

地面装调的空间机械臂在空间应用时的自适应鲁棒控制

刘福才[†], 高娟娟, 王芳

(燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对空间机械臂在轨操控过程中, 重力加速度不同于地面装调阶段的重力加速度, 会随着空间位置的变化而变化的问题. 本文提出了一种自适应鲁棒控制策略, 用于空间机械臂的末端控制, 从而使在地面重力条件下装调好的空间机械臂能够在空间微重力条件下实现在轨操控任务. 通过分析重力项对空间机械臂轨迹跟踪控制的影响, 设计自适应律在线估计重力加速度, 从而得到重力项的估计, 系统的不确定性通过鲁棒控制器来补偿. 基于李雅普诺夫理论证明了闭环系统的稳定性. 仿真结果表明, 在地面装调阶段的重力环境下和空间应用阶段的微重力环境下, 该控制器对空间机械臂的末端控制均能达到较高的轨迹跟踪精度, 具有重要的工程应用价值.

关键词: 空间机械臂; 地面装调; 空间应用; 微重力环境; 自适应鲁棒控制

中图分类号: TP241 **文献标识码:** A

Adaptive robust control for the space application of manipulator aligned on ground

LIU Fu-cai[†], GAO Juan-juan, WANG Fang

(Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: The gravity acceleration for a space robot in in-orbit operation is different from that in the alignment phase on the ground and subject to change with spatial location. We propose an adaptive robust strategy for the end control of a space robot working in-orbit in the space under microgravity environment, but had the manipulator adjusted on the ground under gravity environment. After analyzing the impact of gravity on trajectory-tracking of the space manipulator, we design an adaptive strategy to estimate the gravity acceleration online, from which we determine the values of related terms. The uncertainty can be compensated by a robust controller. By using the Lyapunov theory, we prove that this control scheme guarantees the stability of the closed-loop system and the asymptotic convergence of tracking errors. Simulation results show that the controller is effective in trajectory-tracking with desired accuracy for the space manipulator to work in the microgravity environment in the space, while had been aligned in the gravity environment. This demonstrates the important value of this strategy in engineering applications.

Key words: space manipulator; ground alignment; space applications; microgravity environment; adaptive robust control

1 引言(Introduction)

随着空间探索的不断深入, 空间机械臂在未来的空间活动中将扮演越来越重要的角色, 吸引了国内外众多学者的关注^[1-3]. 目前绝大多数的研究是集中在空间机械臂的建模和运动行为控制问题上, 然而空间机械臂在地面进行装配和调试时重力无处不在, 在轨操控过程中却处于微重力状态, 由于重力环境的差异, 在地面设计、加工、装配、调试好的空间机械臂在轨操控过程中的受力状态、运动行为都将受到新的考验. 因此在地面装调好的机械臂在空间能否应用以及如何在地面进行模拟是急待解决的关键问题, 具有重要的理论研究和工程应用价值.

目前, 空间微重力地面模拟的方式主要有基于自由落体运动、基于抛物线飞行、气浮式、水浮式、吊丝配重等. 文献[4]基于抛物线飞行方式, 对可重构分支的空间机械臂做了4次微重力实验, 飞机飞行了45条抛物线轨迹; 文献[5]采用水浮法, 设计了具有6个自由度的水中悬浮模型, 用此模型对空间机械臂抓取浮游目标的功能进行验证; 文献[6]采用气浮法, 搭建了3自由度空间机械臂反作用优化地面实验平台, 并进行了反作用优化实验.

随着空间环境中重力水平的极大减弱, 物体运动特性可能发生较大的变化. 目前众多文献提出了空间机械臂的控制方案, 文献[7]提出一种基于不变流

形的协同控制算法,解决自由漂浮空间机械臂本体与基座的运动耦合问题;文献[8]提出了一种径向基函数(RBF)神经网络自适应控制方法用于空间机械臂的在轨轨迹规划;文献[9]采用滑模变结构的神经网络控制器解决空间机械臂的在轨控制问题.但以上方案只是单纯的针对空间机械臂在轨操控过程提出的,均没有考虑空间机械臂从地面装调到空间应用整个过程的控制问题.由于从地面到空间过程中重力加速度 g 会随海拔高度的增大而减小,当系统距地面高度远小于地球半径时, g 变化不大,而离地面高度较大时,重力加速度 g 显著减小,此时不能认为 g 为常数,空间机械臂所处环境重力加速度 g 的变化,引起系统重力项的变化,从而导致系统模型发生变化,因此需对未知环境中的重力加速度 g 进行估计.

针对以上问题,本文提出了一种自适应鲁棒控制策略用于地面装调和空间应用两阶段空间机械臂的末端控制.考虑到系统从地面装调到空间应用过程中重力项的变化,通过分析重力项对空间机械臂轨迹跟踪控制的影响,采用自适应控制器在线估计重力加速度 g 来逼近系统所处未知环境的重力加速度,从而实现对系统重力项的在线建模,系统的不确定性通过鲁棒控制器来补偿.该控制策略不需要对系统的动力学方程进行参数线性化,避免了回归矩阵的复杂计算,从而降低了计算量.基于李雅普诺夫理论证明了闭环系统的稳定性.仿真结果表明在地面重力环境下和空间微重力环境下,该控制器对空间机械臂的末端控制均能达到较高的轨迹跟踪精度,具有重要的工程应用价值.

2 系统描述(System description)

针对空间机械臂系统作如下假设:

- 1) 系统为刚体系统;
- 2) 空间忽略微重力,系统处于自由漂浮状态,在地面和空间环境中系统均不受其他外力及外力矩;
- 3) 系统由基座和 n 个连杆组成,基座的位姿不受主动控制,连杆每个关节具有一个转动自由度且受主动控制.

2.1 地面装调阶段模型(Ground alignment model)

空间机械臂系统在地面装调阶段,处于重力环境,基座是固定的,系统有 n 个自由度(见图1),拉格朗日函数等于系统的动能与势能之差,则由拉格朗日方法得到基座固定的空间机械臂的动力学方程:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau, \quad (1)$$

式中: $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为系统的惯量矩阵, $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为离心力和哥氏力矩阵, $G(q) \in \mathbb{R}^n$ 为重力载荷向量矩阵,

$$q = [q_1 \ q_2 \ \cdots \ q_n]^T \in \mathbb{R}^n$$

为系统关节角的位移矢量, $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \cdots \ \tau_n]^T \in \mathbb{R}^n$ 为作用在空间机械臂上的驱动力矩.

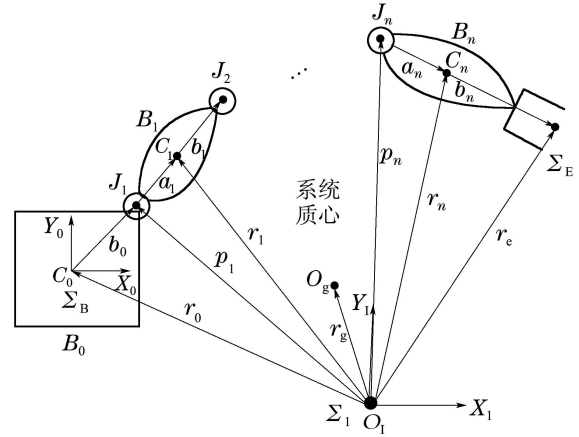


图1 n 自由度自由漂浮空间机械臂模型

Fig. 1 The model of n -DOF free-floating space manipulator

由于空间机械臂的任务是在工作空间规划的,因此需要直接在工作空间中设定控制算法.用 $x \in \mathbb{R}^n$ 表示末端执行器在工作空间的位姿, $J(q) \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ 为系统的雅克比矩阵,假设 $J(q)$ 为非奇异矩阵,则 $J(q)$ 可逆,则系统在工作空间的运动学和动力学方程为

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}, \quad (2)$$

$$M_x(q)\ddot{x} + C_x(q, \dot{q})\dot{x} + G_x(q) = \tau_x, \quad (3)$$

式中:

$$M_x(q) = J^{-T} M J^{-1},$$

$$C_x(q, \dot{q}) = J^{-T} (C - M J^{-1} \dot{J}) J^{-1},$$

$$G_x(q) = J^{-T} G, \quad \tau_x = J^{-T} \tau.$$

系统动力学模型中的重力项可写为

$$G_x(q) = \varphi(q)g, \quad (4)$$

式中 g 为空间机械臂所处环境的重力加速度.

2.2 空间应用阶段模型(Space applications model)

空间机械臂系统在轨操控阶段,处于微重力环境(指重力或其他的外力引起的加速度不超过 $10^{-5}g_0 \sim 10^{-4}g_0$,其中 g_0 为地面重力加速度),基座不是固定的,这样使整个系统的运动增加了6个自由度,系统有 $n+6$ 个自由度.当机械臂本体运动时,会对基座施加一个动态力或力矩,使基座位姿发生改变.拉格朗日函数等于系统的动能,则由拉格朗日方法得到基座位姿不受控的空间机械臂的动力学方程:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = \tau, \quad (5)$$

式中: $M(q) \in \mathbb{R}^{(n+6) \times (n+6)}$ 为系统的惯量矩阵, $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{(n+6) \times (n+6)}$ 为离心力和哥氏力矩阵,

$$q = [q_b^T \ q_m^T]^T \in \mathbb{R}^{n+6}$$

为广义位移矢量,

$$\mathbf{q}_b = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T \in \mathbb{R}^6$$

为基座的位姿矢量, $\mathbf{q}_m = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T \in \mathbb{R}^n$ 为关节角的位移矢量, $\boldsymbol{\tau} = [\mathbf{0}_{6 \times 1}^T \ \boldsymbol{\tau}_{n \times 1}^T]^T \in \mathbb{R}^{n+6}$ 为作用在空间机械臂上的驱动力矩, $\mathbf{0}_{6 \times 1}$ 为作用在伪机械臂(基座)关节上的驱动力矩, $\boldsymbol{\tau}_{n \times 1}$ 为作用在实际机械臂关节上的驱动力矩.

选择系统末端执行器在工作空间的位移作为系统输出 \mathbf{x} , $\mathbf{J}^*(\mathbf{q}) = [\mathbf{J}_b(\mathbf{q}) \ \mathbf{J}_m(\mathbf{q})] \in \mathbb{R}^{6 \times (n+6)}$ 为广义雅克比矩阵, 其中

$$\mathbf{J}_b(\mathbf{q}) = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{q}_b}, \quad \mathbf{J}_m(\mathbf{q}) = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{q}_m}$$

分别为系统基座的雅克比矩阵和机械臂本体的雅克比矩阵, 假设 $\mathbf{J}_m(\mathbf{q})$ 为非奇异矩阵, 则 $\mathbf{J}^*(\mathbf{q})$ 可逆, 则系统在工作空间的运动学和动力学方程为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}^*(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}, \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_x(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\tau}_x, \quad (7)$$

式中:

$$\mathbf{M}_x(\mathbf{q}) = \mathbf{J}^{*-T} \mathbf{M} \mathbf{J}^{*-1}, \quad \boldsymbol{\tau}_x = \mathbf{J}^{*-T} \boldsymbol{\tau},$$

$$\mathbf{C}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{J}^{*-T} (\mathbf{C} - \mathbf{M} \mathbf{J}^{*-1} \dot{\mathbf{J}}^*) \mathbf{J}^{*-1}.$$

空间机械臂工作空间动力学方程有如下性质^[10]:

性质 1 $\mathbf{M}_x(\mathbf{q})$ 可逆且有界.

性质 2 对 $\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^n$, 有 $\frac{1}{2} \mathbf{Z}^T \dot{\mathbf{M}}_x \mathbf{Z} = \mathbf{Z}^T \mathbf{C}_x \mathbf{Z}$.

3 重力项影响(Gravity items influence)

机械臂的动态控制采用双闭环控制, 外控制回路不考虑动力学特性, 只按照实际轨迹与期望轨迹的偏差进行反馈控制, 内控制回路根据动力学特性进行动态补偿, 使得经内控制回路作用后的系统变得更易控制^[11]. 然而在进行动力学补偿时, 由于空间机械臂在地面和空间的模型存在差异, 应该考虑重力项对空间机械臂轨迹控制的影响.

为了研究重力项对空间机械臂轨迹跟踪控制的影响, 分别对平面两杆空间机械臂在地面装调和空间应用阶段的轨迹跟踪进行仿真研究. 假定地面重力加速度 g_0 近似为 9.8 m/s^2 , 图 2 为平面两杆空间机械臂示意图, 表 1 为空间机械臂的仿真参数, 仿真环境为 MATLAB 7.0, 仿真时间为 10 s.

表 1 平面两杆机械臂仿真参数

Table 1 Simulation parameters of manipulator with two links

杆件号	a_i/m	b_i/m	m_i/kg	$I_i/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$
0	—	0.5	40	6.667
1	0.5	0.5	4	0.333
2	0.5	0.5	3	0.250

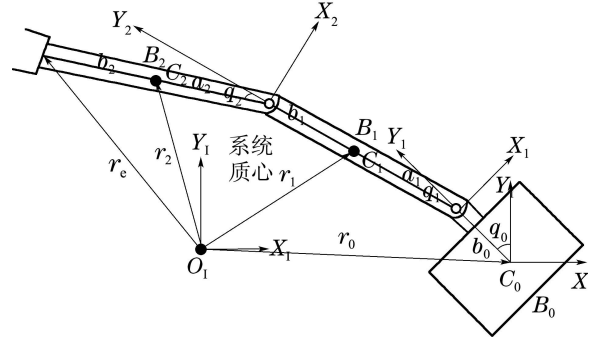


图 2 平面两杆自由漂浮空间机械臂示意图

Fig. 2 A planar free-floating space manipulator with two links

系统末端的初始位置为 $(1.2, -0.05)$, 期望轨迹:

$$\begin{cases} x_{1d} = 0.28 \cos \frac{\pi t}{5} + 0.85, \\ x_{2d} = 0.28 \sin \frac{\pi t}{5}. \end{cases}$$

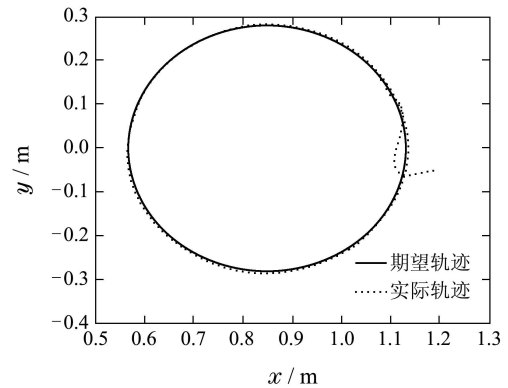
轨迹跟踪控制算法采用 PD 控制, 控制器参数为

$$\mathbf{K}_p = \text{diag}\{250, 250\}, \quad \mathbf{K}_d = \text{diag}\{25, 25\}.$$

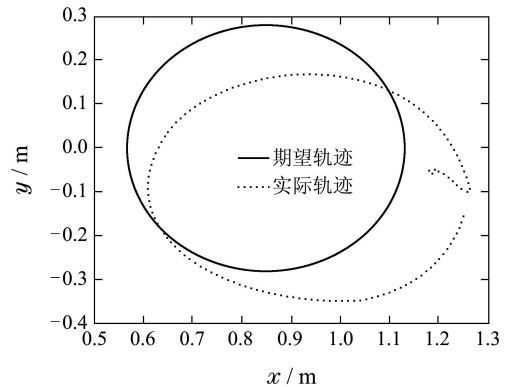
1) 同一控制器下系统的轨迹跟踪.

PD 控制器为 $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{G}_x(\mathbf{q})$.

图 3(a) 和图 3(b) 分别为同一控制器下空间机械臂地面装调和空间应用阶段工作空间的轨迹跟踪情况.



(a) 地面末端期望与实际轨迹



(b) 空间末端期望与实际轨迹

图 3 空间机械臂末端期望与实际轨迹

Fig. 3 End desire and real trajectories of space manipulator

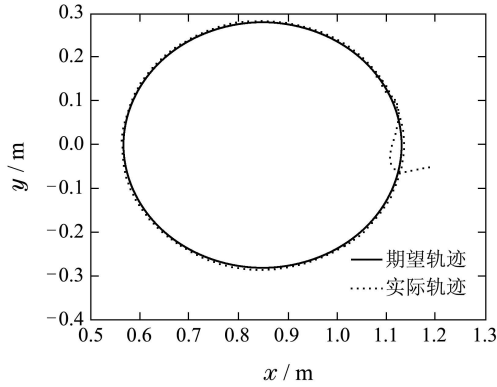
从图3可得: 在地面装调阶段, 平面两杆空间机械臂动力学模型中的重力载荷向量矩阵与控制器中的重力补偿项抵消, 可以快速的跟踪上期望轨迹; 但在空间应用阶段, 控制器中的重力补偿项对系统末端的轨迹跟踪情况产生影响, 因此平面两杆空间机械臂难以跟踪上期望轨迹.

2) 不同控制器下系统的轨迹跟踪.

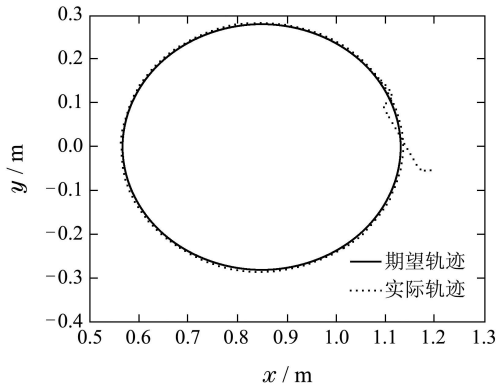
地面PD控制器为 $\tau = K_p e + K_d \dot{e} + G_x(q)$.

空间PD控制器为 $\tau = K_p e + K_d \dot{e}$.

图4(a)和4(b)分别为不同控制器下空间机械臂地面装调和空间应用阶段工作空间的轨迹跟踪情况.



(a) 地面末端期望与实际轨迹



(b) 空间末端期望与实际轨迹

图4 空间机械臂末端期望与实际轨迹

Fig. 4 End desire and real trajectories of space manipulator

从图4可得: 由于空间应用阶段重力加速度 g 非常小, 同时由于控制器中不存在重力补偿项, 因此系统能够跟踪上给定的期望轨迹.

通过进一步仿真发现, 由于空间应用阶段重力加速度 g 远远小于地面装调阶段的重力加速度 g_0 , 而且随着空间位置的变化会改变, 因此空间机械臂从地面装调到空间应用过程中重力项在变化, 所以控制器中的重力补偿项应该随着重力项的变化而改变, 而常规的PD控制器无法适应重力项的变化, 因此本文提出一种自适应鲁棒控制策略, 通过设计自适应律来在线估计空间机械臂所处未知环境的重力加速度 g , 得到重力补偿项, 系统的不确定性通过鲁棒控制器来补偿, 从而实现不同重力环境下空间机械臂末端轨迹的控制.

4 自适应鲁棒控制器设计(Adaptive robust controller design)

空间机械臂在轨服务时, 其重力加速度 g 不同于地面的重力加速度, 而现有文献在设计控制器时, 均没有考虑 g 的变化, 下面针对现有文献存在的这方面不足, 提出新的自适应鲁棒控制策略, 通过自适应控制律在线估计重力加速度 g , 从而很好的估计重力项, 系统的不确定性通过鲁棒控制器来补偿, 从而实现对重力环境下的地面装调和微重力环境下的空间应用两阶段中空间机械臂末端轨迹的控制.

4.1 控制器设计(Controller design)

设 x_d 为空间机械臂系统在工作空间的理想轨迹, x 为实际轨迹, x_r 为参考轨迹, e 为位置跟踪误差, r 为滤波误差滑模面, Λ 为正定对角矩阵, 则

$$e = x - x_d \quad (8)$$

$$\dot{x}_r = \dot{x}_d - \Lambda \tanh e \quad (9)$$

$$r = \dot{e} + \Lambda \tanh e \quad (10)$$

其中 $\tanh e = [\tanh e_1 \ \cdots \ \tanh e_n]$.

对于空间机械臂系统, 采用如下控制器和自适应律, 可保证系统的稳定性. 系统自适应鲁棒控制器的结构如图5所示.

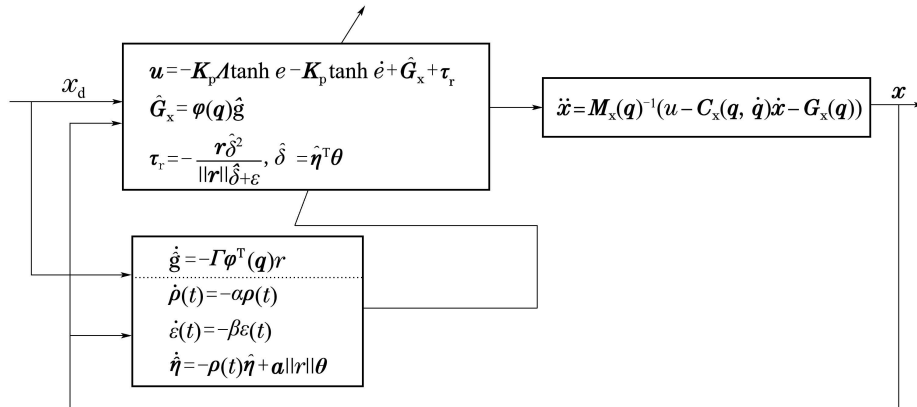


图5 空间机械臂自适应鲁棒控制结构图

Fig. 5 Adaptive robust controller for space manipulator

新的控制器为

$$\boldsymbol{\tau}_x = -\mathbf{K}_p \Lambda \tanh e - \mathbf{K}_p \tanh \dot{e} + \hat{\mathbf{G}}_x + \boldsymbol{\tau}_r, \quad (11)$$

其中: \mathbf{K}_p 为正定对角矩阵, $\hat{\mathbf{G}}_x$ 为重力项 $\mathbf{G}_x(\mathbf{q})$ 的估计值, $\boldsymbol{\tau}_r$ 为鲁棒补偿项.

重力项 $\mathbf{G}_x(\mathbf{q})$ 的估计:

$$\hat{\mathbf{G}}_x = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{q}) \hat{g}, \quad (12)$$

其中 \hat{g} 为重力加速度 g 的估计值.

重力加速度 g 的自适应律设计为

$$\dot{\hat{g}} = -\Gamma \boldsymbol{\varphi}^T(\mathbf{q}) \mathbf{r}, \quad (13)$$

其中 Γ 为正数.

用于补偿系统不确定性的鲁棒项为

$$\boldsymbol{\tau}_r = -\frac{\mathbf{r} \hat{\delta}^2}{\|\mathbf{r}\| \hat{\delta} + \varepsilon}, \quad (14)$$

$$\hat{\delta} = \hat{\boldsymbol{\eta}}^T \boldsymbol{\theta}, \quad (15)$$

其中: $\hat{\boldsymbol{\eta}} = [\eta_0 \ \eta_1]^T$, $\boldsymbol{\theta} = [1 \ \|\dot{e}\|]^T$.

鲁棒项的自适应控制律设计如下:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\eta}}} = -\boldsymbol{\rho}(t) \hat{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{a} \|\mathbf{r}\| \boldsymbol{\theta}, \quad (16)$$

$$\dot{\boldsymbol{\rho}}(t) = -\alpha \boldsymbol{\rho}(t), \quad (17)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\beta \varepsilon(t), \quad (18)$$

其中: \mathbf{a} 与 $\boldsymbol{\rho}(t)$ 都为正定对角矩阵,

$$\mathbf{a} = \text{diag}\{a_0, a_1\}, \quad a_0 > 0, \quad a_1 > 0,$$

$$\boldsymbol{\rho}(t) = \text{diag}\{\rho_0(t), \rho_1(t)\}, \quad \rho_0(0) > 0,$$

$$\rho_1(0) > 0, \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0, \quad \varepsilon(0) > 0.$$

4.2 稳定性分析(Stability analysis)

由式(3)(8)–(10)可将空间机械臂系统的动力学模型化为

$$\mathbf{M}_x \dot{\mathbf{r}} + \mathbf{C}_x \mathbf{r} = \boldsymbol{\tau}_x - \mathbf{K}_p \dot{e} + \mathbf{K}_p \tanh \dot{e} - \mathbf{G}_x + \mathbf{d}, \quad (19)$$

其中: $\mathbf{d} = \mathbf{K}_p \dot{e} - \mathbf{K}_p \tanh \dot{e} - [\mathbf{M}_x \ddot{\mathbf{x}}_r + \mathbf{C}_x \dot{\mathbf{x}}_r]$, \mathbf{d} 代表系统的不确定项.

为证明系统的稳定性, 需要以下定理:

定理 1 不确定项 \mathbf{d} 满足

$$\|\mathbf{d}\| \leq \delta = \eta_0 + \eta_1 \|\dot{e}\|, \quad (20)$$

其中 η_0, η_1 为正常数.

$$\begin{aligned} \text{证} \quad \|\mathbf{d}\| &\leq \|\mathbf{M}_x\| (\|\ddot{\mathbf{x}}_d\| + \Lambda \|\frac{d}{dt} \tanh e\|) + \\ &\|\mathbf{C}_x\| (\|\dot{\mathbf{x}}_d\| + \Lambda \|\tanh e\|) + \\ &\|\mathbf{K}_p\| \|\dot{e}\| + \|\mathbf{K}_p\| \|\tanh \dot{e}\|. \end{aligned} \quad (21)$$

假设 $\|\mathbf{x}_d\| \leq \gamma_0$, $\|\dot{\mathbf{x}}_d\| \leq \gamma_1$, $\|\ddot{\mathbf{x}}_d\| \leq \gamma_2$, $\|\mathbf{C}_x\| \leq C \|\dot{\mathbf{x}}\|$, 其中: $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ 和 C 为正常数, λ_{\max} 为 \mathbf{M}_x 的最大特征值, 同时由于 $0 \leq \|\tanh e\| \leq 1$ 且

$$0 \leq \|\frac{d}{dt} \tanh e\| \leq \|\dot{e}\|,$$

可得

$$\|\mathbf{d}\| \leq \lambda_{\max} (\gamma_2 + \Lambda \|\dot{e}\|) + C (\|\dot{e}\| + \gamma_1) (\gamma_1 + \Lambda) + \|\mathbf{K}_p\| \|\dot{e}\| + \|\mathbf{K}_p\| \|\tanh \dot{e}\|, \quad (22)$$

所以 $\|\mathbf{d}\| \leq \delta = \eta_0 + \eta_1 \|\dot{e}\|$. 证毕.

为了便于证明系统的稳定性, 将控制律(11)代入空间机械臂动力学模型(19)中, 可得闭环系统误差方程为

$$\mathbf{M}_x \dot{\mathbf{r}} + \mathbf{C}_x \mathbf{r} = -\mathbf{K}_p \mathbf{r} + \boldsymbol{\tau}_r + \mathbf{d} + \mathbf{E}, \quad (23)$$

其中: $\mathbf{E} = \hat{\mathbf{G}}_x - \mathbf{G}_x$, \mathbf{E} 代表系统重力项的逼近误差.

定义如下 Lyapunov 函数证明闭环系统稳定性:

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{g}}^T \Gamma^{-1} \tilde{\mathbf{g}} + \frac{1}{2} \mathbf{r}^T \mathbf{M}_x(\mathbf{q}) \mathbf{r} + \\ &\frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{a}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{a}^{-1} \alpha^{-1} \boldsymbol{\rho}(t) \boldsymbol{\eta} + \\ &\beta^{-1} \varepsilon(t) + 2 \mathbf{y}^T \mathbf{K}_p \Lambda \mathbf{y}, \end{aligned} \quad (24)$$

式中: $\mathbf{y} = [\sqrt{\ln \cosh e_1} \ \cdots \ \sqrt{\ln \cosh e_n}]^T$, $\tilde{\boldsymbol{\eta}} = \hat{\boldsymbol{\eta}} - \boldsymbol{\eta}$, $\tilde{g} = \hat{g} - g$.

对 V 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \tilde{\mathbf{g}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{g}}} + \mathbf{r}^T \mathbf{M}_x(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{r}} + \frac{1}{2} \mathbf{r}^T \dot{\mathbf{M}}_x(\mathbf{q}) \mathbf{r} + \\ &\tilde{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{a}^{-1} \dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}} + \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{a}^{-1} \alpha^{-1} \dot{\boldsymbol{\rho}}(t) \boldsymbol{\eta} + \\ &\beta^{-1} \dot{\varepsilon}(t) + 2 \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{K}_p \Lambda \tanh e. \end{aligned} \quad (25)$$

考虑到式(23), 有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \tilde{\mathbf{g}}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\mathbf{g}}} + \mathbf{r}^T (-\mathbf{K}_p \mathbf{r} + \boldsymbol{\tau}_r + \mathbf{d} + \mathbf{E}) + \\ &\tilde{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{a}^{-1} \dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}} + \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{a}^{-1} \alpha^{-1} \dot{\boldsymbol{\rho}}(t) \boldsymbol{\eta} + \\ &\beta^{-1} \dot{\varepsilon}(t) + 2 \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{K}_p \Lambda \tanh e. \end{aligned} \quad (26)$$

因 $\dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}} = \dot{\hat{\boldsymbol{\eta}}}$ 且 $\dot{\tilde{g}} = \dot{\hat{g}}$, 将式(13)–(14)(16)–(18)代入上式, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\tilde{\mathbf{g}}^T \boldsymbol{\varphi}^T(\mathbf{q}) \mathbf{r} - \mathbf{r}^T \mathbf{K}_p \mathbf{r} - \frac{\|\mathbf{r}\|^2 \hat{\delta}^2}{\|\mathbf{r}\| \hat{\delta} + \varepsilon} + \mathbf{r}^T \mathbf{d} + \\ &\mathbf{r}^T \mathbf{E} - \tilde{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{a}^{-1} \boldsymbol{\rho}(t) \hat{\boldsymbol{\eta}} + \|\mathbf{r}\| \tilde{\boldsymbol{\eta}}^T \boldsymbol{\theta} - \\ &\boldsymbol{\eta}^T \mathbf{a}^{-1} \boldsymbol{\rho}(t) \boldsymbol{\eta} - \varepsilon(t) + 2 \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{K}_p \Lambda \tanh e. \end{aligned} \quad (27)$$

由于 $\mathbf{r}^T \mathbf{d} \leq \|\mathbf{r}\| \|\mathbf{d}\|$, 则

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\tilde{\mathbf{g}}^T \boldsymbol{\varphi}^T(\mathbf{q}) \mathbf{r} - \mathbf{r}^T \mathbf{K}_p \mathbf{r} - \frac{\|\mathbf{r}\|^2 \hat{\delta}^2}{\|\mathbf{r}\| \hat{\delta} + \varepsilon} + \|\mathbf{r}\| \|\mathbf{d}\| + \\ &\mathbf{r}^T \mathbf{E} - \tilde{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{a}^{-1} \boldsymbol{\rho}(t) \hat{\boldsymbol{\eta}} + \|\mathbf{r}\| \tilde{\boldsymbol{\eta}}^T \boldsymbol{\theta} - \\ &\boldsymbol{\eta}^T \mathbf{a}^{-1} \boldsymbol{\rho}(t) \boldsymbol{\eta} - \varepsilon(t) + 2 \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{K}_p \Lambda \tanh e. \end{aligned} \quad (28)$$

利用 $\|d\| \leq \delta$, $\tilde{\delta} = \hat{\delta} - \delta$, $\tilde{\delta} = \tilde{\eta}^T \theta$, $\tilde{\eta} = \hat{\eta} - \eta$ 且

$$-\frac{\|r\|^2 \tilde{\delta}^2}{\|r\| \hat{\delta} + \varepsilon} + \|r\| \hat{\delta} \leq \varepsilon(t),$$

上式可化为

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\tilde{g}^T \varphi^T(q)r - r^T K_p r + r^T E - \\ & \tilde{\eta}^T a^{-1} \rho(t) \tilde{\eta} - \tilde{\eta}^T a^{-1} \rho(t) \eta - \\ & \eta^T a^{-1} \rho(t) \eta + 2\dot{e}^T K_p \Lambda \tanh e. \end{aligned} \quad (29)$$

由于

$$\begin{aligned} E &= \hat{G}_x - G_x = \varphi(q)\tilde{g}, \\ \tilde{g}^T \varphi^T(q)r &= r^T \varphi(q)\tilde{g}, \end{aligned}$$

可得

$$-\tilde{g}^T \varphi^T(q)r + r^T E = r^T (E - \varphi(q)\tilde{g}) = 0. \quad (30)$$

将式(30)代入式(29), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -r^T K_p r - \tilde{\eta}^T a^{-1} \rho(t) \tilde{\eta} - \\ & \tilde{\eta}^T a^{-1} \rho(t) \eta - \eta^T a^{-1} \rho(t) \eta + \\ & 2\dot{e}^T K_p \Lambda \tanh e. \end{aligned} \quad (31)$$

将式(10)代入式(31), 有

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\tanh e^T \Lambda K_p \Lambda \tanh e - \dot{e}^T K_p \dot{e} - \\ & \frac{1}{2} \tilde{\eta}^T a^{-1} \rho(t) \tilde{\eta} - \frac{1}{2} \eta^T a^{-1} \rho(t) \eta - \\ & \frac{1}{2} (\tilde{\eta} + \eta)^T a^{-1} \rho(t) (\tilde{\eta} + \eta). \end{aligned} \quad (32)$$

由于 a 与 $\rho(t)$ 为正定对角矩阵, 可得

$$\dot{V} \leq -\tanh e^T \Lambda K_p \Lambda \tanh e - \dot{e}^T K_p \dot{e}. \quad (33)$$

收敛性分析:

1) 由于 Λ 与 K_p 为正定对角矩阵, 那么由式(33)有 $\dot{V} \leq 0$, 当且仅当 $e = \dot{e} = 0$ 成立时, 可推得 $\dot{V} = 0$, 也就是说, \dot{V} 是严格负定的, 因此根据Lyapunov稳定定理知, 系统是渐近稳定的, 且由LaSalle定理知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e \rightarrow 0$, $\dot{e} \rightarrow 0$, 亦即 $x \rightarrow x_d$, $\dot{x} \rightarrow \dot{x}_d$.

2) 由于 $\dot{V} \leq 0$, 可以得到

$$0 \leq V(t) \leq V(0), \quad \forall t \geq 0.$$

当 $V(t) \in L_\infty$ 时, 有 $r, \tilde{g}, \tilde{\eta} \in L_\infty$, 即 $\hat{g}, \hat{\eta}, \rho(t), \varepsilon(t) \in L_\infty$.

5 仿真研究(Simulation research)

为了验证所设计的自适应鲁棒控制器的有效性, 对平面两杆空间机械臂在地面装调和空间应用阶段的轨迹跟踪控制进行仿真研究. 平面两杆空间机械臂示意图如图2所示, 仿真参数见表1, 仿真环境为MATLAB7.0, 仿真时间为10s.

系统基座的初始姿态角为 -2 rad , 空间机械臂末端的初始位置为 $(1.2, -0.05)$, 期望轨迹为

$$\begin{cases} x_{1d} = 0.28 \cos\left(\frac{\pi t}{5}\right) + 0.85 \\ x_{2d} = 0.28 \sin\left(\frac{\pi t}{5}\right). \end{cases}$$

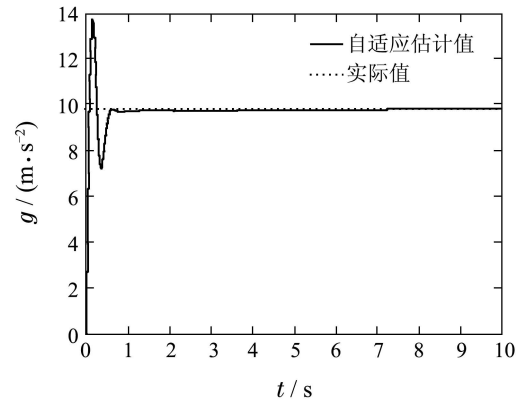
控制器参数:

$$\begin{aligned} \Lambda &= \text{diag}\{5, 5\}, \quad K_p = \text{diag}\{50, 50\}, \\ \Gamma &= 50, \quad \alpha = 3, \quad \beta = 1, \quad \varepsilon(0) = 0.5, \\ a &= \text{diag}\{50, 50\}, \quad \rho(0) = \text{diag}\{0.5, 0.5\}. \end{aligned}$$

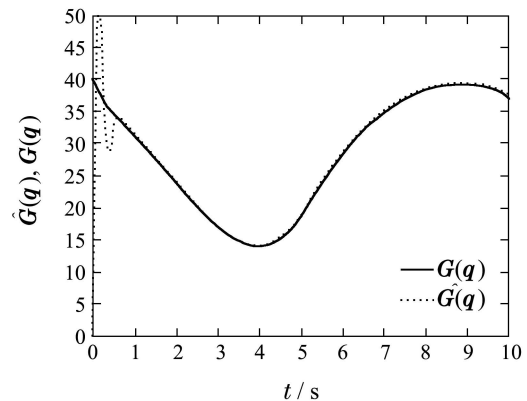
仿真结果如下:

1) 地面装调阶段.

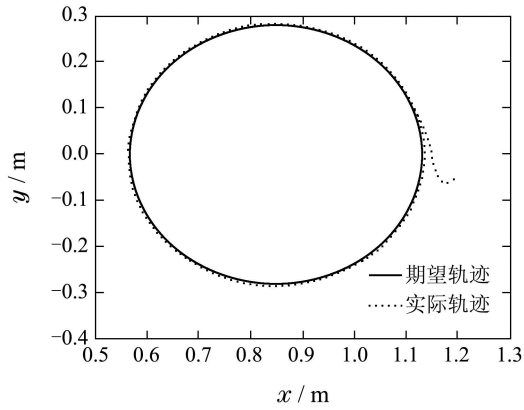
假设地面重力加速度 g_0 近似为 9.8 m/s^2 , 空间机械臂系统地面装调阶段的仿真结果见图6(a)–(d), 重力项的逼近值用其范数 $\|f(\cdot)\|$ 表示. 从图6(a)看出, 所设计的自适应律能够保证重力加速度 g 在地面装调阶段快速地逼近地面重力加速度 9.8 m/s^2 ; 从图6(b)看出, 重力项的估计值能在 $t = 0.7 \text{ s}$ 内较好的逼近实际值; 从图6(c)看出, 所提出的控制策略能够保证机械臂末端执行器的实际轨迹, 并快速地跟踪上期望轨迹; 从图6(d)看出机械臂在地面运动时, 关节1和2所需的控制力矩较大.



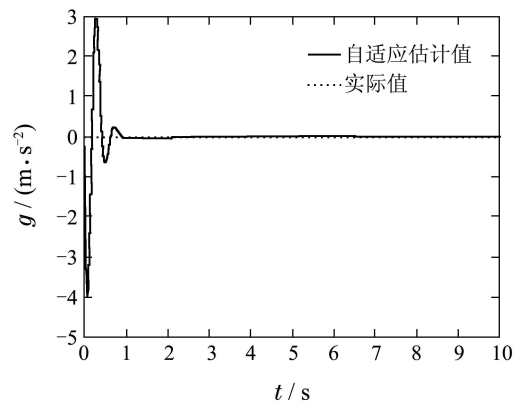
(a) 地面重力加速度 g 及逼近结果



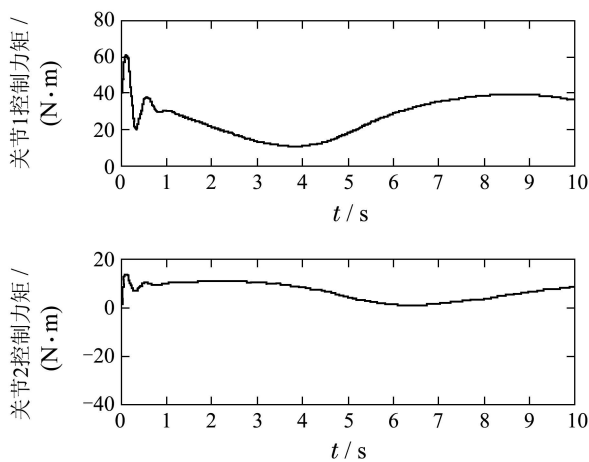
(b) 地面模型重力项 $\|G_x(q)\|$ 及其逼近结果



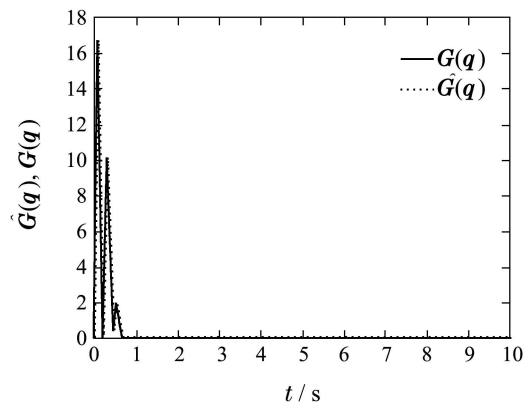
(c) 地面末端期望与实际轨迹



(a) 空间重力加速度 g 及逼近结果



(d) 地面关节1和2的控制力矩



(b) 空间模型重力项 $\|G_x(q)\|$ 及其逼近结果

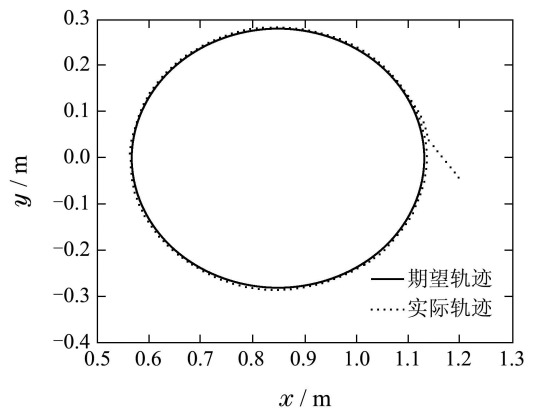
图 6 地面轨迹跟踪结果

Fig. 6 Trajectories tracking results on the ground

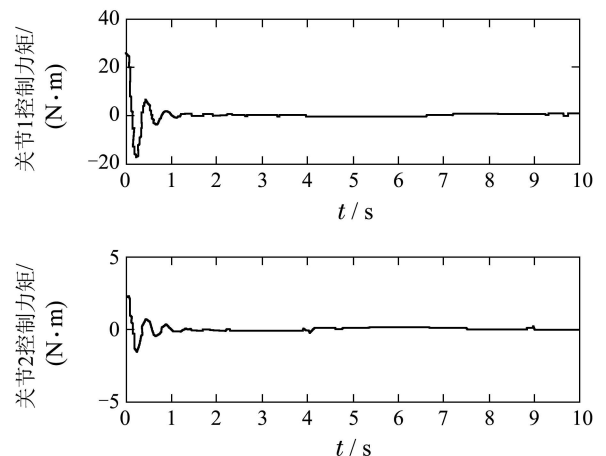
2) 空间应用阶段.

假设空间重力加速度 g 近似为 0 m/s^2 , 空间机械臂系统空间应用阶段的仿真结果见图7(a)–7(e), 重力项的逼近值用其范数 $\|f(\cdot)\|$ 表示. 从图7(a)可以看出, 通过自适应律在线估计的重力加速度 g 能够快速逼近空间的重力加速度, g 几乎为 0 m/s^2 ; 从图7(b)看出, 在 $t = 0.8\text{ s}$ 内能够保证重力项的估计值较好的逼近实际值; 从图7(c)看出, 所提出的控制策略能够保证机械臂末端执行器的实际轨迹快速地跟踪期望轨迹, 并且跟踪误差快速收敛到0; 从图7(d)可看出关节1和2所需的控制力矩较之地面装调阶段明显变小; 从图7(e)可看出机械臂本体运动会引起基座的耦合运动, 且基座的姿态角和角速度并不受控.

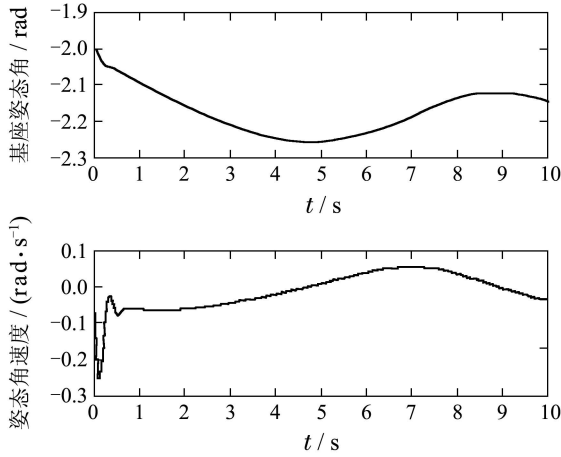
通过以上两组仿真曲线可得, 不管空间机械臂系统是在地面装调阶段还是在空间应用阶段, 所设计的自适应控制律均能很好的在线估计所处未知环境的重力加速度 g , 鲁棒项均能够补偿系统的不确定性项, 从而实现高精度的轨迹跟踪.



(c) 空间末端期望与实际轨迹



(d) 空间关节1和2的控制力矩



(e) 基座的姿态和速度

图7 空间轨迹跟踪结果

Fig. 7 Trajectories tracking results in space

6 结论(Conclusions)

针对空间机械臂在地面装调和空间应用阶段末端的轨迹跟踪控制,提出了一种自适应鲁棒控制策略。通过分析重力项对空间机械臂轨迹跟踪控制的影响,设计自适应控制律来在线估计空间机械臂所处未知环境的重力加速度 g ,从而得到重力项的估计,系统的不确定性通过鲁棒控制器来补偿。该控制方法的优点是控制器的设计不需要对系统的动力学方程进行参数线性化,避免了回归矩阵的复杂计算,从而降低了计算量,并可以同时应用于空间机械臂的地面装调和空间应用过程。利用李雅普诺夫理论证明了整个闭环系统的渐近稳定性。仿真结果表明,在重力环境下的地面装调和微重力环境下的空间应用两阶段中,该控制器对空间机械臂的末端控制均能达到较高的轨迹跟踪精度,具有重要的工程应用价值。

参考文献(References):

- [1] 吴立成,孙富春,孙增圻,等.空间机器人建模、规划与控制研究现状[J].中南大学学报(自然科学版),2005,36(1):18-24.
(WU Licheng, SUN Fuchun, SUN Zengqi, et al. A review on modeling, planning and control of space robot [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2005, 36(1): 18-24.)
- [2] HUANG P F, XU Y S, LIANG B. Modeling human intelligence and application to space object capturing [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Information Acquisition*. Hong Kong: IEEE, 2005: 210-215.
- [3] PAPAPOPOULOS E, TORTOPIDIS I, NANOS K. Smooth planning for free-floating space robot using polynomials [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain: IEEE, 2005: 4272-4277.
- [4] SAWADA H, UI K, MORI M, et al. Micro-gravity experiment of a space robotic arm using parabolic flight [J]. *Advanced Robotics*, 2004, 18(3): 247-267.
- [5] 姚燕生,梅涛.空间操作的地面模拟方法——水浮法[J].机械工程学报,2008,44(3):182-188.
(YAO Yansheng, MEI Tao. Simulation method of space operation on the ground-buoyancy method [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(3): 182-188.)
- [6] 史士财,吴剑威,崔平远,等.空间机械臂全局反作用优化及其地面试验研究[J].机器人,2009,31(3):242-248.
(SHI Shicai, WU Jianwei, CUI Pingyuan, et al. Global reaction optimization of space manipulator and its ground test [J]. *Robot*, 2009, 31(3): 242-248.)
- [7] 税海涛,李迅,马宏绪.空间机械臂位形与基座姿态协同控制研究[J].宇航学报,2011,32(8):1708-1714.
(SHUI Haitao, LI Xun, MA Hongxu. Coordinated control for space manipulator configuration and base orientation [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(8): 1708-1714.)
- [8] 谢箭,刘国良,颜世佐,等.基于神经网络的不确定性空间机器人自适应控制方法研究[J].宇航学报,2010,31(1):123-129.
(XIE Jian, LIU Guoliang, YAN Shizuo, et al. Study on neural adaptive control method for space manipulator [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(1): 123-129.)
- [9] 张文辉,齐乃明,尹洪亮.基于滑模变结构的空间机器人神经网络跟踪控制[J].控制理论与应用,2011,28(9):1141-1144.
(ZHANG Wenhui, QI Naiming, YIN Hongliang. Neural network tracking control of space robot base on sliding-mode variable structure [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(9): 1141-1144.)
- [10] 丰保民,马广程,温奇咏,等.任务空间内空间机器人鲁棒智能控制器设计[J].宇航学报,2007,28(4):914-919.
(FENG Baomin, MA Guangcheng, WEN Qiyong, et al. Design of robust intelligent controller for space robot in task space [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(4): 914-919.)
- [11] 霍伟.机器人动力学与控制[M].北京:高等教育出版社,2005.
(HUO Wei. *Robot Dynamics and Control* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.)

作者简介:

刘福才 (1966-),男,博士生导师,主要研究方向模糊辨识与预测控制等, E-mail: lfc_xb@263.net;

高娟娟 (1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为空间机器人建模与控制, E-mail: gaojuanjuan.2008@163.com;

王芳 (1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为视觉伺服, E-mail: fang159357@yahoo.cn.