

单臂式空间机械臂捕捉空间目标问题研究*

丛佩超 孙兆伟

(哈尔滨工业大学卫星技术研究所, 哈尔滨 150080)

摘要 以空间机械臂系统的动量守恒关系式为基础,对空间机械臂抓取空间目标过程中的碰撞问题进行了分析,提出了“直臂抓取”与“广义直臂抓取”概念,详细推导了满足基座质心、系统质心及工作端点共线的机械臂构型,得到了碰撞力方向矢量与基座、系统质心重合的角度关系式.满足关系式的空间机械臂构型可有效的减少碰撞力对于系统角动量的影响,进而避免混合体控制问题的关节限制与力矩限制.通过仿真验证了方法的有效性.

关键词 空间机械臂, 机械臂构型, 直臂抓取, 角动量

引言

由于宇宙空间环境对于人类的活动十分危险,利用空间机械臂来代替和帮助宇航员完成大量的空间任务,可以大大降低空间活动的危险性,同时还可以提高工作的效率.空间机械臂系统已经在航天飞机和空间站上得到了应用,世界上第一个真正意义上的空间机器人系统已随着日本的实验卫星 VII 号于 1997 年升空^[1].空间机械臂做为空间机械人学的一个分支,已经成为了当今航天领域研究的热点^[2-4].

捕捉空间目标是空间机械臂在空间任务中的重要应用,它主要包括以下几个主要阶段:追踪和获取目标阶段、接近目标阶段、实施抓取阶段,抓取完成后混合体的控制阶段.

第一、二阶段需要获取追踪卫星与目标体之间的位置和姿态参数,以及目标的惯性特征;同时,规划出追踪卫星的接近轨迹与机械臂构型,以便减少抓取时产生的碰撞力与耦合角动量,为下一步实施抓取操作创造条件.第三、四阶段是抓取过程的重要环节,这其中涉及到选取合适的抓具以实施抓取动作、抓具与目标体间碰撞的建模问题、碰撞力问题、抓取完成后混合体的控制问题.由于碰撞造成系统动量的改变,特别是角动量的改变,直接影响到整个系统(追踪卫星与目标体)的稳定问题.本文重点研究抓取过程中产生的碰撞问题.

针对抓取过程中的碰撞问题,国外学者提出了

很多的研究方法.一类方法是从减小碰撞力的角度出发,L. B. Wee 等人提出了一种“梯度投影算法”来规划机械臂的运动轨迹,减小碰撞力^[5];Warker 等人提出了利用可控动量飞轮来吸收目标体角动量,进而达到减少碰撞力的目的^[6].

另一类方法是从控制算法的角度出发,Yoshikawa 等人提出了利用阻抗控制算法来捕捉非协同目标,并阐述了在碰撞后保证目标不被推走的条件^[7];Nenchev 等提出了利用“reaction null space”控制算法来处理碰撞产生的耦合角动量^[8-9],这种方法能够有效地将机械臂与基座的动力学解耦,但这种方法也有一定的缺陷,那就是受到机械臂关节限制与执行机构力矩限制的影响,还有其他的一些方法^[10-11].

由于飞行器对于姿态的要求往往大于对位置的要求,如何控制碰撞作用对于系统角动量的影响十分重要.在碰撞力产生之前,通过选取恰当的机械臂构型,使得碰撞力的矢量方向通过或接近系统质心,以减小碰撞力对于系统角动量的影响,对于一些角动量相对较小的目标体,可以采取“直臂抓取”来进行捕获.

本文首先建立了空间机械臂抓取目标时的动力学模型,以及系统的动量守恒关系式.对空间机械臂系统进行目标捕捉时产生的碰撞问题进行了分析,提出了“直臂抓取”概念,详细推导了满足基座质心、系统质心及工作端点共线的机械臂构型,得出了碰撞力方向矢量与基座、系统质心重合的角

度关系式,满足关系式的空间机械臂构型可有效的减少碰撞力对于系统角动量的影响,进而避免混合体控制问题的关节限制与力矩限制.通过仿真证明了方法的有效性.

1 空间机械臂的系统建模

研究多刚体系统的动力学方法有很多,本文采用的是拉格朗日方程进行建模,具体的空间机械臂运动方程^[12]如下,

$$\begin{bmatrix} H_B & H_{Bm} \\ H_{Bm} & H_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_B \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_B \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_B^T \\ J_m^T \end{bmatrix} F_h \quad (1)$$

$$H_B = \begin{bmatrix} ME & M\tilde{r}_{0g}^T \\ M\tilde{r}_{0g} & H_\omega \end{bmatrix} \quad (\in R^{6 \times 6})$$

$$H_{Bm} = \begin{bmatrix} J_{T\omega} \\ H_{\omega\theta} \end{bmatrix} \quad (\in R^{6 \times n})$$

$$H_\omega = \sum_{i=1}^n (I_i + m_i \tilde{r}_{0g}^T \tilde{r}_{0g}) + I_0 \quad (\in R^{3 \times 3})$$

$$H_{\omega\theta} = \sum_{i=1}^n (I_i J_{Ri} + m_i \tilde{r}_{0g} J_{Ti}) \quad (\in R^{3 \times n})$$

$$H_m = \sum_{i=1}^n (J_{Ri} I_i J_{Ri} + m_i J_{Ti}^T J_{Ti}) \quad (\in R^{n \times n})$$

$$J_{T\omega} = \sum_{i=1}^n m_i J_{Ti} / M \quad (\in R^{3 \times n})$$

$$J_{Ti} = [k_1 \times (r_i - p_1), k_2 \times (r_i - p_2), \dots, k_i \times (r_i - p_i), 0, \dots, 0] \quad (\in R^{3 \times n})$$

$$J_{Ri} = [k_1, k_2, \dots, k_i, 0, \dots, 0] \quad (\in R^{3 \times n})$$

$$r_{0g} = r_g - r_0 \quad (\in R^3)$$

$$r_{0i} = r_i - r_0 \quad (\in R^3)$$

$$\tilde{r} = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}$$

以上各式中物理量的意义:

m_i :空间机械臂第*i*关节质量

M :空间机械臂系统的总质量

r_i :第*i*关节质心的位置矢量

p_i :转铰*i*的位置矢量

k_i :沿转铰*i*转轴方向的单位矢量

r_0 :基座质心的位置矢量

r_g :系统质心的位置矢量

c_B :由基座决定的非线性项

c_m :由机械臂决定的非线性项

F_B :作用在基座上的外力

F_h :作用在臂端上的外力

τ :机械臂转铰的力矩

2 碰撞过程的分析

利用空间机械臂进行目标捕捉的关键环节是抓取阶段,由于系统所处的空间环境影响,空间捕捉时发生的碰撞与地面情况有着显著的区别,主要的不同点在于空间情况下,碰撞对于机械臂系统产生强烈的冲击力,这种冲击力将影响到机械臂系统的构型,特别是基座的姿态将发生变化,对系统的动量也将产生影响.对于碰撞过程的分析,最主要的目的是如何来避免、减少和控制碰撞产生的碰撞力对系统产生的影响.

碰撞力对于系统的影响表现在系统各部分动量的改变,这其中主要包括基座、机械臂及反作用飞轮等控制系统的动量.利用线动量与角动量守恒关系,将空间机械臂系统的动量表示为以上几部分的和.系统的线动量与角动量守恒关系如下.

$$P = \sum_{i=0}^n m_i v_i \quad (2)$$

$$L = \sum_{i=0}^n (I_i \omega_i + r_i \times m_i v_i) \quad (3)$$

由将方程(2)、(3)结合起来得到公式(4),

$$\begin{bmatrix} P \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ME_3 & M\tilde{r}_{0g} \\ M\tilde{r}_g & I_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{Tg} \\ I_0 \end{bmatrix} \dot{\theta} \quad (4)$$

进一步整理得到公式(5),

$$\begin{bmatrix} P \\ L \end{bmatrix} = H_B \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + H_c \dot{\theta} + \begin{bmatrix} 0 \\ r_0 \times P \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{其中, } H_B = \begin{bmatrix} ME_3 & M\tilde{r}_{0g}^T \\ M\tilde{r}_{0g} & H_M \end{bmatrix} \quad (\in R^{6 \times 6})$$

$$H_c = \begin{bmatrix} J_{Tg} \\ H_{\omega\theta} \end{bmatrix} \quad (\in R^{6 \times 6})$$

由于在实际情况下,很多工作主要考虑的是基座角速度,所以消除公式(5)中的线速度 v_0 ,得到公式(6),

$$L = \tilde{H}_B \omega_0 + \tilde{H}_c \dot{\theta} + r_g \times P \quad (6)$$

其中, $\tilde{H}_B = H_\omega - \tilde{r}_{0g} \tilde{r}_{0g}^T$, $\tilde{H}_c = H_{\omega\theta} - \tilde{r}_{0g} J_{Tg}$

在文献[8]中将 $H_c \dot{\theta}$ 称为惯性耦合动量矩阵,文献[9]中称 $\tilde{H}_c \dot{\theta}$ 为耦合角动量.这是关于抓取操作两个非常重要的概念.碰撞的结果就是对公式(6)中的各项产生影响.

由公式(1)消去基座速度项,得到如下表达式

$$\hat{H}_\theta = H \ddot{\theta} + \hat{c} = \hat{\tau} + \hat{J}_\theta^T F_h \quad (7)$$

其中,

$$\hat{H}_\theta = H_\theta - H_{B_m}^T H_B^{-1} H_{B_m}, \hat{c} = c_m - H_{B_m}^T H_B^{-1} c_B,$$

$$\hat{\tau} = \tau - H_{B_m}^T H_B^{-1} F_B, \hat{J}_m^T = J_m^T - H_{B_m}^T H_B^{-1} J_B^T$$

为了减少碰撞力对于系统角动量的影响,可以通过对机械臂碰撞前构型进行规划来实现. 首先,采用一种特殊的机械臂构型进行捕捉操作,令各关节转角为 0 度,也就是所谓的“直臂抓取”,此时,基座质心、机械臂各关节质心、系统质心与机械臂工作端点处于同一直线 L 上,假设,碰撞力的方向与直线 L 重合或在其附近,则从理论上可以得到,碰撞力作为系统外力将对系统角动量不产生或产生很小的作用. 此时,碰撞作用仅影响空间机械臂系统的线动量. 对于一些机械臂关节可以承受的碰撞力,同时操作空间等条件允许,可以采用“直臂抓取”方法,以达到减少碰撞力对系统角动量影响的目的. 但在有些情况下,空间机械臂抓手与目标所产生的碰撞力超出关节所能承受的范围,或工作空间及其他条件的限制,则不能实施“直臂抓取”. 此时,可以通过规划碰撞前的机械臂构型,使得在碰撞后阶段,系统各部分承受一定的角动量,而系统的耦合角动量(碰撞后混合体需要控制的角动量)为微小量,也就是文献[8]中的 C_1 情况,我们称这种情况下的构型为“广义直臂抓取”. 文献[8]并没有给出具体构型的推导过程,本文以一个两关节平面空间机械臂为例,详细的推导情况的机械臂构型与碰撞力之间的关系,得出了碰撞力方向矢量与基座、系统质心重合的角度关系式. 推导过程如下.

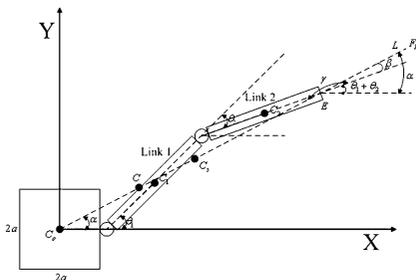


图 1 两关节平面空间机械臂

Fig. 1 Two-Link Planar Space Manipulator

图 1 中以一平面两关节空间机械臂为例,所采取的坐标系以基座质心 C_0 为原点, x 、 y 轴分别与基座两垂直边平行. 图中各符号的意义, C 、 C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_s 、分别为系统质心、基座质心、关节 1、2 的质

心及机械臂质心; E 为机械臂工作端点; θ_1 、 θ_2 分别为关节 1、2 的转角, β 、 γ 为碰撞力分别与末端关节、工作端的夹角.

关节 1 质心 C_1 的坐标:

$$X_1 = a + l/2 \times \cos(\theta_1), Y_1 = l/2 \times \sin(\theta_1) \quad (8)$$

关节 2 质心 C_2 的坐标:

$$X_2 = a + l \times \cos(\theta_1) + l/2 \times \cos(\theta_1 + \theta_2), \\ Y_2 = l \times \sin(\theta_1) + l/2 \times \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (9)$$

机械臂工作端点坐标:

$$X_E = a + l \times \cos(\theta_1) + l \times \cos(\theta_1 + \theta_2), Y_E = l \times \sin(\theta_1) + l \times \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (10)$$

基座质心 C_0 与坐标原点重合,所以 C_0 点坐标为(0,0);当机械臂工作端点、机械臂质心及基座质心三点共线时,应满足如下关系式.

$$\frac{Y_s - Y_0}{X_s - X_0} = \frac{Y_E - Y_0}{X_E - X_0}, \text{将以上各式分别代入得}$$

$$\frac{3 \times \sin(\theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2)}{4 + 3 \times \cos(\theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{\sin(\theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2)}{1 + \cos(\theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2)}$$

θ_1 与 θ_2 满足上式要求,则机械臂工作端点与基座质心与机械臂质心共线,即有一条直线 L 可同时通过以上三点,这条直线也必通过系统质心. 令 α 为直线 L 与 X 轴的夹角,则,

$$\alpha = \text{atan} \left\{ \frac{[\sin(\theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2)]}{[1 + \cos(\theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2)]} \right\} \quad (11)$$

$$\beta = [\alpha - (\theta_1 + \theta_2)] \quad (12)$$

当机械臂抓取空间目标时,为了使机械臂工作端与目标产生的碰撞力方向同以上三点确定的直线重合,则碰撞力与工作端的角度应满足以下关系式

$$\gamma = \pi + \beta \quad (13)$$

满足上式的空间机械臂构型可有效的减少碰撞力对于系统耦合角动量的影响,降低碰撞后机械臂各关节的角速度,进而避免混合体控制问题的关节限制与力矩限制,下一节通过仿真进行验证.

3 仿真

由以上假设可得到如下结论:当机械臂抓取空间目标时,为了使机械臂工作端与目标产生的碰撞力方向同以上三点确定的直线 L 重合,则碰撞力与工作端的角度应满足关系式(13),取空间机械臂的各参数如表 1 所示, $t = 0.1s$ 时发生碰撞,碰撞力

$F_h = 10000N, \gamma = 186^\circ$. 由公式 (11、12) 可取 $\theta_1 = 30^\circ, \theta_2 = -24^\circ$.

表1 机械臂模型参数

Table 1 Model Parameters

Parameters	m_i (kg)	l_i (m)	I_i (kgm ²)
Base	1000.0	4.0	1332
Link 1	100.0	2.0	33.3
Link 2	100.0	2.0	33.3

在碰撞力方向确定的情况下,按照本文推导的公式得到的机械臂构型进行目标抓取,基座姿态、耦合角动量与关节角速度均为微小量,此时,碰撞作用表现为对系统线动量的影响,如图 2-a、b、c、d 所示;当采用“Reaction Null Space”^[8]控制方法时,通过规划机械臂碰撞前构型,可有效的解决控制算法的关节、力矩限制问题,如图 2-c、d 所示,关节转速为微小量;从图 3、4 可知,当碰撞力方向与直线 L 有一定的偏差时,得到的基座姿态、耦合角动量及关节转角也处在可控范围之内. 所以,碰撞力方向不能准确判定的情况下,将碰撞力方向矢量控制在一定范围之内,可有效的减少碰撞后混合体控制的负担,有助于抓取操作的完成.

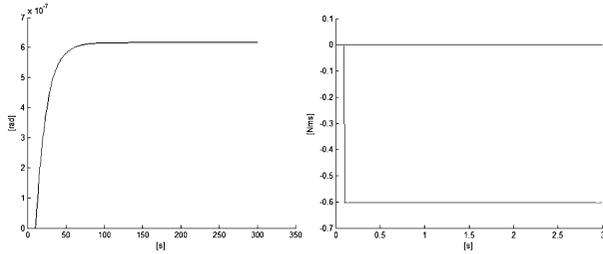


图 2-a 基座姿态

图 2-b 角动量

Fig. 2-a Base Attitude

Fig. 2-b Angular momentum

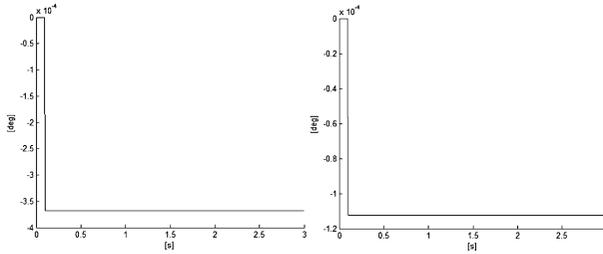


图 2-c 关节 1 角速度

图 2-d 关节 2 角速度

Fig. 2-c Joint1 Angular Velocity Fig. 2-d Joint2 Angular Velocity

相同碰撞力作用下,取 $\theta_1 = 30^\circ, \theta_2 = -30^\circ$, 仿真结果见图 3-a 至 3-d.

相同碰撞力作用下,取 $\theta_1 = 30^\circ, \theta_2 = -18^\circ$, 仿真结果见图 4-a 至 4-d.

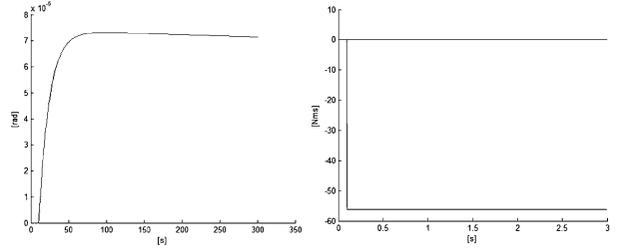


图 3-a 基座姿态

图 3-b 角动量

Fig. 3-a Base Attitude

Fig. 3-b Angular momentum

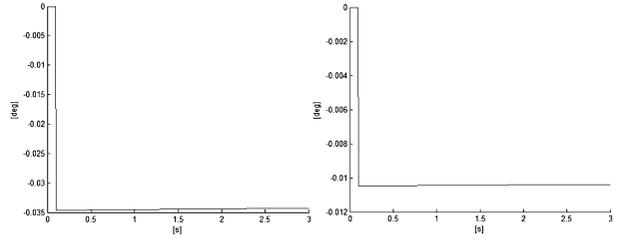


图 3-c 关节 1 角速度

图 3-d 关节 2 角速度

Fig. 3-c Joint1 Angular Velocity

Fig. 3-d Joint2 Angular Velocity

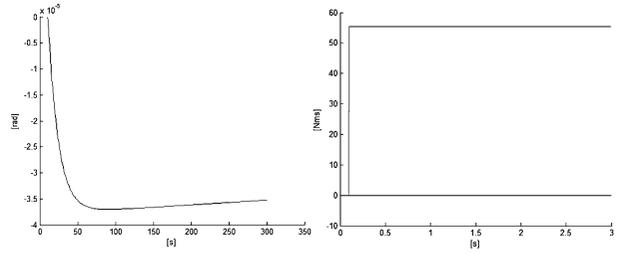


图 4-a 基座姿态

图 4-b 角动量

Fig. 4-a Base Attitude

Fig. 4-b Angular momentum

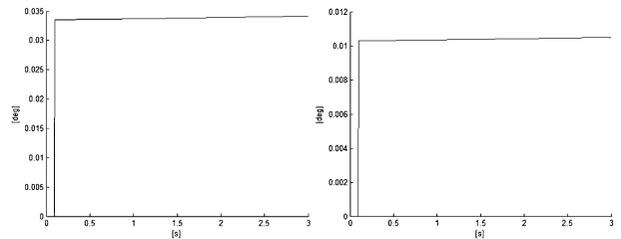


图 4-c 关节 1 角速度

图 4-d 关节 2 角速度

Fig. 4-c Joint1 Angular Velocity

Fig. 4-d Joint2 Angular Velocity

4 结论

本文对空间机械臂系统与目标体时的碰撞问题进行了研究,提出了“直臂抓取”概念,推导了满足基座质心、系统质心及工作端点共线的机械臂构型,得出了碰撞力方向矢量与基座、系统质心重合的角度关系式,满足关系式的空间机械臂构型可有效的减少碰撞力对于系统角动量的影响,进而避免混合体控制问题的关节限制与力矩限制. 通过仿真

验证了方法的有效性.

参 考 文 献

- 1 Oda, M . Experiences and lessons learned from the ETS-VII robot satellite. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA. 2000
- 2 Kazuya Yoshida . Space robot dynamics and control to orbit, from orbit, and future. The Ninth International Symposium, Eds, J. M. Hollerbach and D. E. Koditschek, Springer, 2000; 449 ~ 456
- 3 邱志成. 柔性机械臂的变结构震动控制研究. 动力学与控制学报, 2007, 5(1): 62 ~ 67 (Qiu Zhicheng. Study on variable structure vibration control for flexible manipulator. *Journal of Dynamics and Control*, 2007, 5(1): 62 ~ 67 (in Chinese))
- 4 S. Dubowsky, M A Torres. Path planning for space manipulator to minimize spacecraft attitude disturbances. IEEE Int. C. on Robotics and Autom, Sacramento CA, 1991; 2552 ~ 2528
- 5 L B Wee, and M W Walker. On the dynamics of contact between space robots and configuration control for impact minimization. *IEEE Trans. on Robot. and Automat*, 1999, 9: 581 ~ 591
- 6 M W Walker, and D M Kim. Satellite stabilization using space leeches. Proc. IEEE Amer. Contr. Conf. , San Diego, CA, 1990; 1314 ~ 1319
- 7 K Yoshida, H Nakanishi, H Ueno, N Inaba, T Nishimaki, and M Oda. Dynamics, control and impedance matching for robotic capture of a non-cooperative satellite. *Advanced Robotics*, 2004, 2(2): 175 ~ 198
- 8 D N Nenchev, and K Yoshida. Reaction null-space control of flexible structure mounted manipulator systems. *IEEE Trans. on Robot. and Automat*, 1999, 15(6): 1011 ~ 1023
- 9 D N Nenchev, and K Yoshida. Impact analysis and post-impact motion control issues of a free-floating space robot subject to a force impulse. *IEEE Trans. On Robot. and Automat*, 1999, 15(6): 548 ~ 557
- 10 S Matunaga, T Kanzawa, and Y Ohkami. Rotational motion-damper for the capture of an uncontrolled floating satellite. *Cont. Eng. Practice*, 2001, 9: 199 ~ 205
- 11 Y Nakamura, F Sasaki, and S Nakasuka. Guidance and control of "Tethered retriever" for future on-orbit service missions. 24th ISTS, Miyazaki, Japan, 2004
- 12 Y Xu and T Kanade. Space robotics: dynamics and control. Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7929265-5, 1992

THE RESEARCH OF IMPACT ISSUES DURING SINGLE -ARM SPACE MANIPULATOR CAPTURING OBJECT *

Cong Peichao Sun Zhaowei

(*Research Center of Satellite Technology, Harbin 150080, China*)

Abstract Based on momentum conservation, the impact issues of space manipulator during capture operation were analyzed, and the concept of "straight-arm capture" and "generalized straight-arm capture" was proposed. The manipulator configuration, which can meet the requirement on the centroid of base and system, and on end-effector in a line was derived, and the corresponding angular relationship was obtained. The manipulator pre-impact configuration that satisfied the above relationship can reduce the effect of impact force on system's angular momentum, and avoid the limit of joint and torque when controlling the compound. The simulation show the effectiveness of the method.

Key words space manipulator, manipulator configuration, straight-arm capture, angular momentum