力学参数, 就可以设计出动力学奇点, 并从而实现载体姿态的无扰运动规划. 这种运动规划为空间环境下节省宝贵的姿态控制燃料问题, 提供了一种有效的解决方法, 对空间机器人的实际应用有重要意义.

参 考 文 献

- [1] Dubowsky S, Papadopoulos E. The kinematics, dynamics and control of free-flying space robotic systems. *IEEE Trans. Rob. Autom.*, 1993, 9(5):531—543
- [2] Dubowsky S, Torres M A. Path-Planning for space manipulators to minimize spacecraft attitude disturbance. In: Book Wayne ed. *IEEE Intern. Conf. Rob. Autom.*, Los Alamitos, California, 1993, 3:812—817
- [3] 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)

- [4] Chen Li, Liu Yanzhu et al. The variable-structure robust control of space-based manipulator systems with uncertain parameters. *Chin. J. Space Sci.*, 1998, 18(2):174—179. in Chinese (陈力, 刘延柱等. 参数不确定空间机械臂系统的变结构鲁棒控制. 空间科学学报, 1998, 18(2):174—179)
- [5] Chen Li, Liu Yanzhu. The adaptive control schemes of space-based manipulator with prismatic joint and uncertain parameters. *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] Chen Li, Liu Yanzhu. The adaptive control scheme of space-based manipulator with uncertain parameters. *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)
- [7] Nakamura R. Nonholonomic path-planning of space robots via a bidirectional approach. *IEEE Trans. Rob. Autom.*, 1991, 7(4):500—512
- [8] Ge Xinshen, Zhang Qizhi, Liu Yanzhu. The space-based manipulator's optimization control of kinematics planning based on 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)
- [9] Legnani G, Zappa B, Adimini R, Casolo F. A contribution to the dynamics of free-flying space manipulator. *Mech. Mach. Theory*, 1999, 34:359—372
- [10] Zappa B, Adamini R, Omodei A. Dynamic Singularity in Free-flying Space Manipulator. 10th World Cong. Theo. Mach. Mech., Finland, 1999

FREE-FLOATING SPACE MANIPULATOR'S NO-SPACECRAFT-ATTITUDE-DISTURBANCE PATH PLANNING USING DYNAMICS SINGULARITIES

GAO Zikun CHEN Li

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

Abstract

This paper discusses path planning of the free-floating double arms space manipulators under the tiny gravity environment. Combination the condition of conservations of momentum and angular momentum, the text gives out the formula to compute the dynamics singularities and the zero disturbance maps of the robotic system. Using the dynamics singularities and the zero disturbance maps, we can develop a way to save the expensive space fuel resources through path planning.

Key words Free-floating space robot, Dynamics singularities, Path planning