

引用格式:张欢庆,刘宜成.空间机器人全局逼近收敛控制[J].电光与控制,2018,25(10):24-27,61. ZHANG H Q, LIU Y C. Global approximation convergence control for space robot[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(10):24-27, 61.

## 空间机器人全局逼近收敛控制

张欢庆, 刘宜成

(四川大学电气信息学院,成都 610065)

**摘要:**针对自由漂浮空间机器人系统,设计了一种全局逼近收敛控制器,解决了存在初始状态误差及外界干扰条件下的系统鲁棒性问题。首先,根据空间机器人系统的状态空间方程设计控制器,该控制器将控制输出特性与控制增益隔离开,对系统模型的不确定性及外界干扰具有强鲁棒性。另外,该控制方法避免了类似反演控制方法带来的复杂度高的问题。其次,从理论上证明了该控制器能够实现机器人系统对期望路径的跟踪。最后,针对单臂六自由度空间机器人系统,分别使用该控制器与鲁棒补偿控制器进行了仿真分析。仿真结果证实了该控制器的强鲁棒性。

**关键词:**空间机器人;全局逼近收敛控制;路径跟踪;鲁棒性

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.10.005

## Global Approximation Convergence Control for Space Robot

ZHANG Huan-qing, LIU Yi-cheng

(College of Electrical & Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** A global approximation convergence controller is designed for the free-floating space robot system, which solves the robustness problem of the system when there is initial state error or external disturbance. Firstly, the controller is designed based on the state space equation of the system, which isolates the output characteristics from control gains, and exhibits strong robustness against model uncertainties and external disturbance. Meanwhile, the control method completely avoids the high-complexity issue raised by backstepping-like control approaches. Then, it is proved theoretically that the proposed controller can ensure the robot system to track the desired path. Finally, the proposed controller and the robust compensation controller are used respectively for simulation analysis to a single-arm six-DOF space robot system. The simulation results confirm the superiority of the proposed controller.

**Key words:** space robot; global approximation convergence control; path tracking; robustness

### 0 引言

随着人类在太空领域的探索不断深入,空间机器人的应用越来越广泛,例如,航空器维修、空间站建设、卫星捕获等太空任务<sup>[1-4]</sup>,空间机器人将在未来的空间工程中扮演重要角色。针对不断提出的新任务要求,设计出合适的空间机器人系统控制器显得尤为重要<sup>[5]</sup>。对空间机器人的研究不同于地面机器人:一方面,空间机器人的机械臂与基座之间存在动力学耦合作用,整个系统服从动量守恒定律,其动力学方程不具有线性参数化的性质,复杂度更高;另一方面,空间机

器人的动力学模型非常复杂且存在许多不确定性,如基座与机械臂的质量、转动惯量等参数无法获得精确值,并且太空中工作环境复杂,外部信号和测量噪声都会对机器人系统造成干扰。如果设计的控制器不能对外部干扰起到抑制作用,不仅会降低控制器的性能,还会影响系统的稳定性。

针对上述的复杂空间机器人系统,很多控制方法被提出。文献[6]提出分解运动速度控制方法,基于广义雅可比矩阵的概念,将机械臂末端执行器的期望运动速度分解为关节的期望速度,然后对各个关节进行伺服控制;文献[7]基于扩展的雅可比矩阵,设计了一种空间机器人的零反作用控制器,实现了末端执行器的轨迹跟踪与基座姿态调整。然而此类算法无法考虑避动力学奇异问题,也无法得到优化的控制输入。文献[8]研究了空间机器人自适应控制方案,解决未建模动力学问题;文献[9]研究了空间机器人基座姿

收稿日期:2017-11-08 修回日期:2017-11-21

基金项目:国家自然科学基金(61374054)

作者简介:张欢庆(1991—),男,河南开封人,硕士,研究方向为机器人的建模与控制。

态与机械臂末端执行器轨迹协调运动的自适应控制方法。自适应控制方案的主要思想是利用参数调节律对未知的系统惯性参数进行辨识,但如果存在不能由定常参数表示的外部干扰,参数估计误差就很难收敛。文献[10]提出了鲁棒模糊神经网络控制方法,但神经网络控制方案的设计比较繁琐,且需要预先对神经网络进行初步训练。

本文结合文献[11]的思想,采用低复杂度全局逼近收敛控制方法,控制器设计简单,且不需要对系统模型参数线性化,避免了类似反演控制神经网络等方法带来的复杂度高的问题,使得整个控制系统运算更为简便高效。本文针对空间六自由度单臂机器人系统进行抗干扰仿真,仿真结果表明,全局逼近控制方案较鲁棒补偿控制方案具有更强的鲁棒控制效果。

## 1 空间机器人系统模型描述

本文介绍的机器人系统是由基座和一个  $n$  自由度的机械臂组成,如图 1 所示,其中,  $B_i, J_i$  分别对应第  $i$  个连杆和关节轴,  $O_1, O_0$  分别表示惯性系和基座本体坐标系。

空间机器人系统的动力学模型可表示为

$$J_s \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) = \tau \quad (1)$$

式中:  $\theta \in \mathbf{R}^n$  表示关节角矢量;  $J_s \in \mathbf{R}^{n \times n}$  表示关节惯性矩阵;  $C(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbf{R}^n$  表示非线性力矩耦合项;  $\tau \in \mathbf{R}^n$  表示外界施加的广义力矩。

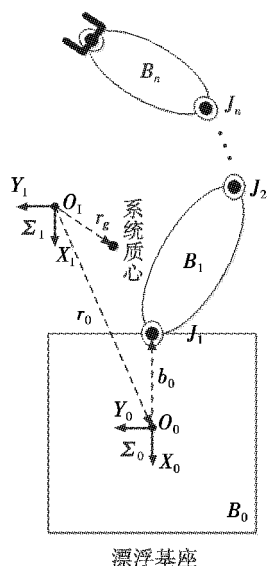


图 1 空间单臂机器人系统模型

Fig. 1 The space single-arm robot system model

## 2 控制器设计

空间机器人为多变量控制系统,根据其动力学模

型,可设状态变量  $x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}$ , 将关节力矩  $\tau$  作为控制输入,  $\theta$  作为输出,以上系统可简化为二阶模型,其状态空间方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{\theta} \\ \dot{x}_2 = B(\tau - C(\theta, \dot{\theta})) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中:设  $x_{i,1} = \theta_i, x_{i,2} = \dot{\theta}_i$ , 即  $x_1 = [x_{1,1} \ x_{2,1} \ \cdots \ x_{n,1}]^T$ ,  $x_2 = [x_{1,2} \ x_{2,2} \ \cdots \ x_{n,2}]^T$ ;  $B = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i}{\sigma_i^2 + \lambda^2} v_i u_i^T$ ,  $\sigma_i$  为惯性矩阵  $J_s$  的奇异值,  $v_i$  和  $u_i$  分别为对应的奇异向量,  $\lambda$  为阻尼系数。

由于  $n$  自由度的空间机器人系统可看作是由  $n$  个类似的分散子系统构成,因此进行以下控制器设计及稳定性分析时,只对其任一维子系统进行论述。

假设 1 系统规划的期望关节角为  $\theta_d$ , 它连续可导且有界。

针对式(2)的二阶系统,对其第  $i$  个一维子系统设置控制器步骤如下。

1) 选择一个输出逼近函数

$$p_1(t) = (p_{10} - p_{1\infty}) e^{-l_1 t} + p_{1\infty} \quad (3)$$

使其满足  $p_1(0) > |x_{i,1}(0) - \theta_{id}(0)|$ ,  $p_{1\infty}$  和  $l_1$  分别为函数最大收敛误差与最小收敛速度。定义一个标准状态误差为

$$\xi_{i,1} = \frac{x_{i,1} - \theta_{id}}{p_1} \quad (4)$$

设置一个虚拟控制器为

$$a_{i,1} = -k_1 \ln \left( \frac{1 + \xi_{i,1}}{1 - \xi_{i,1}} \right) \quad (5)$$

式中,  $k_1$  为一个正的控制增益。

2) 选择第二个输出逼近函数

$$p_2(t) = (p_{20} - p_{2\infty}) e^{-l_2 t} + p_{2\infty} \quad (6)$$

满足  $p_2(0) > |x_{i,2}(0) - a_{i,1}(0)|$ 。标准状态误差定义为

$$\xi_{i,2} = \frac{x_{i,2} - a_{i,1}}{p_2} \quad (7)$$

设置控制输入为

$$\tau_i = -k_2 \ln \left( \frac{1 + \xi_{i,2}}{1 - \xi_{i,2}} \right) \quad (8)$$

式中,  $k_2$  为控制增益。

## 3 稳定性分析

证明 考虑式(2)系统,对给定任意初始状态条件且满足假设 1 的期望轨迹,本文设计的控制器能够实现全局逼近收敛控制。

式(2)系统的第  $i$  个一维系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_{i,1} = f_{i,1}(x_{i,2}) \\ \dot{x}_{i,2} = f_{i,2}(x_{i,2}, \tau_i) \\ y_i = x_{i,1} \end{cases} \quad (9)$$

由式(5)、式(7)可得

$$x_{i,1} = \xi_{i,1} p_1 + \theta_{id} \quad (10)$$

$$x_{i,2} = \xi_{i,2} p_2 + a_{i,1} \quad (11)$$

根据文献[8]所提定理的特性,可得对于 $\forall t \in [0, t_{\max}]$ ,有 $\xi_{i,j} \in (-1, 1)$ ,  $j=1, 2$ 。

令

$$\varepsilon_1(t) = \ln\left(\frac{1 + \xi_{i,1}}{1 - \xi_{i,1}}\right) \quad t \in [0, t_{\max}] \quad (12)$$

考虑正定函数 $V_1 = \frac{1}{2} \varepsilon_1^2$ ,求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \varepsilon_1 \frac{d(\varepsilon_1)}{d(\xi_{i,1})} \dot{\xi}_{i,1} = \\ & \frac{2\varepsilon_1}{(1 - \xi_{i,1}^2)p_1} (f_{i,1}(\xi_{i,2}p_2 + a_{i,1}) - \dot{\theta}_{id} - \xi_{i,1}\dot{p}_1) \quad (13) \end{aligned}$$

根据中值定理可得

$$f_{i,1}(\xi_{i,2}p_2 + a_{i,1}) = f_{i,1}(\xi_{i,2}p_2) + a_{i,1} \frac{\partial f_{i,1}(z)}{\partial z} \Big|_{z=z^*} \quad (14)$$

式中, $z^* = \lambda(\xi_{i,2}p_2 + a_{i,1}) + (1 - \lambda)\xi_{i,2}p_2$ 。

将式(14)代入式(13)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{2\varepsilon_1}{(1 - \xi_{i,1}^2)p_1} (f_{i,1}(\xi_{i,2}p_2) - \dot{\theta}_{id} - \xi_{i,1}\dot{p}_1 - \\ & k_1 \varepsilon_1 \frac{\partial f_{i,1}(z)}{\partial z} \Big|_{z=z^*}) \quad (15) \end{aligned}$$

由于 $p_1, \dot{p}_1, \theta_{id}, \dot{\theta}_{id}$ 均为有界量,且对连续函数 $f_{i,1}(\cdot)$ 根据极值定理可得:对 $\forall t \in [0, t_{\max}]$ ,存在一个未知的正常数 $\bar{F}_{i,1}$ ,使得

$$|f_{i,1}(\xi_{i,2}p_2) - \dot{\theta}_{id} - \xi_{i,1}\dot{p}_1| \leq \bar{F}_{i,1} \quad (16)$$

根据状态方程式(2)可得

$$\frac{\partial f_{i,1}(z)}{\partial z} \Big|_{z=z^*} = 1 \quad (17)$$

又对 $\forall t \in [0, t_{\max}]$ ,有 $\frac{1}{1 - \xi_{i,1}^2} \geq 1, p_1 \geq p_{1\infty} > 0$ ,所以

$$\dot{V}_1 \leq \frac{2}{(1 - \xi_{i,1}^2)p_1} (\bar{F}_{i,1} |\varepsilon_1| - k_1 |\varepsilon_1|^2) \quad (18)$$

由此可得:当 $|\varepsilon_1| > \frac{\bar{F}_{i,1}}{k_1}$ 时,有 $\dot{V}_1 < 0$ 。进而可得

$$|\varepsilon_1| \leq \bar{\varepsilon}_1 = \max\{\varepsilon_1(0), \frac{\bar{F}_{i,1}}{k_1}\} \quad \forall t \in [0, t_{\max}] \quad (19)$$

所以

$$|a_{i,1}| \leq k_1 \bar{\varepsilon}_1 \quad \forall t \in [0, t_{\max}] \quad (20)$$

同理可得

$$|\tau_i| \leq k_2 \bar{\varepsilon}_2 \quad \forall t \in [0, t_{\max}] \quad (21)$$

式中, $\bar{\varepsilon}_2 = \max\{\varepsilon_2(0), \frac{\bar{F}_{i,2}}{k_2}\}$ ,  $\bar{F}_{i,2}$ 为一个正常量。

即控制输入 $\tau_i$ 与虚拟控制信号 $a_{i,1}$ 有界,进而易得系统的状态变量 $x_{i,1}, x_{i,2}$ 均有界。结合式(10)得

$$-1 < \frac{e^{-\bar{\varepsilon}_1} - 1}{e^{-\bar{\varepsilon}_1} + 1} = \underline{\xi}_{i,1} \leq \xi_{i,1} \leq \bar{\xi}_{i,1} = \frac{e^{\bar{\varepsilon}_1} - 1}{e^{\bar{\varepsilon}_1} + 1} < 1 \quad (22)$$

从而有

$$-p_1 < \frac{e^{-\bar{\varepsilon}_1} - 1}{e^{-\bar{\varepsilon}_1} + 1} p_1 \leq x_{i,1}^j - \theta_{id}^j \leq \frac{e^{\bar{\varepsilon}_1} - 1}{e^{\bar{\varepsilon}_1} + 1} p_1 < p_1 \quad \forall t \in [0, t_{\max}] \quad (23)$$

即对 $\forall t \in [0, t_{\max}]$ ,式(9)子系统输出可以跟踪上期望轨迹。

综上所述:对式(2)系统,给定任意初始状态条件和满足假设1的期望轨迹,本文设计的控制方案能够实现全局收敛控制。

## 4 仿真

通过仿真进一步验证该控制方案的实效性。本文的仿真对象为一个六自由度的单臂空间机器人系统,它由一个六自由度机械臂和基座组成,该系统机械臂的D-H参数及质量参数如表1、表2所示。

表1 机械臂的D-H参数

Table 1 The D-H parameters of the mechanical arm

关节 <i>i</i>	$\theta_i/(\circ)$	$\alpha_{i-1}/(\circ)$	$a_{i-1}/\text{m}$	$d_i/\text{m}$
1	—	0	0	0
2	—	-90	0	0
3	—	0	0.4	0.4
4	—	-90	0.4	0.4
5	—	90	0	0
6	—	-90	0	0

表2 空间机器人系统的质量参数

Table 2 The mass properties of space robotic system

	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	
Mass/kg	400	6	5	5	4	3	2	
${}^i a_i$	—	0	0.2	0.2	0	0	0	
	—	0	0	0.2	0	0	0	
	—	0	0.2	0	0	0	0.07	
${}^i b_i$	0.4	0	0.2	0.2	0	0	0	
	0	0	0	0.2	0	0	0	
	0.4	0	0.2	0	0	0	0.075	
${}^i I_i/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$I_{xx}$	30	0.15	0.0926	0.105	0.2498	0.0330	0.051
	$I_{yy}$	28	0.15	0.9053	0.105	0.2498	0.0172	0.051
	$I_{zz}$	32	0.075	0.8451	0.0294	0.0196	0.0260	0.022
	$I_{xy}$	0.26	0	0	0	0	0	0
	$I_{xz}$	0.37	0	0.1315	0	0	0	0
	$I_{yz}$	-0.29	0	0	0	0	0	0

下面将给出仿真过程中,机器人系统的一些初始参数。基座的初始位置和姿态为: $r_0(t_0) = [-0.28 \ 0.31 \ 0.32]^T$ (单位,m); $\psi_0(t_0) = [0 \ 0 \ 0]^T$ (单位, $\circ$ )。系统的线动量和角动量分别为: $P = [0 \ 0 \ 0]^T$ ;  $L = [0 \ 0 \ 0]^T$ 。

假设机械臂期望的初始关节角为: $\theta_d(t_0) = [0 \ -47$



$94\ 0\ -23\ 0]^T$ (单位,°);规划的期望关节角  $\Theta_d$  及关节角速度  $\dot{\Theta}_d$  如图 2 所示,其中,两张子图中的 6 条曲线分别表示机械臂的 6 个关节角和关节角速度。

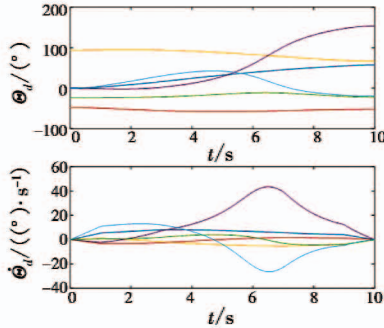


图 2 机械臂的期望关节角与关节角速度

Fig. 2 The desired joint angle and joint angular velocity

为了证明该控制方案的误差收敛特性及强鲁棒性,设置机械臂实际的初始关节角为: $\Theta(t_0) = [0\ -40\ 80\ 0\ -20\ 0]^T$ (单位,°),并在控制输入中添加适当的噪声干扰: $d(t) = 0.1 \text{randn}(6)$ ,其中,randn(6)为六维列向量。

同等条件下,将本文设计的控制器与传统鲁棒补偿控制器做仿真对比。

图 3 表示两种控制算法对应的关节角跟踪误差,从图中可以看出:全局逼近收敛控制器对应的关节角跟踪误差可以收敛到  $\pm 3.5 \times 10^{-4}$  (单位,°)以内,而鲁棒补偿控制器对应的关节角跟踪误差范围只能收敛到  $\pm 3 \times 10^{-3}$  (单位,°)以内,显然全局逼近控制更有优越性。

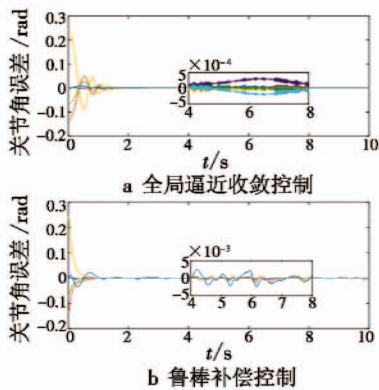


图 3 机械臂关节角跟踪误差

Fig. 3 The tracking errors of joint angle

图 4、图 5 分别描绘了基于两种控制方法的机械臂末端位置和姿态误差曲线,其中,“A”曲线对应全局逼近收敛控制,“B”曲线对应鲁棒补偿控制。由图 4、图 5 可知,两种控制算法对单臂机器人系统的控制效果有明显的差异。整体来看,本文提出的控制算法在误差动态收敛性能及稳态性能上均优于鲁棒补偿控制方法。综上可以得出:全局逼近收敛控制可以使受控系统具有较强的鲁棒性。

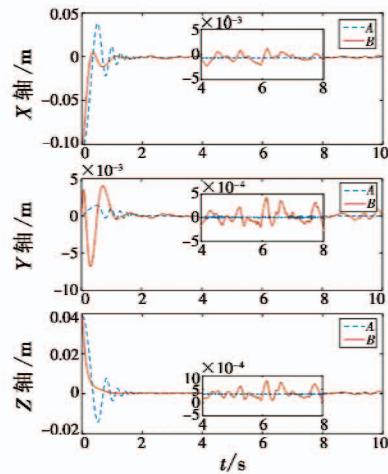


图 4 两种控制方法对应的机械臂末端位置误差  
Fig. 4 The position tracking errors of two controllers

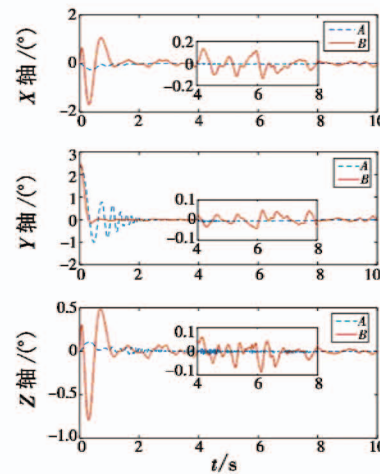


图 5 两种控制方法对应的机械臂末端姿态误差  
Fig. 5 The attitude angle tracking errors of two controllers

### 5 结论

本文以空间机器人系统为研究对象,基于全局逼近收敛控制方法设计了一个鲁棒控制器,实现在系统存在初始状态误差及随机噪声干扰条件下,对机器人系统的鲁棒控制。本文利用李雅普诺夫稳定性理论证明该控制器可以实现空间机器人系统的全局稳定,即该控制器可以实现高精度的路径跟踪。仿真结果也表明了该控制器较传统的鲁棒控制方案有复杂度低、鲁棒性能好等优点。

### 参考文献

[1] MOOSAVIAN S, PAPADOPOULOS E. Free-flying robots in space: an overview of dynamics, modeling, planning and control[J]. Robotica, 2007, 25(5): 537-547.  
[2] 李海阳,张波,黄海兵. 航天员与类人机器人月面联合探测概念初步研究[J]. 载人航天, 2014, 20(4): 301-306.



表 5 不同捕获方法在同等参数下的性能比较  
Table 5 Comparison of performance of different capture methods under equivalent parameters

算法	参数	$G_1$	$G_2$	$T_1/s$	$T_2/s$	多普勒误差/Hz
扩展复制重叠捕获算法	$l=10\ 000$ $M=2$	12.3275	17.927	19.39	1878.75	214
均值捕获算法	$l=10\ 000$ $i=2$	13.756	15.918 1	29.625	327.687	14
时频融合算法	$l=10\ 000$ $M=2$ $i=20$	9.635 25	15.918 1	31.047	154.313	14
时频融合优化算法	$l=10\ 000$ $M=2$ $i=2$	8.1064	15.918 1	30.506	134.365	14

根据捕获性能的统计分析,时频融合算法虽然单次运行时间  $T_1$  相对扩展复制重叠算法和均值算法较长,但是这种相差很小,只是几秒的差别。然而就总体的捕获时间  $T_2$  来看,时频融合算法较扩展复制重叠算法捕获时间缩短了一个数量级,较均值算法也缩短了 50% 左右,捕获速度有了很大的提高。从多普勒误差来看,时频融合算法较扩展复制重叠算法误差要小一个数量级,精度有了很大提高。并且通过对优化算法和时频融合算法的对比可以发现,优化算法的单次运行时间  $T_1$  和总体捕获时间  $T_2$  较时频融合算法有一定进步,取得了优化效果,达到快捕的目的。

#### 4 结束语

本文主要对 P 码的直接捕获算法进行研究和分析,提出了一种结合均值法和扩展复制重叠法两种方

法的时频融合捕获算法,对其进行了 Matlab 模拟仿真试验,并且对算法进行了进一步的优化,通过对模拟实验结果的统计分析,证实了优化后的算法在捕获速度和精度上都有很大的提高,满足现在 P 码直接捕获的快速性要求。

#### 参考文献

- [1] 许益乔,曾芳玲,胡燕燕. 通过模拟多普勒频移实现对 GPS 时间系统的干扰[J]. 火箭与制导学报,2013(4): 63-66.
- [2] 唐小妹,雍少为,王飞雪. 存在伪码多普勒条件下的 XFAST 性能分析[J]. 通信学报,2010,31(8):54-59.
- [3] 许斌,崔永,王传鑫,等. 基于 FFT 的高动态直扩信号快捕改进方法研究[J]. 理论与方法,2009,28(8):17-20.
- [4] 周帆. 一种 GPS 软件接收机的同步算法研究与仿真[J]. 火箭与制导学报,2012,32(3):178-181.
- [5] RAO M, RATNAM D V. Faster GPS/IRNSS acquisition via sub sampled fast Fourier transform (ssFFT) and thresholding[C]//India Conference (INDICON), IEEE, 2013:1-4.
- [6] 曹娜. 卫星定位 P 码直接捕获技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2007.
- [7] 赵琳,高帅和,丁继成. 基于 FFT 的高动态 GPS 信号捕获方法优化[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(1): 151-156.
- [8] 邱致和,王万义. GPS 原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [9] SOMOV Y, SUKHANOV V, HACIZADE C. Guidance and precise motion control of free-flying robots and land-survey mini-satellites[C]//International Conference on Control Automation Robotics & Vision, IEEE, 2014:1092-1097.
- [10] 李大明,饶炜,胡成威,等. 空间站机械臂关键技术研究[J]. 载人航天,2014,20(3):238-242.
- [11] 梁斌,杜晓东,李成,等. 空间机器人非合作航天器在轨服务研究进展[J]. 机器人,2012,34(2):242-256.
- [12] UMETANI Y, YOSHIDA K. Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix [J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1989, 5(3):303-314.
- [13] 徐拴锋,杨保华,张笃周,等. 空间机械臂自适应扩展雅克比零反作用控制[J]. 宇航学报,2014,35(7):786-793.
- [14] LASKIN R A. Multiaxis vibration isolation, suppression, and steering system for space observational applications[C]//SPIE, 1998:73-81.
- [15] 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.
- [16] WANG C, FENG B, MA G, et al. Robust tracking control of space robots using fuzzy neural network [C]//IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, IEEE, 2005:181-185.
- [17] BECHLIOLIS C P, ROVITHAKIS G A. A low-complexity global approximation-free control scheme with prescribed performance for unknown pure feedback systems [J]. Automatica, 2014, 50(4):1217-1226.