

## 自由飘浮空间机器人准刚性分解运动轨迹控制与仿真\*

刘新建 张 彭

唐乾刚

(国防科技大学自动控制系 长沙 410073) (国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

**摘 要** 研究轨道空间机器人操作时, 基座处于自由飘浮状态的手爪准刚性运动直角坐标轨迹的分解运动控制, 重点分析了广义雅可比矩阵的计算, 并进行了空间单手 3-DOF 的仿真, 该方法可相应推广到开链多手。

**关键词** 空间机器人, 广义雅可比, 分解运动控制

**分类号** TP241.3

## The Quasi-Rigid Resolved Motion Control and Simulation for Free-floating Space Robot

Liu Xinjian Zhang Peng Tang Qiangang

(National University of Defence Technology, Changsha, 410073)

**Abstract** The paper investigated the quasi-rigid resolved motion control for free-floating space manipulators when the base is not fixed, especially the generalized Jacobin matrix applied, and one simulating example.

**Key words** space robot, quasi-rigid trajectory control, generalized Jacobin matrix.

轨道上的空间机械手(如 RMS)处在失重环境中, 为了达到有效操作, 其机械臂伸展须设计得很长(RMS 伸展长度达 16.6 m), 而质量又受到发射有效载荷的限制, 在操作时弹性运动属性非常突出。因此, 空间机械手的操作是刚性和弹性两种运动耦合在一起的多柔体复杂运动。综合十几年来该领域研究成果, 结合关节输入整形滤波的奇异摄动控制方法<sup>[5][6]</sup>是解决地面柔性机械手操作控制问题的一种相对有效简便的方法。奇异摄动方法通过引入适当的摄动小参数  $\epsilon$ , 把柔性运动体控制问题分解成快变和慢变两个系统的控制问题。这里不讨论快变子系统和滤波振动控制问题, 其中的慢变子系统指的是当摄动参数  $\epsilon=0$  时, 系统退化成的准刚性运动的降阶子系统, 即忽略了弹性运动的

\* 1995 年 9 月 6 日收稿

刚体运动系统。这种降阶子系统的准刚性运动控制问题与已有的机械手刚体运动控制律（如分解运动控制，计算力矩控制）是一样的。但对于空间机械手，操作时的刚体运动还必须考虑基座位姿的扰动，这和地面固定基座的情形截然不同，因而轨道上的空间机械手要沿一定的路径（如直线）捕捉轨道上的其它目标，其准刚性运动的轨迹控制也是一个重要问题。

分解运动控制是把手爪的直角坐标运动分解成各关节运动的配合。对于固定基座的机械手，如果预先规划出手爪相对基座坐标系的预期位置  $X_d$ ，速度  $\dot{X}_d$ ，加速度  $\ddot{X}_d$ ，则为了减小位置误差，机械手的关节力所产生的关节加速度应满足<sup>[1]</sup>。

$$\ddot{q}(t) = J^{-1}(q)[\ddot{X}_d(t) + K_v(\dot{X}_d(t) - \dot{X}(t) + K_p e(t) - J(q, \dot{q})\dot{q}(t)]$$

式中： $e(t)$  是位置误差向量（含手爪的线位置和角位置）， $K_p$ 、 $K_v$  分别是位置、速度增益参数；适当选取  $K_p$ 、 $K_v$ ，由递推的牛顿欧拉算法计算关节力可实现轨迹控制。这里与控制有关的一个重要物理量是速度雅可比矩阵  $J(q)$ 。

空间机械手操作时，必引起基座位置和姿态的扰动。如果对基座实行控制而保持不动，则控制基座喷出的燃气可能把目标推跑，而使捕捉失败。另外，这种方法会消耗过多的燃料而缩短空间机械手的寿命。因此，希望位置和姿态都不控制，就能完成空间操作，这时基座处于自由飘浮。显然，固定基座的分解运动控制式（1）已不能直接使用。

Papadopoulos 指出<sup>[3]</sup>，空间机器人控制方法本质上与固定基座时是类似的。因此，可将固定基座的分解运动控制推广到空间机器人。关键是将雅可比矩阵推广到自由飘浮时相对应的广义雅可比矩阵。

## 1 自由飘浮时广义雅可比矩阵

如图 1 所示，设基座为连杆 0，机械手是旋转关节，将惯性坐标系原点设在系统质心，在操作期间，系统所受微重力可忽略不计，且假设系统不受其它外力（或外力矩），初始静止，则有

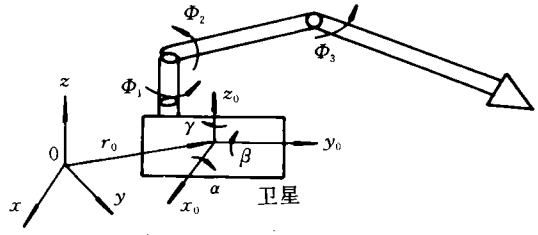


图 1 空间机械手

系统质心方程：
$$\sum_{i=1}^n m_i r_i = r_c \sum_{i=0}^n m_i = 0 \quad (2)$$

线动量守恒：
$$\sum_{i=0}^n m_i \dot{r}_i = 0 \quad (3)$$

角动量守恒：
$$\sum_{i=0}^n (I_i \omega_i + m_i r_i \times \dot{r}_i) = 0 \quad (4)$$

几何关系：
$$r_i - r_{i-1} = a_i + b_{i-1} \quad (5)$$

手爪位置矢量：
$$P_n = r_0 + b_0 + \sum_{i=1}^n l_i \quad (6)$$

式中： $r_i$ ——连杆  $i$  的质心位置矢量； $l_i$ ——关节  $i$  到关节  $i+1$  的矢量； $a_i$ ——关节  $i$  到连杆  $i$  的矢量； $b_i$ ——连杆  $i$  的质心到关节  $i+1$  的矢量； $I_i$ ——连杆  $i$  对其质心的惯量张量； $\omega_i$ ——连杆  $i$  的绝对角速度； $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ——卫星的姿态扰动欧拉角；

由（2）、（5）有：

$$r_i = \sum_{j=0}^n F_{i,j} ({}^0A_j {}^jA_j + {}^0A_{j-1} {}^{j-1}b_{j-1}) \quad (m_{0n} = m_0 + m_1 + \cdots + m_n) \quad (7)$$

$$F_{i,j} = f_{i,j}(m_0, m_1, \cdots, m_n) / m_{0n}$$

式中左上标表示要投影的各连杆体坐标系, 如 ${}^0A_j$  是 $\{j\}$ 系到 $\{0\}$  (卫星体坐标系)的旋转变换矩阵,  $F_{i,j}$ 是各连杆质量的函数。微分(7)式得

$${}^0\dot{r}_i = \sum_{j=0}^n F_{i,j} ({}^0\dot{A}_j {}^j a_j + {}^0\dot{A}_{j-1} {}^{j-1} b_{j-1}) \quad (8)$$

而

$${}^0\dot{A}_j = \dot{\alpha} \frac{\partial {}^0A_j}{\partial \alpha} + \dot{\beta} \frac{\partial {}^0A_j}{\partial \beta} + \dot{\gamma} \frac{\partial {}^0A_j}{\partial \gamma} + \dot{\Phi}_1 \frac{\partial {}^+A_j}{\partial \Phi_1} + \cdots + \dot{\Phi}_j \frac{\partial {}^0A_j}{\partial \Phi_j} \quad (9)$$

式中,

$$\frac{\partial {}^0A_j}{\partial \Phi_k} = {}^0A_k [D_k^u \quad {}^kA_k] {}^kA_1, \quad (\Phi_k \text{ 是关节变量}) \quad (10)$$

$D_k^u$  是微量换算子,  $u$  代表旋转轴矢量

$$D_k^u = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_k^k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_k^k = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中  $u=i, j, k$  分别代表旋转轴, 把(9)代入(8), 展开并整理得

$${}^0\dot{r}_i = \sum_{j=0}^n \dot{\Phi}_j S_{i,j} \quad (12)$$

式中:

$$S_{i,j} = \sum_{k=1}^n F_{i,k} \left( \frac{\partial {}^0A_k^k}{\partial \Phi_j} a_k + \frac{\partial {}^0A_{k-1}^{k-1}}{\partial \Phi_j} b_{k-1} \right) \quad (13)$$

另外, 连标  $i$  的角速度可写成

$${}^0\omega_i = \sum_{j=0}^i {}^0A_j {}^j\omega_j = \sum_{j=0}^i \dot{\Phi}_j ({}^0A_j {}^j u_j) \quad (14)$$

微分(6)式, 得

$${}^0\dot{p}_n = {}^0\dot{r}_0 + {}^0\dot{A}_0 {}^0b_0 + \sum_{j=1}^n {}^0\dot{A}_j I_j \quad (15)$$

从(3)式和(8)~(15)式中消去 ${}^0\dot{r}_0$ 之后, 手爪的速度雅可比双矩阵可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} \dot{p} &= \begin{bmatrix} \dot{p}_n \\ \omega_n \end{bmatrix} = J[\Phi] \dot{\Phi} \\ &= \begin{bmatrix} J_\alpha & J_\beta & J_\gamma & J_{\Phi_1} \sim J_{\Phi_n} \\ {}^0A_0 k & {}^0A_0 j & {}^0A_0 i & {}^0A_1 k \sim {}^0A_n k \end{bmatrix} [\alpha \ \beta \ \gamma \ \Phi_1 \sim \Phi_n]^T \end{aligned} \quad (16)$$

式中:  $J_{\Phi_i} = S_{0i} + \sum_{j=1}^n \frac{\partial {}^0A_j}{\partial \Phi_j} I_j$ , ( $i, j, k$  是单位矢量)

(16)式可用分块矩阵表示:

$$\dot{P} = J_s \dot{\Phi}_s + J_m \dot{\Phi}_m \quad (\Phi_i \text{ 代表 } [\alpha, \beta, \gamma]^T) \quad (17)$$

式中,  $J_s \in R^{6 \times 3}$ ,  $J_m \in R^{6 \times n}$ ,  $J = [J_s, J_m]$

另外把(8)和(14)式代入(4)式, 角动量守恒可表成

$$[I_\alpha I_\beta I_\gamma I_{\Phi_1} \sim I_{\Phi_n}] [\dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma} \ \dot{\Phi}_1 \sim \dot{\Phi}_n]^T = 0 \quad (18)$$

式中: 
$$I_{\phi_i} = \left( \sum_{j=0}^n A_j' I_j' I_0 \right) {}^0 A_i' u_i + \sum_{j=0}^n m_j {}^0 r_j \times S_{i_j} \quad (19)$$

(18)式可写成: 
$$I_s \dot{\Phi}_s = I_m \dot{\Phi}_m = 0 \quad (20)$$

消去  $\dot{\Phi}_s$ , 可得 
$$\dot{P} = (J_m - J_s I_s^{-1} I_m) \dot{\Phi}_m \quad (21)$$

所以, 广义雅可比矩阵  $J^* = J_m - J_s I_s^{-1} I_m = J^*(q, m) \quad (22)$

若  $J^*$  的逆或伪逆(冗余时)存在,  $\dot{\Phi}_m = (J^*)^{-1} \dot{P} \quad (23)$

(23)式表明, 可以根据广义雅可比矩阵去实现分解运动控制。

以图 2 空间单臂为例, 按上述方法获得的(21)式的表达式:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{\omega}_1 \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} -m_0 l_1 \sin \Phi_1 / (m_0 + m_1) \\ m_0 l_1 \cos \Phi_1 / (m_0 + m_1) \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} [I_0 + I_1]^{-1} \left[ I_1 + \frac{m_0 m_1 l_1^2 \cos 2\Phi_1}{2(m_0 + m_1)} \right] \right\} \dot{\Phi}_1 \quad (24)$$

## 2 仿真

以空间单手自由度为例, 模拟空间操作手系统的参数见表 1。系统的初始位形和手爪规划轨迹——直线段给定如图 3, 手爪沿轨迹的速度分布见图 4。仿真时, 由 (23) 式可得出关节速度积分出的关节角度变化见图 5, 基座姿态扰动的欧拉角由欧拉运动方程积出(对于大扰动需用四元数法), 见图 6, 卫星位置扰动见图 7, 系统位姿变化过程见图 8 动画生成)。

表 1 模拟空间操作手参数

	卫星(基座)	操作手		
	杆 0	杆 1	杆 2	杆 3
质量(kg)	2500.0	20.0	60.0	60.0
l(m)	3.5	0.25	3.5	3.5
$I_0(\text{kgm}^2)$	2800.0	0.10	0.35	0.35
$I_1^0(\text{kgm}^2)$	2800.0	0.10	14.4	14.4
$I_2^0(\text{kgm}^2)$	2140.0	0.10	14.4	14.4

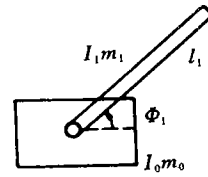


图 2 空间单臂手

## 3 结束语

(1)空间机械手的准刚性运动轨迹控制, 可用广义雅可比表示的分解运动控制来实现, 广义雅可比矩阵不仅是各关节角的函数, 还是系统各质量的函数, 这比地面要复杂得多, 且不难知奇异性更严重。

(2)本文的方法可推广到开链多手操作, 但广义雅可比求逆时间大大增加, 如何提高空间多手操作动力学和控制算法的效率是今后的一个重要研究方向。

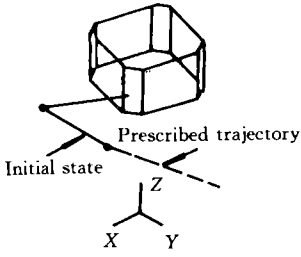


图 3 系统初始位姿

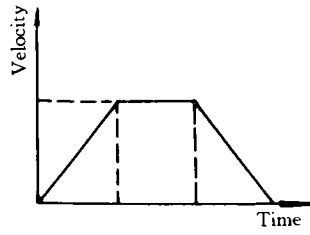


图 4 手爪沿轨迹的速率

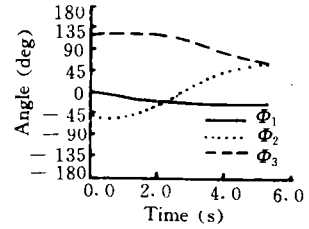


图 5 关节角变化

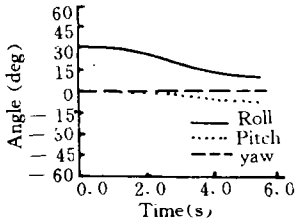


图 6 基座姿态扰动

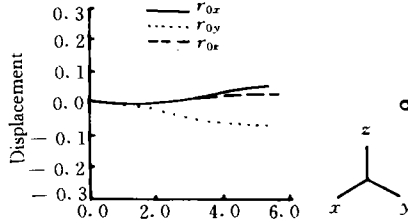


图 7 基座位置扰动

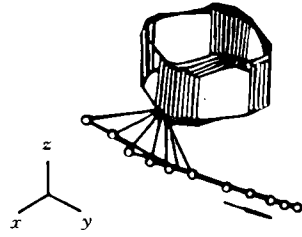


图 8 系统位姿变化过程

### 参考文献

- 1 熊有伦. 机器人学. 北京:机械工业出版社,1993
- 2 Dubowsky. The kinematics,dynamics and control of free-flying and free-floating of space robotic system. IEEE Trans. on Robotics and Automation,1993
- 3 Papadopoulos. On the nature of control algorithms for free-floating space manipulators. IEEE Trans Automata,1991
- 4 Yoji Umetani. Continuous path control of space manipulators mounted on OMV, Acta Astronautica, 1987,15:253
- 5 Kokotovic. Applications of singular perturbation technology to control problems. SIAM Review,1984, 26:1
- 6 Farshad. Experiments on Rigid Body-based controllers with input-preshaping for a two-link flexible manipulator. IEEE Trans. Robotics and Automation,1994.10

(责任编辑 石少平)