0254-6124/2011/31(2)-260–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Chen Zhihuang, Chen Li. Design for fuzzy variable structure controller of hybrid position and force control for dual-arm coordinated space robot systems. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(2): 260-268

# 漂浮基闭链双臂空间机器人抓持系统动力学及载荷力/位置混合控制的模糊变结构控制器设计 *

陈志煌 陈 力

(福州大学机械工程与自动化学院 福州 350108)

**摘 要** 讨论了载体位置、姿态均不受控制的漂浮基双臂空间机器人抓物系统的动力学建模和控制问题. 利用拉格朗日方法和牛顿欧拉法分别建立了双臂空间机器人及负载的非线性动力学模型, 结合空间机器人固有的特性及闭合链约束关系, 得到抓持系统合成动力学方程. 以此为基础, 考虑到空间机器人系统结构的复杂性及某些参数的变动性, 根据具有较强鲁棒性的变结构控制理论, 针对该抓持系统惯性空间轨迹跟踪设计了全局滑模控制方案及相应的 PI 内力控制方案, 从而达到位置、力的混合控制. 为克服滑模控制器抖振的缺点, 附加设计了模糊控制器, 根据系统的输出来动态调节滑模控制器的参数, 从而既可确保系统的快速响应又可降底原有的抖振. 系统数值仿真证明了上述控制方案的有效性与准确性.

**关键词** 漂浮基, 闭链双臂空间机器人, 模糊变结构控制, 力/位置混合控制

**中图法分类号** V 42, TP 241

# Design for Fuzzy Variable Structure Controller of Hybrid Position and Force Control for Dual-arm Coordinated Space Robot Systems

CHEN Zhihuang CHEN Li

(*College of Mechanical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou* 350108)

**Abstract** A kind of nonlinear dynamics model of free-floating dual-arm space robot system is based on Lagrange method, and the dynamics model of object is presented based on Newton-Euler method. Based on the results and closed kinematic chain constraints, the dynamics model of synthetical system is obtained, and the control problems for object to track the desired trajectory in workspace and adjustment of interactive forces due to the interaction between the object and the end-effectors are discussed. Because of the high complexity of structure and the uncertainty of parameter of such systems, the scheme of variable structure global sliding-mode control with better robustness to uncertainty and disturbance is proposed to track the desired trajectory of object, and the corresponded scheme of internal forces control is proposed synchronously. Therefore, the object position and internal forces can be regulated simultaneously. A fuzzy controller is designed to reduce shiver due to the

* 国家自然科学基金项目 (10672040, 11072061) 和福建省自然科学基金项目 (2010J01003) 共同资助

2009-11-23 收到原稿, 2010-12-20 收到修定稿

E-mail: zhihuang2005@126.com, chnle@fzu.edu.cn

inherent defect of sliding-mode control and ensure rapid response. The fuzzy controller can tune the sliding-mode control law parameters automatically according to the relationship between the system state and switch surface. The effect of the controllers is testified by computer simulation.

**Key words** Free-floating, Dual-arm space robot with closed chain, Fuzzy variable structure control, Hybrid force and position control

## 1 引言

空间技术的发展及空间任务的不断增多, 使得利用空间机器人代替宇航员去完成各类空间任务操作成为太空活动的必然选择, 因此其相关动力学与控制问题的研究引起了广泛关注 [1−4]. 出于加大负载能力、提高载荷定位精度及多任务操作的需求, 双臂甚至多臂空间机器人的使用成为空间机器人发展的必然趋势. 但目前相关研究并不很多, 且主要以运动学规划为主 [5−9], 有关控制问题的研究较少. 尤其值得注意的是, 其中多是针对开环双臂、多臂空间机器人系统的, 有关闭环双臂、多臂空间机器人控制问题的研究更少. 这是由于闭环抓持机器人系统控制过程中既存在闭链约束几何关系, 又存在抓持内力的均衡配置问题, 即表现为力/位置混合控制问题; 即使对于相应的地面固定机器人系统, 其控制系统设计问题的难度也非常大, 相关研究并不多; 而在漂浮基闭链双臂、多臂空间机器人系统中, 还要更进一步耦合系统动量及动量矩守恒关系, 其控制系统设计问题将更加困难, 因此相关研究非常少. 然而正如前述, 双臂、多臂空间机器人的使用是为加大空间机器人的负载能力, 提高载荷定位精度, 因此闭链双臂、多臂空间机器人抓持系统的动力学与控制问题, 是空间机器人技术中必须涉及和需要解决的关键问题, 具有重要的理论与实际意义.

由于空间机器人所处的特殊外太空失重环境, 使其具有与地面机器人系统显著不同的动力学与控制特点. 地面机器人的控制方法很难直接推广应用于空间机器人系统, 当系统存在不确定、未知参数及外部干扰时, 问题表现得尤其突出. 文献 [10–12] 分别讨论了漂浮基空间机器人系统的自适应控制、鲁棒控制、鲁棒混合自适应等控制方案. 然而这些控制方案有一个共同点, 即要求系统动力学方程满足关于惯性参数的线性函数关系. 这一要求对抓持目标负载后的闭链双臂空间机器人合成系统来说很难达到. 鉴于滑模控制是一种特殊的鲁棒控制, 其滑动模态对匹配不确定性、外部干扰、时滞和非线性都具有鲁棒性. 采用滑模控制器处理系统和环境的不确定性, 可摆脱上述要求的束缚, 滑模控制的缺点是存在抖振和需知不确定参数上下界等问题. 模糊控制无需建立数学模型, 其控制机理符合人们对过程控制作用的直观描述和逻辑思维, 与滑模控制之间具有很强的互补性. 因此本文基于模糊滑模控制原理, 探讨了闭链双臂空间机器人抓持系统的力/位置混合控制问题. 根据漂浮基空间机器人固有的动量及动量矩守恒特性及闭合链约束几何关系, 推导了闭链双臂空间机器人的系统广义运动 Jacobi 矩阵, 并利用拉格朗日方法及牛顿–欧拉法, 分别建立了双臂空间机器人及抓持负载的非线性动力学模型, 综合运动 Jacobi 关系建立了抓持系统合成动力学方程. 以此为基础, 考虑到空间机器人系统结构的复杂性及某些参数的变动性, 根据具有较强鲁棒性的变结构控制理论和 Lyapunov 稳定理论, 针对该抓持系统惯性空间轨迹跟踪设计了全局滑模控制方案及相应的 PI 内力控制方案, 从而达到位置、力的混合控制. 为克服滑模控制器抖振的缺点, 附加设计了模糊控制器, 根据系统的输出动态调节滑模控制器的参数, 从而既可确保系统的快速响应, 又可减少原有的抖振. 系统数值仿真证明了上述控制方案的有效性与准确性.

## 2 系统运动 Jacobi 关系

不失一般性, 考虑做平面运动的闭链双臂空间机器人抓持系统, 系统结构如图 1 所示. 设系统由自由漂浮的载体 $B_0$ 与机械臂 $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$ 以及负载 $B_{\rm p}$ 组成. 建立平动的惯性坐标系 $(Oxy)$, 以及各机械臂 $B_i$ $(i = 0, 1, \cdots, 6)$ 的主轴连体坐标系 $(O_i x_i y_i)$; 其中 $O_0$ 与 $B_0$ 的质心 $c_0$ 重合, $O_i$ $(i = 0, 1, \cdots, 6)$ 为机械臂 $B_i$ 的关节铰点. 机械臂 $B_i$ $(i = 0, 1, \cdots, 6)$ 沿 $x_i$ 轴的长度为 $l_i$, 其质心 $c_i$ 在 $x_i$

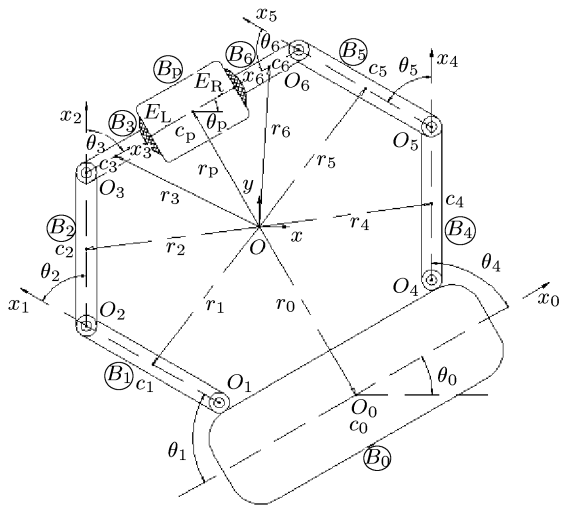


图 1 双臂空间机器人抓持系统

Fig. 1 Dual-arm space robot grasping system with closed-chain

轴上与 $O_i$ 的距离为 $d_i$, 相对于惯性坐标系原点 $O$ 的矢径为 $\boldsymbol{r}_i$. 设载体质心 $O_{\rm c0}$ 与 $O_1$, $O_4$ 的距离相同, 均为 $d_0$, 相对于惯性坐标系原点 $O$ 的矢径为 $\boldsymbol{r}_0$. 负载主轴与两爪手连线 $E_{\rm L}$ 和 $E_{\rm R}$ 重合, 质心 $c_{\rm p}$ 与 $E_{\rm L}$, $E_{\rm R}$ 的距离分别为 $d_{\rm L}$, $d_{\rm R}$, 质量和中心转动惯量为 $m_{\rm p}$, $J_{\rm p}$, 相对于惯性坐标系原点 $O$ 的矢径为 $\boldsymbol{r}_{\rm p}$. 各分体的质量和中心转动惯量分别为 $m_i, J_i$ $(i=0,1,\cdots,6)$.

忽略微弱的重力梯度, 漂浮基闭环双臂空间机器人抓持系统为无外力作用的自由浮动无根多体系统, 遵守对 $(Oxy)$ 的线动量守恒及对 $O$ 点的角动量守恒关系. 不失一般性, 设系统的初始线动量及角动量均为零, 则有

$$\begin{aligned}&\Big(\sum_{i=0}^{6} m_i\dot{\boldsymbol{r}}_i\Big)+m_{\rm p}\dot{\boldsymbol{r}}_{\rm p}=0,\\&\sum_{i=0}^{6}(J_i\boldsymbol{\omega}_i+\boldsymbol{r}_i\times m_i\dot{\boldsymbol{r}}_i)+(J_{\rm p}\boldsymbol{\omega}_{\rm p}+\boldsymbol{r}_{\rm p}\times m_{\rm p}\dot{\boldsymbol{r}}_{\rm p})=0.\end{aligned}\tag{1}$$

其中, $\boldsymbol{\omega}_i$ $(i=0,1,\cdots,6,{\rm p})$ 为第 $i$ 个分体的绝对角速度. 式 (1) 两式可联合写为

$$\dot{\boldsymbol{q}}_{\rm b}=\boldsymbol{J}_{\rm s}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}_{\rm r}.\tag{2}$$

其中,

$$\begin{aligned}\boldsymbol{q}_{\rm b}&=(\,x_0\quad y_0\quad \theta_0\,)^{\rm T},\\ \boldsymbol{q}_{\rm r}&=(\,\theta_1\quad\theta_2\quad\theta_3\quad\theta_4\quad\theta_5\quad\theta_6\,)^{\rm T},\end{aligned}$$

分别为双臂空间机器人载体的广义位置变量和机械臂各关节铰变量; $\boldsymbol{q}=(\,\boldsymbol{q}_{\rm b}^{\rm T}\quad\boldsymbol{q}_{\rm r}^{\rm T}\,)^{\rm T}$ 为 9 阶的系统广义坐标列阵, $\boldsymbol{J}_{\rm s}(\boldsymbol{q})$ 为 $3\times6$ 阶矩阵.

根据系统位置几何关系, 可得双臂空间机器人两末端执行器 $E_{\rm L}$, $E_{\rm R}$ 在惯性坐标系 $(Oxy)$ 中的位置坐标, 对时间求导, 并结合式 (2) 整理后表示为矩阵形式, 得到

$$\boldsymbol{v}_{\rm e}=\boldsymbol{J}_{\rm e}\dot{\boldsymbol{q}}_{\rm r}.\tag{3}$$

式 (3) 中,

$$\begin{aligned}\boldsymbol{v}_{\rm e}&=(\,\boldsymbol{v}_{\rm eL}^{\rm T}\quad\boldsymbol{v}_{\rm eR}^{\rm T}\,)^{\rm T};\\ \boldsymbol{v}_{\rm eL}&=(\,\dot{x}_{\rm L}\quad\dot{y}_{\rm L}\quad\dot{\theta}_{\rm L}\,)^{\rm T},\\ \boldsymbol{v}_{\rm eR}&=(\,\dot{x}_{\rm R}\quad\dot{y}_{\rm R}\quad\dot{\theta}_{\rm R}\,)^{\rm T}\end{aligned}$$

分别为左、右臂末端执行器的广义速度; $\boldsymbol{J}_{\rm e}\in\boldsymbol{R}^{6\times6}$ 为双臂空间机器人的系统广义运动 Jacobi 矩阵, 其元素 $J_{eij}$ $(i,j=1,\cdots,6)$ 为由系统广义坐标 $\theta_0$, $\theta_1,\cdots,\theta_6$ 的正弦、余弦组成的函数.

## 3 动力学方程

为了后面控制系统设计的需要, 将闭链双臂空间机器人抓持系统虚拟拆分为两部分: 双臂空间机器人部分和被抓持的载荷部分. 两者之间通过相互间的作用力、作用力矩及反作用力、反作用力矩建立联系, 并分别建立拆分后双臂空间机器人部分和被抓持载荷部分的系统动力学方程.

### 3.1 拆分后的双臂空间机器人动力学方程

拆分后双臂空间机器人系统结构及受力情况如图 2 所示. 根据拉格朗日方程, 拆分后双臂空间机器人系统动力学方程可以写为如下欠驱动形式:

$$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})=(\,\boldsymbol{0}^{\rm T}\quad\boldsymbol{\tau}^{\rm T}\,)^{\rm T}+\boldsymbol{J}^{\rm T}\boldsymbol{F}.\tag{4}$$

其中, $\boldsymbol{D}(\boldsymbol{q})\in\boldsymbol{R}^{9\times9}$ 为对称、正定的系统质量矩阵; $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\in\boldsymbol{R}^{9\times1}$ 为包含哥氏力、离心力的广义力矢量; $\boldsymbol{\tau}=(\,\tau_1\quad\tau_2\quad\cdots\quad\tau_6\,)^{\rm T}$ 为机械臂 6 个关节铰控制力矩组成的 6 阶列阵;

$$\boldsymbol{J}^{\rm T}=(\,\boldsymbol{J}_{\rm L}^{\rm T}\quad\boldsymbol{J}_{\rm R}^{\rm T}\,)\in\boldsymbol{R}^{9\times6}$$

为力 Jacobi 矩阵, $\boldsymbol{J}_{\rm L}$ 和 $\boldsymbol{J}_{\rm R}$ 则分别为 $3\times9$ 阶的载体质心到两末端爪手的运动 Jacobi 矩阵;

$$\boldsymbol{F}=(\,\boldsymbol{F}_{\rm L}^{\rm T}\quad\boldsymbol{F}_{\rm R}^{\rm T}\,)^{\rm T},$$

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{L}} = (\, F_{\mathrm{L}x} \quad F_{\mathrm{L}y} \quad M_{\mathrm{L}} \,)^{\mathrm{T}},$$
$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{R}} = (\, F_{\mathrm{R}x} \quad F_{\mathrm{R}y} \quad M_{\mathrm{R}} \,)^{\mathrm{T}}$$

为由负载分别作用在两末端爪手上的力与力矩构成的力矩阵.

式 (4) 可分解写为

$$(\boldsymbol{D}_{33} \quad \boldsymbol{D}_{36})\ddot{\boldsymbol{q}} + (\boldsymbol{E}_3 \quad \boldsymbol{0})\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) = (\boldsymbol{E}_3 \quad \boldsymbol{0})\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}, \tag{5}$$

$$(\,\boldsymbol{D}_{63} \quad \boldsymbol{D}_{66}\,)\,\ddot{\boldsymbol{q}} + (\,\boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{E}_6\,)\,\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) = \boldsymbol{\tau} + (\,\boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{E}_6\,)\,\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}. \tag{6}$$

其中, $\boldsymbol{D}_{33}$ 和 $\boldsymbol{D}_{66}$ 分别为 $3\times3$ 和 $6\times6$ 阶的对称子矩阵, $\boldsymbol{D}_{36}$ 和 $\boldsymbol{D}_{63}$ 分别为 $3\times6$ 和 $6\times3$ 阶子矩阵, 且有 $\boldsymbol{D}_{36}=\boldsymbol{D}_{63}^{\mathrm{T}}$; $\boldsymbol{E}_3$ 和 $\boldsymbol{E}_6$ 分别为 $3\times3$ 和 $6\times6$ 阶的单位阵, $\boldsymbol{0}$单元项为相应的零矩阵.

由式 (5), 可以得到

$$\ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{b}} = \boldsymbol{D}_{33}^{-1}[-\boldsymbol{D}_{36}\ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} - (\,\boldsymbol{E}_3 \quad \boldsymbol{0}\,)\,\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) + (\,\boldsymbol{E}_3 \quad \boldsymbol{0}\,)\,\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}]. \tag{7}$$

将式 (7) 代入式 (6), 得到拆分后完全驱动形式的如下双臂空间机器人系统动力学方程:

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} + \boldsymbol{N}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}. \tag{8}$$

其中,

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}) = -\boldsymbol{D}_{63}\boldsymbol{D}_{33}^{-1}\boldsymbol{D}_{36} + \boldsymbol{D}_{66},$$
$$\boldsymbol{N}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) = [(\,\boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{E}_6\,) - \boldsymbol{D}_{63}\boldsymbol{D}_{33}^{-1}\,(\,\boldsymbol{E}_3 \quad \boldsymbol{0}\,)]\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}),$$
$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}} = [(\,\boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{E}_6\,) - \boldsymbol{D}_{63}\boldsymbol{D}_{33}^{-1}\,(\,\boldsymbol{E}_3 \quad \boldsymbol{0}\,)]\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}.$$

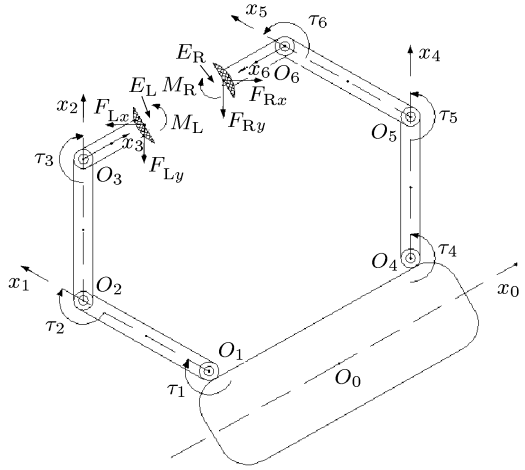


图 2 拆分后双臂空间机器人结构、受力情况

Fig. 2 Structure and force sketch of space manipulators

### 3.2 拆分后被抓持负载的动力学方程

拆分后被抓持负载的结构与受力情况如图 3 所示, 其中 $E'_{\mathrm{L}}$, $E'_{\mathrm{R}}$ 分别为负载上与双臂空间机器人两末端执行器 $E_{\mathrm{L}}$, $E_{\mathrm{R}}$ 重合的点. 根据牛顿–欧拉法及负载位置几何关系, 可建立拆分后被抓持负载如下形式的系统动力学方程:

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}}\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}} = \boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}F'. \tag{9}$$

其中, $\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}} = \mathrm{diag}\,(\,m_{\mathrm{p}} \quad m_{\mathrm{p}} \quad \boldsymbol{J}_{\mathrm{p}}\,)$ 为负载对称、正定质量矩阵, $\boldsymbol{X}_{\mathrm{p}} = (\,x_{\mathrm{p}} \quad y_{\mathrm{p}} \quad \theta_{\mathrm{p}}\,)^{\mathrm{T}}$ 为负载相对于惯性坐标系的位置和姿态矢量;

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}} = (\,\boldsymbol{J}_{\mathrm{peL}}^{\mathrm{T}} \quad J_{\mathrm{peR}}^{\mathrm{T}}\,) \in \boldsymbol{R}^{3\times6}$$

为抓持矩阵, 即两爪手施加在负载上的广义力等效到负载质心的转换矩阵, 式中 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{peL}}$ 和 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{peR}}$ 分别为负载质心到 $E'_{\mathrm{L}}$, $E'_{\mathrm{R}}$ 的 $3\times3$ 阶 Jacobi 矩阵;

$$\boldsymbol{F}' = (\,\boldsymbol{F}_{\mathrm{L}}'^{\mathrm{T}} \quad \boldsymbol{F}_{\mathrm{R}}'^{\mathrm{T}}\,)^{\mathrm{T}},$$

式中

$$\boldsymbol{F}'_{\mathrm{L}} = (\,F'_{\mathrm{L}x} \quad F'_{\mathrm{L}y} \quad M'_{\mathrm{L}}\,)^{\mathrm{T}},$$
$$\boldsymbol{F}'_{\mathrm{R}} = (\,F'_{\mathrm{R}x} \quad F'_{\mathrm{R}y} \quad M'_{\mathrm{R}}\,)^{\mathrm{T}}$$

分别为两末端爪手作用在负载上的力与力矩构成的力矩阵. 显然 $\boldsymbol{F}$ 与 $\boldsymbol{F}'$ 是一对作用力与反作用力, 即 $\boldsymbol{F} = -\boldsymbol{F}'$.

由式 (9) 可以得到

$$\boldsymbol{F}' = (\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}})^{+}\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}}\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}} + \boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}. \tag{10}$$

其中, $(\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}})^{+} = \boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}(\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}})^{-1}$ 为 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}$ 的伪逆, 而 $(\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}})^{+}\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}}\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}}$ 即为操作力项, $\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}$ 则为内力项 [13], 定义在 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}$ 的零空间内, 存在关系 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}} = 0$.

假定末端爪手与负载刚性接触且无相对运动, 则

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{e}}\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} = \boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}}. \tag{11}$$

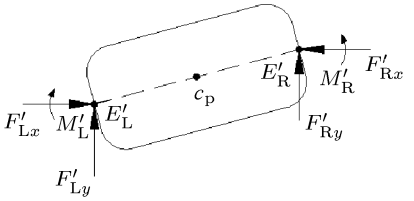


图 3 负载结构及受力情况

Fig. 3 Structure and force sketch of grasped object

将式 (11) 两边对时间求导并整理后, 得到

$$\ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} = \boldsymbol{J}_{\mathrm{e}}^{-1}(\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}} + \dot{\boldsymbol{J}}_{\mathrm{pe}}\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}} - \dot{\boldsymbol{J}}_{\mathrm{e}}\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}}). \tag{12}$$

### 3.3 闭链双臂空间机器人抓持系统合成动力学方程

将式 (10) 和式 (12) 代入式 (8) 并利用作用力与反作用力关系, 简化后得到闭链双臂空间机器人抓持系统合成动力学方程:

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{p}}\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}} + \boldsymbol{B}_{\mathrm{p}} = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}. \tag{13}$$

其中,

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{p}} = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{J}_{\mathrm{e}}^{-1}\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}} + \boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}})^{+}\boldsymbol{H}_{\mathrm{p}},$$
$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{p}} = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{J}_{\mathrm{e}}^{-1}(\dot{\boldsymbol{J}}_{\mathrm{pe}}\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}} - \dot{\boldsymbol{J}}_{\mathrm{e}}\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}}) + \boldsymbol{N}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}).$$

## 4 系统力/位置混合控制方案设计

考虑到空间机器人系统结构的复杂性及外太空的极端恶劣工作环境, 系统存在动力学参数的变动性及外部干扰等不确定因素是不可避免的. 诸如液体控制燃料的晃动、质量变化, 太阳风、粒子射线流、机械臂关节间的摩擦力矩及噪声等都可能造成上述不确定因素的存在. 当抓取未知目标载荷时参数变动及外部干扰等不确定因素表现得更为突出. 因此, 能够对上述不确定因素保持鲁棒性的闭链空间机器人控制系统设计显得尤为重要. 为此, 针对闭链双臂空间机器人抓持系统动力学模型存在不确定性的情况, 根据具有较强鲁棒性的滑模变结构控制理论, 设计了双臂空间机器人姿态、关节协调运动的滑模变结构控制方案. 为克服滑模变结构控制器抖振的缺点, 附加设计了一个模糊控制器, 以根据系统的输出来动态调节滑模变结构控制器的增益系数, 从而既可确保系统的快速响应又可减少原有的抖振. 考虑滑模和模糊控制各自的特点及互补性, 下面讨论抓持系统基于模糊滑模的位置、力混合控制方案的设计.

设 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{d}} = (\,x_{\mathrm{p}}^{\mathrm{d}} \quad y_{\mathrm{p}}^{\mathrm{d}} \quad \theta_{\mathrm{p}}^{\mathrm{d}}\,)^{\mathrm{T}}$ 为抓持负载在惯性空间的期望运动, 并定义

$$\boldsymbol{e}_{\mathrm{p}} = (\,e_{x\mathrm{p}} \quad e_{y\mathrm{p}} \quad e_{\theta\mathrm{p}}\,)^{\mathrm{T}} = (\boldsymbol{X}_{\mathrm{p}} - \boldsymbol{X}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{d}})$$

为其在惯性空间的位置和姿态跟踪误差,

$$\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}} = (\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}} - \dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{d}})$$

为相应的速度跟踪误差.

定义全局滑模函数为

$$\boldsymbol{s} = \boldsymbol{s}_{\mathrm{r}} - \boldsymbol{\delta}(\boldsymbol{t}). \tag{14}$$

其中,

$$\boldsymbol{s}_{\mathrm{r}} = \dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}} + \boldsymbol{c}\boldsymbol{e}_{\mathrm{p}},$$
$$\boldsymbol{c} = \mathrm{diag}\,(\,c_1 \quad c_2 \quad c_3\,), \quad c_i > 0 \quad (i = 1,2,3).$$

为了全局滑模系统的渐近稳定, 在函数 $\boldsymbol{\delta}(t)$ 的选取中要求其必须满足如下三个条件.

**条件 1** $\boldsymbol{\delta}(0) = \boldsymbol{s}_{\mathrm{r}}(0)$, $\boldsymbol{s}_{\mathrm{r}}(0)$ 为 $\boldsymbol{s}_{\mathrm{r}}$ 初始时刻值.

**条件 2** $\boldsymbol{\delta}(t) \to 0$, 当 $t \to \infty$.

**条件 3** $\boldsymbol{\delta}(t)$ 一阶可导.

事实上, 条件 1 的存在在于使系统初始状态位于滑模面 ($\boldsymbol{s} = 0$) 上, 条件 2 在于保证闭环系统的稳定, 条件 3 是滑模函数对时间一阶导 $\dot{s}$ 存在的前提. 根据上述分析, 可将函数 $\delta(t)$ 定义为

$$\boldsymbol{\delta}(t) = \boldsymbol{s}_{\mathrm{r}}(0)\exp(-\lambda t), \quad \lambda > 0, \tag{15}$$

由变结构控制原理, 设计如下对系统模型不确定性具有鲁棒性的、闭链双臂空间机器人抓持系统基于全局滑模的力/位置混合控制律:

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}[\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{d}} - \boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}} - \boldsymbol{\varepsilon}\,\mathrm{sgn}\,\boldsymbol{s} + \dot{\boldsymbol{\delta}}(t)] + \hat{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{p}} + \boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{d}}. \tag{16}$$

其中, $\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}$ 和 $\hat{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{p}}$ 分别为 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{p}}$ 和 $\boldsymbol{B}_{\mathrm{p}}$ 的不精确估计,

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathrm{diag}\,(\,\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3\,), \quad \varepsilon_i > 0 \quad (i = 1,2,3);$$

$\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{d}}$ 为内力的期望值, 定义在 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}$ 的零空间内, 即有 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{d}} = 0$.

将式 (16) 代入式 (13), 整理可得

$$\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}[\ddot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}} + \boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}} + \boldsymbol{\varepsilon}\,\mathrm{sgn}\,\boldsymbol{s} - \dot{\boldsymbol{\delta}}(t)] = (\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}} - \boldsymbol{A}_{\mathrm{p}})\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}} + (\hat{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{p}} - \boldsymbol{B}_{\mathrm{p}}) + \boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{d}} - \boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}). \tag{17}$$

若 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}}$ 非奇异, 并注意内力 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}$ 和 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{d}}$ 均定义在 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}$ 的零空间内, 将式 (17) 等号两边同时左乘 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}$, 整理后可得

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}[\ddot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}} + \boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}} + \boldsymbol{\varepsilon}\,\mathrm{sgn}\,\boldsymbol{s} - \dot{\boldsymbol{\delta}}(t)] = \boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}[(\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}} - \boldsymbol{A}_{\mathrm{p}})\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}} + (\hat{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{p}} - \boldsymbol{B}_{\mathrm{p}})]. \tag{18}$$

继续整理式 (18), 得到

$$\ddot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}} + \boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}} + \boldsymbol{\varepsilon}\,\mathrm{sgn}\,\boldsymbol{s} - \dot{\boldsymbol{\delta}}(t) =$$

$$[\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}]^{-1}\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}\cdot$$
$$[(\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{A}_{\mathrm{p}})\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}}+(\hat{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{B}_{\mathrm{p}})]. \tag{19}$$

令

$$\boldsymbol{w}(\boldsymbol{X}_{\mathrm{p}},\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}},\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}})=$$
$$[\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}]^{-1}\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}$$
$$[(\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{A}_{\mathrm{p}})\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}}+(\hat{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{B}_{\mathrm{p}})],$$

并假设 $\boldsymbol{w}$ 的范数收敛于已知正函数 $\rho_{\mathrm{w}}(\boldsymbol{X}_{\mathrm{p}},\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}},\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}})$, 即有

$$||\boldsymbol{w}||\leqslant\rho_{\mathrm{w}}(\boldsymbol{X}_{\mathrm{p}},\dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}},\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}}), \tag{20}$$

于是, 式 (19) 可写为

$$\ddot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}+\boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}+\boldsymbol{\varepsilon}\,\mathrm{sgn}\,\boldsymbol{s}-\dot{\boldsymbol{\delta}}(t)=\boldsymbol{w}. \tag{21}$$

下面分析式 (21) 的稳定性. 选取如下 Lyapunov 函数

$$V=\frac{1}{2}\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}. \tag{22}$$

显然, 当 $\boldsymbol{s}\neq 0$, $V>0$.

对式 (22) 求时间 $t$ 的全导数, 并利用式 (14), (20) 及 (21), 得到

$$\dot{V}=\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{s}}=$$
$$\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}[\ddot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}+\boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}-\dot{\boldsymbol{\delta}}(t)]=$$
$$\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{w}-\boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{\varepsilon}\,\mathrm{sgn}\,\boldsymbol{s}+\dot{\boldsymbol{\delta}}(t)+\boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}-\dot{\boldsymbol{\delta}}(t)]\leqslant$$
$$\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{w}-\varepsilon_i\|\boldsymbol{s}\|\leqslant$$
$$\|\boldsymbol{w}\|\cdot\|\boldsymbol{s}\|-\varepsilon_i\|\boldsymbol{s}\|\leqslant$$
$$(\rho_{\mathrm{w}}-\varepsilon_i)\|\boldsymbol{s}\|. \tag{23}$$

显然, 当 $\varepsilon_i\geqslant\rho_{\mathrm{w}}+\eta$ ($\eta>0$) 时, $\dot{V}\leqslant-\eta\|\boldsymbol{s}\|$, 即式 (21) 所表示的系统渐近稳定.

由于抓持系统要求输出的是力与位置的混合控制, 因此在控制系统设计中除要保证上述系统渐近稳定外, 还必须同时考虑内力误差的收敛性问题. 为此, 定义 $\boldsymbol{e}_{\mathrm{f}}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}-\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{d}}$ 为内力跟踪误差, 则由式 (17) 可以得到

$$\boldsymbol{e}_{\mathrm{f}}=(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}[(\boldsymbol{E}_6-\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}^{+}\boldsymbol{A}_{\mathrm{p}})\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}}+\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}^{+}(\hat{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{B}_{\mathrm{p}})]-$$
$$(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}[\ddot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}+\boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}+\boldsymbol{\varepsilon}\,\mathrm{sgn}\,\boldsymbol{s}-\dot{\boldsymbol{\delta}}(t)]. \tag{24}$$

其中, $\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}^{+}=\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{T}}(\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{T}})^{-1}$ 为 $\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}$ 的伪逆阵.

考虑负载物体一般是缓慢平稳运动的情况, 即有 $\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}}=0$, 因此 $\ddot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}$ 有界. 式 (24) 可简化为

$$\boldsymbol{e}_{\mathrm{f}}=(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}[\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}^{+}(\hat{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{B}_{\mathrm{p}})]-$$
$$(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}[\ddot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}+\boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}+\boldsymbol{\varepsilon}\,\mathrm{sgn}\,\boldsymbol{s}-\dot{\boldsymbol{\delta}}(t)]. \tag{25}$$

令 $\bar{\boldsymbol{w}}=\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}^{+}(\hat{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{B}_{\mathrm{p}})$, 并假定 $\bar{\boldsymbol{w}}$ 有界, 即存在

$$||\bar{\boldsymbol{w}}||\leqslant\rho_{\bar{\mathrm{w}}}. \tag{26}$$

对式 (26) 两边取范数, 可以得到

$$\|\boldsymbol{e}_{\mathrm{f}}\|=\|(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}\{[\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}^{+}(\hat{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{B}_{\mathrm{p}})]-$$
$$[\ddot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}+\boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}+\boldsymbol{\varepsilon}\,\mathrm{sgn}\,\boldsymbol{s}+\lambda\boldsymbol{s}_{\mathrm{r}}(0)\exp(-\lambda t)]\}\|\leqslant$$
$$\|(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}\|\cdot\|\{[\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}^{+}(\hat{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{B}_{\mathrm{p}})]-$$
$$[\ddot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}+\boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}+\boldsymbol{\varepsilon}\,\mathrm{sgn}\,\boldsymbol{s}+\lambda\boldsymbol{s}_{\mathrm{r}}(0)\exp(-\lambda t)]\}\|\leqslant$$
$$\|(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}\|\cdot(\|\bar{\boldsymbol{w}}\|+\|\ddot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}\|+\|\boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}\|+$$
$$\|\boldsymbol{\varepsilon}\|+\lambda\exp(-\lambda t)\|\boldsymbol{s}_{\mathrm{r}}(0)\|)\leqslant$$
$$\|(\boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}})^{-1}\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}\|\cdot(\rho_{\bar{w}}+\|\ddot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}\|+\|\boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}\|+$$
$$\|\boldsymbol{\varepsilon}\|+\lambda\|\boldsymbol{s}_{\mathrm{r}}(0)\|). \tag{27}$$

因为 $\ddot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}$, $\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}$ 均有界, 所以内力误差 $\boldsymbol{e}_{\mathrm{f}}$ 有界.

在式 (21) 中, 切换增益 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是造成抖振的原因. $\boldsymbol{\varepsilon}$ 用于补偿不确定项 $\boldsymbol{w}$, 以保证滑模存在条件得到满足, 通常 $\boldsymbol{w}$ 是时变的, 为了降低抖振, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 也应该时变. 为此, 设计了一个由三个单输入、单输出的子模糊器系统构成的模糊控制器, 根据系统的输出动态调节 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的值, 以确保系统的快速响应并降低抖振. 该模糊控制器的第 $i$ 个子系统所起的作用是, 当 $s_i\dot{s}_i>0$ 时, $\varepsilon_i$ 必须增大, 使其值足以消除不确定项的影响, 以保证滑模存在条件得到满足; 当 $s_i\dot{s}_i<0$ 时, $\varepsilon_i$ 必须减小, 以降低系统的抖振. 其中, 每个子模糊滑模控制器均以 $s_i\dot{s}_i$ 为输入, $\Delta\varepsilon_i$ 为输出. 其结构如图 4 所示. 选用图 5 和图 6 所示的隶属度函数分别对输入变量 $s_i\dot{s}_i$ 和输出变量 $\Delta\varepsilon_i$ 进行模糊化处理, 图 4 中语言变量的基本值分别为: 正大 (PB), 正中 (PM), 正小 (PS), 零 (ZO), 负小 (NS), 负中 (NM), 负大 (NB). 采用表 1 所示的 IF-THEN 模糊规则进行模糊推理, 并选用面积重心法对输出变量 $\Delta\varepsilon_i$ 进行解模糊运算.

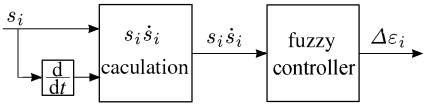


图 4 子模糊控制器结构

Fig. 4 Sub fuzzy controller structure

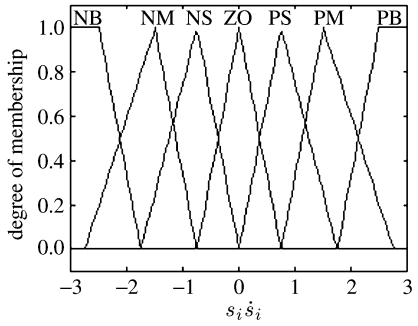


图 5 输入变量 $s_i\dot{s}_i$ 的隶属度函数

Fig. 5 Degree of membership of input $s_i\dot{s}_i$

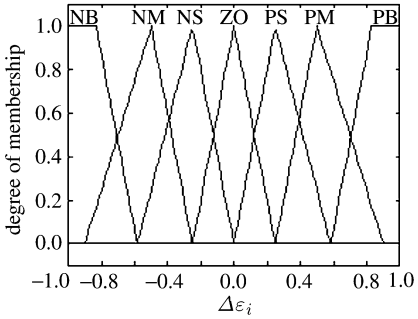


图 6 输出变量 $\Delta\varepsilon_i$ 的隶属度函数

Fig. 6 Degree of membership of input $\Delta\varepsilon_i$

**表 1 模糊推理规则**

**Table 1 Fuzzy rules**

| $s_i\dot{s}_i$ | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Delta\varepsilon_i$ | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |

采用积分的方法对切换增益 $\varepsilon$ 进行计算, 得到

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \boldsymbol{\varepsilon}_0 + \int_0^t \operatorname{diag}\left(\begin{array}{ccc}\Delta\varepsilon_1 & \Delta\varepsilon_2 & \Delta\varepsilon_3\end{array}\right)\mathrm{d}t. \tag{28}$$

式中, $\hat{\varepsilon}$ 表示 $\varepsilon$ 的时变值, $\varepsilon_0$ 表示 $\varepsilon$ 给定的初始值.

为了降低内力误差 $e_{\mathrm{f}}$ 的波动, 在上述控制方案中引入一个积分项, 于是, 滑模协调控制规律式 (16), 可改为表达基于模糊滑模的协调控制规律, 有

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}}[\ddot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{d}} - \boldsymbol{c}\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}} - \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}\operatorname{sgn}\boldsymbol{s} + \dot{\boldsymbol{\delta}}(t)] + \hat{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{p}} + \boldsymbol{J}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{d}} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{I}}\int \boldsymbol{e}_{\mathrm{f}}\mathrm{d}t\right). \tag{29}$$

其中, $\boldsymbol{K}_{\mathrm{I}}$ 为对称、正定的内力误差反馈增益矩阵. 因为内力 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}$ 和 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{d}}$ 定义在 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{pe}}^{\mathrm{T}}$ 的零空间内, 上述内力积分控制项的引入, 不会对负载的位置跟踪性能造成影响. 模糊控制器实际上是根据位置跟踪误差 $\boldsymbol{e}_{\mathrm{p}}$ 和速度跟踪误差 $\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{p}}$ 的动态来调节切换增益 $\boldsymbol{\varepsilon}$, 因此可以得到比较好的控制器品质. 在实际应用中, 上述过程也可以采用先离线计算, 然后再在线查找的方式来进行.

## 5 系统数值仿真

以作平面运动的自由漂浮双臂空间机器人抓持系统为例 (系统结构见图 1), 设载体的质量 $m_0 = 200\,\mathrm{kg}$, 惯量矩 $J_0 = 40\,\mathrm{kg{\cdot}m^2}$, $d_0 = 1.5\,\mathrm{m}$; 机械臂各杆的杆长

$$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_5 = l_6 = 1\,\mathrm{m},$$
$$d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = l_5 = d_6 = 0.5\,\mathrm{m},$$

各杆的质量

$$m_1 = m_4 = 15\,\mathrm{kg},$$
$$m_2 = m_5 = 10\,\mathrm{kg},$$
$$m_3 = m_6 = 5\,\mathrm{kg},$$

各杆的惯量矩

$$J_1 = J_4 = 3\,\mathrm{kg\cdot m^2},$$
$$J_2 = J_5 = 2\,\mathrm{kg\cdot m^2},$$
$$J_3 = J_6 = 1\,\mathrm{kg\cdot m^2};$$

负载的质量 $m_{\mathrm{p}} = 10\,\mathrm{kg}$, 惯量矩 $J_{\mathrm{p}} = 2\,\mathrm{kg{\cdot}m^2}$, $d_{\mathrm{L}} = d_{\mathrm{R}} = 0.5\,\mathrm{m}$. 假定 $\hat{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{p}} = 0.8\boldsymbol{A}_{\mathrm{p}}$, $\hat{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{p}} = 0.8\boldsymbol{B}_{\mathrm{p}}$, 采用式 (29) 基于模糊滑模的鲁棒协调控制规律进行仿真.

仿真时, 负载姿态的期望运动规律为

$$\theta_{\mathrm{p}}^{\mathrm{d}} = 0 \quad (\text{单位 rad}),$$

即负载姿态保持为 0 不变; 同时负载位置在惯性空间的期望轨迹为

$$x_{\mathrm{p}}^{\mathrm{d}} = 1.5 + 0.2\cos(t) \quad (\text{单位 m}),$$
$$y_{\mathrm{p}}^{\mathrm{d}} = 1.0 + 0.2\cos(t) \quad (\text{单位 m}).$$

其中, $t = 10\,\mathrm{s}$ 为整个追踪过程所用时间. 同时设内力及内力矩的期望值为

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{I}}^{\mathrm{d}} = (10\,\mathrm{N} \quad 0\,\mathrm{N} \quad 0\,\mathrm{N\cdot m} \quad -10\,\mathrm{N} \quad 0\,\mathrm{N} \quad 0\,\mathrm{N\cdot m})^{\mathrm{T}}$$

仿真过程中, 负载姿态角的初始值为 0.05 rad, 负载在惯性空间的初始位置为 (1.5500 m, 0.9988 m), $\boldsymbol{c} = 3\boldsymbol{E}_3$, $\varepsilon_0 = 3.5\boldsymbol{E}_3$, $\lambda = 2$, $\boldsymbol{K}_{\mathrm{I}} = 1.1\boldsymbol{E}_3$. 图 7 和图 8 为按控制规律式 (29) 得到的, 负载位置在惯性空间的实际轨迹 (实线) 与期望轨迹 (虚线) 的对比情况; 图 9 为按控制规律式 (29) 得到的负载姿态实际运动 (实线) 与期望运动 (虚线) 的对比情况; 图 10 和图 11 为按控制规律式 (29) 得到的合成系统内力实际值 (实线) 与期望值 (虚线) 的对比情况; 图 12 为开、关模糊控制器负载位姿的误差比较, 其中实线表示按控制规律式 (29) 得到的负载位姿误差情况, 虚线表示关闭模糊控制器, 仅用全局滑模控制器得到的负载位姿误差情况, 仿真结果表明了所提出的控制方案的有效性及准确性.

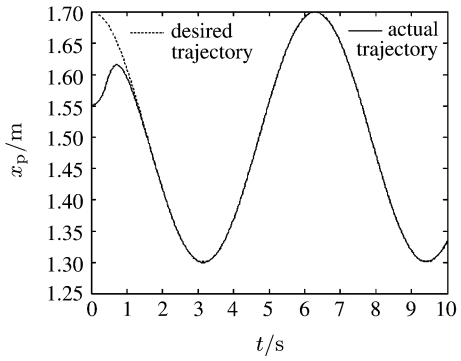


图 7 负载 $x$ 方向实际与期望运动轨迹的对比

Fig. 7 Actual and desired trajectory of grasped object in $x$ direction

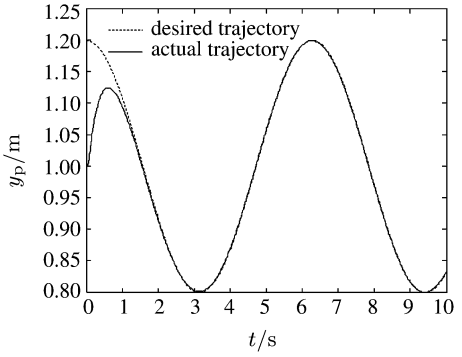


图 8 负载 $y$ 方向实际与期望运动轨迹的对比

Fig. 8 Actual and desired trajectory of grasped object in $y$ direction

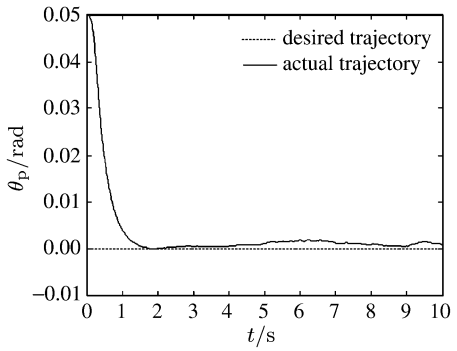


图 9 负载实际与期望姿态运动的对比

Fig. 9 Actual and desired orientation of grasped object

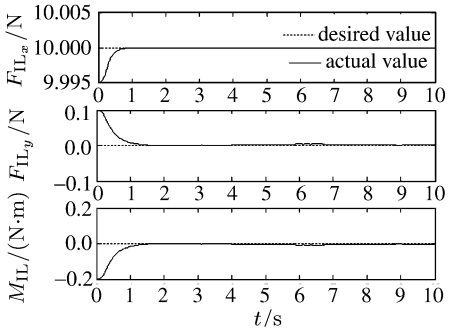


图 10 左端爪手内力实际与期望值的对比

Fig. 10 Actual and desired internal force value of left side of grasped object

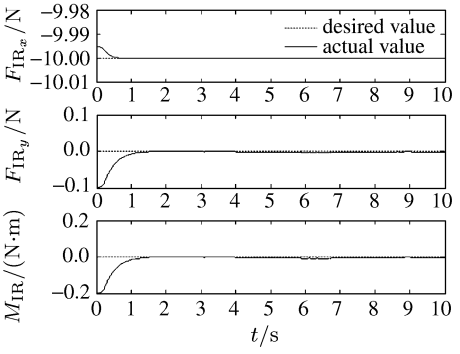


图 11 右端爪手内力实际与期望值的对比

Fig. 11 Actual and desired internal force value of right side of grasped object

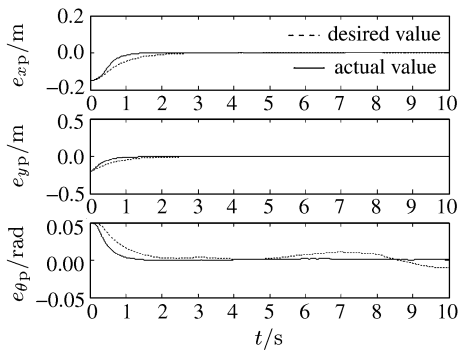


图 12 开、关模糊控制器负载位姿误差的对比

Fig. 12 Position and orientation tracing error curve on/off fuzzy controller

## 6 结论

结合全局滑模和模糊控制, 对漂浮基闭链双臂空间机器人抓持系统载荷位置与内力协调控制问题, 进行了基于模糊调节的滑模控制算法设计. 该控制算法不仅不要求系统动力学方程具有关于惯性参数的线性化性质, 且无需预知系统不确定部分的上界, 从而使得提到的控制方案更切合于在空间机器人系统的实际应用. 系统数值仿真, 证实了该控制算法的有效性.

## 参考文献

[1] Dubowsky S, Papadopoulos E. The kinematics, dynamics and control of free-flying and free-floating space robotic systems [J]. *IEEE Trans. Robot Autom.*, 1993, **9**(5):531-543

[2] Evans L. Canadian space robotics on board the international space station [G]//2005 CCToMM Symposium on Mechanisms, Machines, and Mechatronics. Canada: Canadian Space Agency, 2005. 26-27

[3] Ding Xilun, Liu Ying. Dynamic analysis of robot with spatial compliant links using Lie Group and Lie Algebra [J]. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2007, **43**(2):184-189. In Chinese (丁希仑, 刘颖. 用李群李代数分析具有空间柔性变形杆件的机器人动力学 [J]. 机械工程学报, 2007, **43**(2):184-189)

[4] Hong Zaidi, Yun Chao, Chen Li. Modeling and trajectory tracking control of a free-Floating space robot with flexible manipulators [J]. *Robot*, 2007, **29**(1):92-96. In Chinese (洪在地, 竑超, 陈力. 柔性臂漂浮基空间机器人建模与轨迹跟踪控制 [J]. 机器人, 2007, **29**(1):92-96)

[5] Kazuya Yoshida, Ryo Kurazume, Yoji Umetani. Dual-arm coordination in space free-flying robot [G]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robots and Automation. US, 1991. 2516-2521

[6] Evangelos G. Papadopoulos. Large payload manipulation by space robots [R]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Japan, 1993. 2087-2094

[7] Yasuyoshi Yokokohji, Takeshi Toyoshima, Tsuneo Yoshikawa. Efficient computational algorithms for trajectory control of free-flying space robots with multiple arms [J]. *IEEE Trans. Rob. Autom.*, 1993, **9**(5):571-580

[8] Gary E Yale, Brij N Agrawal. Lyapunov controller for cooperative space manipulators [J]. *J. Guid. Cont. Dyn.*, 1998, **21**(3):477-484

[9] Gu Y L, Xu Y S. A normal form augmentation approach to adaptive control of space robot systems [J]. *J. Dyn. Cont.*, 1995, **5**(3):275-294

[10] Hong Zhaobin, Chen Li. Fuzzy neural network self-learning control of free-Floating dual-arm space robot system [J]. *Robot*, 2008, **30**(5):435-439. In Chinese (洪昭彬, 陈力. 漂浮基双臂空间机器人系统的模糊神经网络自学习控制 [J]. 机器人, 2008, **30**(5):435-439)

[11] Chen Li, Liu Yanzhu. Adaptive and robust control schemes of coordinated motion of space-based robot system [J]. *Chin. J. Mech. Eng.*, 2001, **37**(8):18-22. In Chinese (陈力, 刘延柱. 漂浮基空间机器人协调运动的自适应控制与鲁棒控制 [J]. 机械工程学报, 2001, **37**(8):18-22)

[12] Chen Li. Robust and adaptive composite control of space robot system with prismatic joints [J]. *Eng. Mech.*, 2004, **21**(3):174-179. In Chinese (陈力. 带滑移铰空间机器人惯性空间轨迹跟踪的鲁棒混合自适应控制方案 [J]. 工程力学, 2004, **21**(3):174-179)

[13] Jian M Tao, Luh J Y S. Robust position and force control for a system of multiple redundant-robots [R]//Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, France, 1992. 2211-2216