

考虑重力影响的空间机械臂轨迹跟踪滑模控制

刘福才^a, 梁利环^a, 秦利^a, 王文魁^b

(燕山大学 a. 工业计算机控制工程河北省重点实验室, b. 国防科技学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对空间机械臂由地面装调到空间应用过程中重力环境发生变化的问题, 使用滑模控制器对空间机械臂进行控制, 通过将配置特殊的非线性结构-fal函数引入趋近律的设计中, 提出一种新的基于趋近律的滑模控制方法, 并基于李亚普诺夫理论证明了闭环系统的渐近稳定性. 仿真结果表明该方法能够很好地完成不同重力环境下机械臂的轨迹跟踪控制任务, 并具有较强的鲁棒性.

关键词: 空间机械臂; 微重力; 滑模控制; 地面装调; 空间应用

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Sliding mode control for space manipulator trajectory tracking considering effects of gravity

LIU Fu-cai^a, LIANG Li-huan^a, QIN Li^a, WANG Wen-kui^b

(a. Key Lab of Industrial Computer Control of Hebei Province, b. National Defense Science and Technology College, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China. Correspondent: LIU Fu-cai, E-mail: lfc@ysu.edu.cn)

Abstract: Considering gravity change from ground alignment under the gravity environment to space applications under the micro-gravity environment, a sliding mode controller(SMC) is proposed to control the space manipulator. An SMC based on the reaching-law is proposed by introducing a nonlinear structure of special configuration fal function. The asymptotic stability of system is guaranteed based on the Lyapunov theory. Simulation results show that by using this strategy, the system can complete the trajectory tracking task under the different gravity environment and has strong robustness.

Key words: space manipulator; micro-gravity; sliding mode control; ground alignment; space applications

0 引言

随着航天事业的发展, 人类在太空中的活动越来越多, 大量的空间任务需要依靠宇航员来完成, 从而消耗了大量的人力和物力. 使用空间机器人代替宇航员进行作业可以大大减少系统耗资, 因此在未来的空间活动中, 空间机器人将扮演越来越重要的角色^[1-2]. 目前, 许多学者对空间机械臂的轨迹跟踪问题进行了研究^[3-4], 但是这些研究只是单纯地针对地面装调阶段或空间应用阶段中的一种情况, 而大多数空间机构都是在地面组装调试、在空间使用服役的. 地面与空间重力环境的差异, 使得空间机械臂在地面装调阶段和空间应用阶段模型存在很大不同, 系统的受力状态、运动行为受到新的考验. 重力变化会引起空间机械臂运动副间隙、摩擦阻力和驱动力的相应变化, 给机械臂的末端轨迹的精确控制带来了新的挑战. 因此,

设计有效的控制器对两个阶段的空间机械臂进行控制是目前空间科学技术急需研究的课题. 滑模控制器因其对系统的扰动及未建模动态具有较强的鲁棒性, 并且结构简单、响应快速, 已被广泛地应用于机械臂的控制中^[5-7]. 然而, 滑模变结构控制在本质上的不连续开关特性会引起系统的抖振问题.

综合考虑上述问题, 本文针对空间机械臂在地面装调与空间应用过程中重力发生变化的问题, 设计了一种滑模控制器, 并针对控制系统中的抖振问题, 利用非线性函数 fal 设计了一种改进的滑模控制算法. 基于 Lyapunov 稳定性理论对系统的稳定性进行了分析. 将本文方法与 PD 控制及改进趋近律的滑模控制^[8]算法作对比, 仿真结果表明本文的控制算法不仅能适应空间机械臂模型的变化, 而且还能有效抵抗系统的扰动, 从而使系统具有较强的鲁棒性.

收稿日期: 2013-06-07; 修回日期: 2013-08-22.

基金项目: 国家 863 计划项目(2011AA).

作者简介: 刘福才(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事模糊辨识与控制、空间机器人控制技术等研究; 梁利环(1990—), 女, 硕士, 从事机器人控制技术研究.

1 系统描述

针对空间机械臂系统作如下假设:

- 1) 系统为刚体系统;
- 2) 空间忽略重力, 系统处于自由漂浮状态, 在地面和空间系统均不受其他外力及外力矩作用;
- 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.

1.1 地面装调阶段模型

空间机械臂系统处于地面装调阶段时, 由于存在重力, 基座是固定的, 系统的模型为

$$D(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau. \quad (1)$$

其中: $D(q) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为系统的惯性矩阵, $B(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为离心力和哥氏力矩阵, $G(q) \in \mathbf{R}^n$ 为重力载荷向量矩阵, $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \in \mathbf{R}^n$ 为关节角的位移矢量, $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T \in \mathbf{R}^n$ 为作用在空间机械臂上的驱动力矩.

实际应用中, 机械臂系统不可避免地存在一些不确定性因素(如摩擦和扰动), 若考虑这些不确定性因素, 则空间机械臂系统的动力学模型为

$$D(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + d(q, \dot{q}, t) = \tau, \quad (2)$$

其中 $d(q, \dot{q}, t)$ 是系统的总和扰动, 包括摩擦力矩扰动和其他外部扰动.

将式(2)写成理想模型和干扰之和的形式, 则空间机械臂系统的动力学模型可以表示为

$$D_0(q)\ddot{q} + B_0(q, \dot{q})\dot{q} + G_0(q) + N(q, \dot{q}, t) = \tau. \quad (3)$$

其中: $D_0(q)$ 、 $B_0(q, \dot{q})$ 、 $G_0(q)$ 为模型标称值, $\Delta D(q)$ 、 $\Delta B(q, \dot{q})$ 、 $\Delta G(q)$ 为误差矩阵, $D_0(q) = D(q) - \Delta D(q)$, $G_0(q) = G(q) - \Delta G(q)$, $B_0(q, \dot{q}) = B(q, \dot{q}) - \Delta B(q, \dot{q})$; $N(q, \dot{q}, t)$ 为总体干扰量, 具体形式为

$$N = \Delta D(q)\ddot{q} + \Delta B(q, \dot{q})\dot{q} + \Delta G(q) + d. \quad (4)$$

用 x 表示空间机械臂末端在工作空间的位姿, $J(q) \in \mathbf{R}^{6 \times n}$ 为系统的雅克比矩阵, 则系统在工作空间的运动学方程为

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}. \quad (5)$$

1.2 空间应用阶段模型

空间机械臂处于空间应用阶段时, 由于空间只有微重力, 整个系统的运动将增加 6 个自由度. 此时得到含有不确定因素的动力学模型为

$$D(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + d(q, \dot{q}, t) = \tau. \quad (6)$$

其中: $D(q) \in \mathbf{R}^{(n+6) \times (n+6)}$ 为空间机械臂系统的惯性矩阵, $B(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^{(n+6) \times (n+6)}$ 为系统的离心力和哥氏力矩阵, $q = [q_b^T, q_m^T]^T \in \mathbf{R}^{n+6}$ 为系统的广义位

移矢量, $q_b = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T \in \mathbf{R}^6$ 为基座的位姿矢量, $q_m = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \in \mathbf{R}^n$ 为关节角的位移矢量, $\tau = [0_{6 \times 1}^T, \tau_{n \times 1}^T]^T \in \mathbf{R}^{n+6}$ 为作用在空间机械臂上的驱动力矩, $0_{6 \times 1}$ 、 $\tau_{n \times 1}$ 分别为作用在基座和实际机械臂关节上的驱动力矩.

将式(6)写成理想模型和干扰之和的形式为

$$D_0(q)\ddot{q} + B_0(q, \dot{q})\dot{q} + N(q, \dot{q}, t) = \tau. \quad (7)$$

式中各量所代表的含义与地面装调阶段一样.

此时, $J^*(q) = [J_b(q), J_m(q)] \in \mathbf{R}^{6 \times (n+6)}$ 为广义雅克比矩阵, 其中 $J_b(q) = \partial x / \partial q_b$ 为系统基座的雅克比矩阵, $J_m(q) = \partial x / \partial q_m$ 为机械臂本体的雅克比矩阵, 则系统在工作空间的运动学方程为

$$\dot{x} = J^*(q)\dot{q}. \quad (8)$$

空间机械臂动力学方程满足如下特性^[9].

特性 1 $D(q)$ 对称可逆且有界.

特性 2 存在 $k_b > 0$, $k_g > 0$ 及正定函数 $P(q, \dot{q})$ 和 $Q(q)$, 使得 $\|G(q)\| \leq k_g \|q\|$, $G^T(q)G(q) \leq Q(q)$, $\|B(q, \dot{q})\| \leq k_b \|\dot{q}\|$, $B^T(q, \dot{q})B(q, \dot{q}) \leq P(q, \dot{q})$.

特性 3 对于 $\forall \eta \in \mathbf{R}^n$, 有 $\frac{1}{2}\eta^T \dot{D}\eta = \eta^T B\eta$.

特性 4 给定扰动及误差矩阵满足 $d_l \leq \|d\| \leq d_h$, $\Delta D_l \leq \|\Delta D\| \leq \Delta D_h$, $\Delta B_l \leq \|\Delta B\| \leq \Delta B_h$, $\Delta G_l \leq \|\Delta G\| \leq \Delta G_h$, 其中 h 和 l 分别为上下界值.

2 滑模控制器设计

2.1 空间机械臂滑模控制器设计

含有扰动的空间机械臂在地面装调及空间应用阶段的动力学模型可由式(2)和(6)表示. 本文以地面装调阶段为例进行滑模控制器的设计.

由于 $D(q)$ 是可逆的, 由式(2)可得

$$\ddot{q} = D^{-1}(q)[\tau - B(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) - d(q, \dot{q}, t)]. \quad (9)$$

定义系统的跟踪误差和加速度误差分别为

$$e(t) = q_d(t) - q(t), \quad (10)$$

$$\ddot{e}(t) = \ddot{q}_d(t) - \ddot{q}(t), \quad (11)$$

其中 q_d 和 q 分别为期望的和实际的关节矢量.

选取如下所示的滑模面:

$$s(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + \dot{e}(t), \quad (12)$$

其中 $K_P \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $K_I \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 分别是正定比例和积分增益矩阵. 假设系统为标称模型, 对式(12)求导并将式(9)和(11)代入, 得到

$$\dot{s} = K_P \dot{e} + K_I e + \ddot{q}_d + D_0^{-1}(B_0 \dot{q} + G_0 - \tau). \quad (13)$$

其中: $s = s(t)$, $D_0 = D_0(q)$, $B_0 = B_0(q, \dot{q})$, $G_0 = G_0(q)$. 令 $\dot{s} = 0$, 导出系统的等效控制律

$$\tau_{eq} = D_0(K_P \dot{e} + K_I e + \ddot{q}_d) + B_0 \dot{q} + G_0. \quad (14)$$

传统滑模控制中所取趋近律为 $\dot{s} = -K_r \text{sign}(s)$,

其中 $\mathbf{K}_r = \text{diag}(k_1, \dots, k_n)$ 为切换增益, 且 k_i 均为正常数, 则

$$s\dot{s} = -s\mathbf{K}_r \text{sign}(s) \leq 0. \quad (15)$$

假设存在时刻 t_0 , 使得 $e(t_0) = 0$, 且积分项 $\int_0^{t_0} e(\tau)d\tau = 0$, 则式(12)满足 $s(t_0) = 0$. 因此, 所选滑模面满足滑动模态的存在性和可达性. 此时的切换控制律为

$$\tau_s = \mathbf{K}_r \text{sign}(s). \quad (16)$$

系统总的控制力矩是二者之和, 即

$$\tau = \tau_{eq} + \tau_s. \quad (17)$$

当空间机械臂处于空间应用阶段时, 与地面装调阶段相比, 该阶段不受重力影响且自由度为 $n + 6$. 此时系统的等效控制律可写为

$$\tau_{eq}^* = \tau_{eq} + \mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t), \quad (18)$$

其中 $\mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ 是由地面装调阶段与空间应用阶段的模型差异引起的总体干扰.

由于存在切换控制律 τ_s , τ_s 可以对系统的不确定性及扰动等一些非理想因素进行补偿, 从而保证了系统的鲁棒性. 因此, 可以将式(18)中的 $\mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ 作为系统的非理想因素处理, 并使用 τ_s 对其进行补偿. 使用式(17)所示的控制器同样能够对空间应用阶段的机械臂进行控制. 合理调整控制器参数使得在地面装调和空间应用阶段均取得很好的跟踪效果, 从而完成空间机械臂由地面装调到空间应用的任务.

2.2 系统的稳定性分析

定理 1 针对空间机械臂系统(2)和(6), 控制器由式(17)给出, 则空间机械臂系统是渐近稳定的.

证明 取李亚普诺夫函数

$$V(t) = \frac{1}{2} s^T \mathbf{D} s. \quad (19)$$

由机械臂特性 1 可知, 式(19)是正定的. 对 $V(t)$ 求导并由特性 3 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} s^T \dot{\mathbf{D}} s + s^T \mathbf{D} \dot{s} = \\ &= \frac{1}{2} s^T (\dot{\mathbf{D}} - 2\mathbf{B}) s + s^T \mathbf{B} s + s^T \mathbf{D} \dot{s} = \\ &= s^T [\mathbf{B} s + \mathbf{D} \dot{s}]. \end{aligned} \quad (20)$$

对式(12)求导, 并由式(9)、(11)和(17)得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T (\mathbf{B} s + \mathbf{D} \mathbf{K}_P \dot{e} + \mathbf{D} \mathbf{K}_I e + \mathbf{D} \ddot{q}_d + \\ &= \mathbf{B} \dot{q} + \mathbf{G} + \mathbf{d} - \tau_{eq} - \tau_s). \end{aligned} \quad (21)$$

将式(12)和(14)代入(21), 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T \left[\mathbf{B} \left(\mathbf{K}_P e + \mathbf{K}_I \int_0^t e(\tau) d\tau + \dot{e} \right) + \mathbf{D} (\mathbf{K}_P \dot{e} + \right. \\ &= \mathbf{K}_I e + \ddot{q}_d) + \mathbf{B} \dot{q} + \mathbf{G} + \mathbf{d} - \mathbf{D}_0 (\mathbf{K}_P \dot{e} + \\ &= \mathbf{K}_I e + \ddot{q}_d) - \mathbf{B}_0 \dot{q} - \mathbf{G}_0 \left. \right] - s^T \tau_s. \end{aligned} \quad (22)$$

由 $\mathbf{D}_0 = \mathbf{D} - \Delta \mathbf{D}$, $\mathbf{B}_0 = \mathbf{B} - \Delta \mathbf{B}$, $\mathbf{G}_0 = \mathbf{G} - \Delta \mathbf{G}$ 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T \left[(\mathbf{B}_0 + \Delta \mathbf{B}) \left(\mathbf{K}_P e + \mathbf{K}_I \int_0^t e(\tau) d\tau + \right. \right. \\ &= \dot{e} \left. \left. \right) + \Delta \mathbf{D} (\mathbf{K}_P \dot{e} + \mathbf{K}_I e + \ddot{q}_d) + \right. \\ &= \Delta \mathbf{B} \dot{q} + \Delta \mathbf{G} + \mathbf{d} \left. \right] - s^T \tau_s. \end{aligned} \quad (23)$$

将式(16)代入(23), 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T \left[(\mathbf{B}_0 + \Delta \mathbf{B}) \left(\mathbf{K}_P e + \mathbf{K}_I \int_0^t e(\tau) d\tau + \dot{e} \right) + \right. \\ &= \Delta \mathbf{D} (\mathbf{K}_P \dot{e} + \mathbf{K}_I e + \ddot{q}_d) + \Delta \mathbf{B} \dot{q} + \\ &= \Delta \mathbf{G} + \mathbf{d} \left. \right] - s^T \mathbf{K}_r \text{sign}(s). \end{aligned} \quad (24)$$

为了方便描述, 定义

$$\begin{aligned} \Phi &= (\mathbf{B}_0 + \Delta \mathbf{B}) \left(\mathbf{K}_P e + \mathbf{K}_I \int_0^t e(\tau) d\tau + \dot{e} \right) + \\ &= \Delta \mathbf{D} (\mathbf{K}_P \dot{e} + \mathbf{K}_I e + \ddot{q}_d) + \Delta \mathbf{B} \dot{q} + \Delta \mathbf{G} + \mathbf{d}, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \Phi_m &= (\mathbf{B}_0 + \Delta \mathbf{B}_h) \left(\mathbf{K}_P e + \mathbf{K}_I \int_0^t e(\tau) d\tau + \dot{e} \right) + \\ &= \Delta \mathbf{D}_h (\mathbf{K}_P \dot{e} + \mathbf{K}_I e + \ddot{q}_d) + \\ &= \Delta \mathbf{B}_h \dot{q} + \Delta \mathbf{G}_h + \mathbf{d}_h, \end{aligned} \quad (26)$$

可知

$$\begin{aligned} \Phi &= [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]^T \in \mathbf{R}^n, \\ \Phi_m &= [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n]^T \in \mathbf{R}^n, \end{aligned}$$

则式(24)可以写为

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^n s_i \phi_i - \sum_{i=1}^n k_i |s_i|. \quad (27)$$

取 $\mathbf{K}_r \mathbf{I}_n > |\Phi_m|$, 其中 $\mathbf{I}_n = [1, 1, \dots, 1]^T \in \mathbf{R}^n$, 则

$$\dot{V} \leq 0. \quad (28)$$

由机械臂的性质 2 和性质 4 可以保证不等式 $\mathbf{K}_r \mathbf{I}_n > |\Phi_m|$ 成立. \square

3 抖振抑制研究

实际的应用中这种传统设计方法往往受到限制, 原因是非连续控制导致系统的抖振十分强烈, 对机械系统的损害很大. 为了对抖振进行抑制, 部分学者通过对趋近律进行改进来抑制抖振^[10-11]. 本文在文献[8,10]的基础上将 fal 函数引入趋近律的设计中, 设计了一种改进趋近律的滑模变结构控制.

fal 函数是自抗扰控制中引入的一个重要的非线性函数^[12], 具有较好的滤波效果, 具体表达式为

$$\text{fal}(e, a, \delta) = \begin{cases} |e|^a \text{sign}(e), & |e| > \delta; \\ e/\delta^{1-a}, & |e| \leq \delta. \end{cases} \quad (29)$$

其中: a 为 0~1 之间的常数, δ 为滤波因子且 $\delta > 0$, fal 函数与 sigmoid 函数的对比曲线如图 1 所示. 从图 1 可以看出, fal 函数结合了 sigmoid 函数^[8]及指数函数^[10]的优点, 在误差较大时趋近速度比 sigmoid 大, 可使系统更加快速到达滑模面. 当系统状态接近滑模面时, 穿过滑模面的速度有限, 可以削弱系统的抖振.

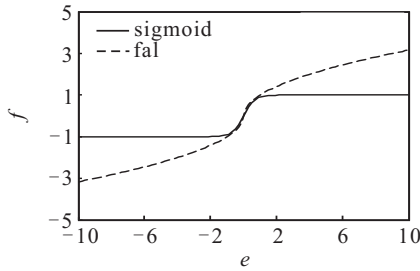


图 1 fal 与 sigmoid 函数对比曲线

由图 1 可以看出 fal 满足

$$\begin{cases} fal > 0, e > 0; \\ fal \leq 0, e \leq 0. \end{cases} \quad (30)$$

因此, 取趋近律为 $\dot{s} = -K_r fal(s, a, \delta)$, 则有 $s\dot{s} \leq 0$, 满足滑模存在及可达的条件. 根据 2.2 节的分析可以看出, 使用改进的趋近律依旧可以保证系统的渐近稳定性. 系统的控制框图如图 2 所示.

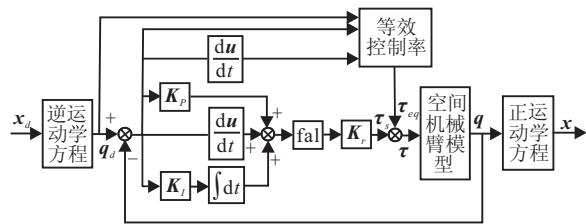


图 2 空间机械臂滑模控制结构

4 仿真研究

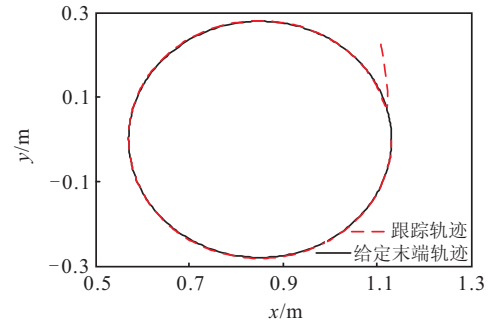
为了验证本文所设计控制方法的有效性, 以平面二连杆空间机械臂为研究对象, 对其在地面装调和空间应用阶段的轨迹跟踪情况进行仿真研究. 表 1 为空间机械臂系统的仿真参数. 控制器参数为 $K_P = \text{diag}(100, 100)$, $K_I = \text{diag}(250, 250)$, $a = 0.5$, $\delta = 0.02$. 使用本文改进的趋近律对系统进行控制时, $K_r = \text{diag}(700, 500)$, 使用 sigmoid 函数进行控制时 $K_r = \text{diag}(1000, 800)$. 对系统的每个关节施加扰动 $d = 20 + 5\dot{q} + 20\text{sign}(\dot{q}) + 20\text{sign}(15(t - 0.5))$, 机械臂的末端抓手的期望末端轨迹为

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

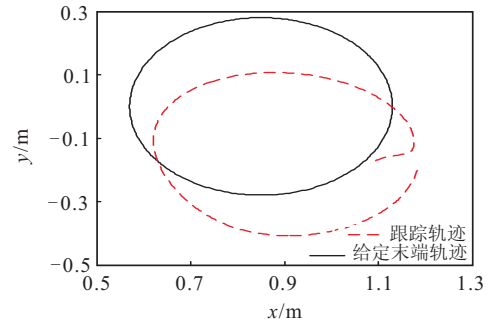
表 1 平面两杆机械臂仿真参数

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

为了突出本文方法的优越性, 仿真比较了使用含有重力补偿项的 PD 控制器在无扰动时的控制效果及使用 sigmoid 改进的滑模控制器在有扰动时的控制效果. 仿真结果如图 3~图 5 所示. 在空间和地面均考虑重力补偿, 所设计的 PD 控制器为 $\tau = K_p e + K_d \dot{e} + G$, 控制器的参数为 $K_p = 250$, $K_d = 50$.

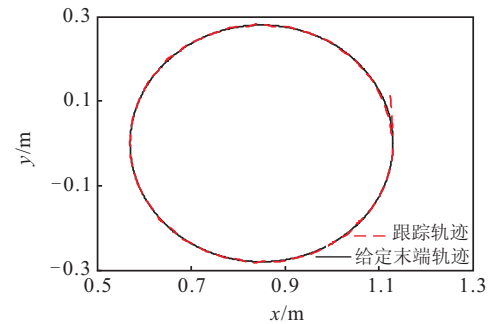


(a) 地面装调阶段

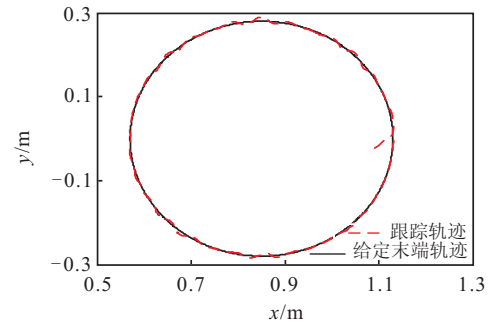


(b) 空间应用阶段

图 3 PD 控制下两个阶段的末端轨迹跟踪情况



(a) 地面装调阶段



(b) 空间应用阶段

图 4 本文方法控制下系统末端轨迹跟踪情况

由图 3 和图 4 可以看出, 使用 PD 控制器对机械臂进行控制时, 在地面可以得到很好的控制效果; 当在空间时, 由于重力消失, 机械臂将处于自由漂浮状态, 模型会发生变化. 控制器中的重力补偿会对机械臂产生影响, 从而无法跟踪上期望轨迹. 而使用本文的控制方法对两种情况下机械臂进行控制时, 由于滑模控制中切换控制律的存在, 可以保证系统的鲁棒性,

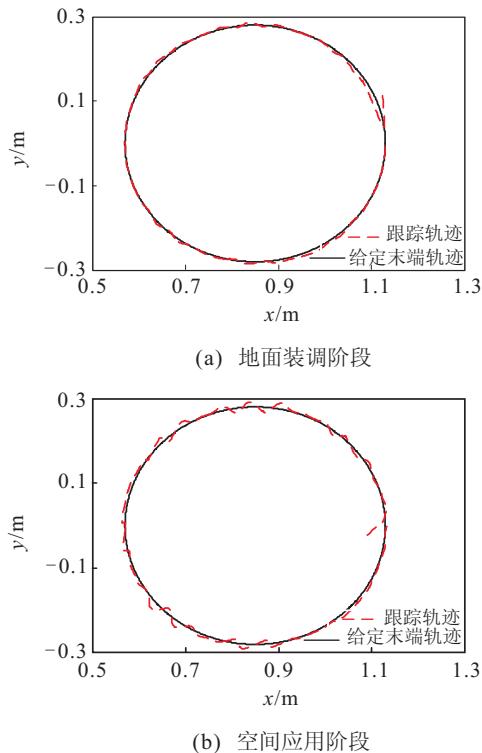


图 5 趋近律为 sigmoid 函数时末端轨迹跟踪情况

从而可以使空间机械臂在地面装调阶段和空间应用阶段均能很好地跟踪上期望的末端轨迹。

由图 4 和图 5 可看出, 使用趋近律为 sigmoid 函数的滑模控制器对两个阶段的空间机械臂进行控制时, 也能够保证系统的稳定性. 然而, 对比图 4(b) 和图 5(b) 即可发现, 本文设计的控制器对于抖振的削弱作用更加明显, 控制效果有所提高. 由此验证了本文所设计的改进的滑模控制器的有效性与实用性.

5 结 论

针对空间机械臂从地面装调到空间应用过程中考虑重力影响的末端轨迹跟踪控制问题, 提出了一种改进趋近律的滑模控制策略. 在传统滑模控制趋近律的基础上, 通过将 fal 函数引入到趋近律的设计中, 使控制器的性能有所改善. 基于李亚普诺夫理论证明了闭环系统的渐近稳定性, 并通过仿真验证了本文的控制算法不仅能适应不同重力环境下机械臂模型的变化, 而且还能有效抵抗系统的扰动, 使系统具有较强的鲁棒性.

参考文献(References)

[1] Landzettel K, Preusche C, Albu-schaffer A, et al. Robotic on-orbit servicing-DLR's experience and perspective[C]. Proc of IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Beijing, 2006: 4587-4594.
 [2] Papadopoulos E G, Dubwsky S. On the nature of control algorithms for free floating space manipulators[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1991, 7(6): 750-758.

[3] Hanlei Wang. On adaptive inverse dynamics for free-floating space manipulators[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2011, 59(10): 782-788.
 [4] 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 J, Liu G L, Yan S Z, et al. Study on neural network adaptive control method for uncertain space manipulator[J]. J of Astronautics, 2010, 31(1): 123-129.)
 [5] Nurkan Yagiz, Yuksel Hacioglu. Robust control of a spatial robot using fuzzy sliding modes[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2009, 49(1/2): 114-127.
 [6] Fabricio Garelli, Luis Gracia, Antonio Sala, et al. Sliding mode speed auto-regulation technique for robotic tracking[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2011, 59(7/8): 519-529.
 [7] 晁红敏, 胡跃明. 动态滑模控制及其在移动机器人输出跟踪中的应用[J]. 控制与决策, 2001, 16(5): 565-568.
 (Chao H M, Hu Y M. Dynamical sliding mode control and its applications to output tracking of mobile robots[J]. Control and Decision, 2001, 16(5): 565-568.)
 [8] 刘云龙, 高存臣, 任启峰. 水下机器人基于 sigmoid 函数的软变结构控制[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(2): 90-95.
 (Liu Y L, Gao C C, Ren Q F. Soft variable structure control based on sigmoid functions for autonomous underwater vehicles[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(2): 90-95.)
 [9] 申铁龙. 机器人鲁棒控制基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 125-126.
 (Shen T L. Fundamentals of robotics robust control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 125-126.)
 [10] 席雷平, 陈自力, 齐晓慧, 等. 具有抖振抑制特性的机械臂快速滑模变结构控制[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(7): 97-102.
 (Xi L P, Chen Z L, Qi X H, et al. Fast sliding mode variable structure control for manipulators with chattering suppression effect[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(7): 97-102.)
 [11] 米阳, 李文林, 井元伟, 等. 基于幂次趋近律的一类离散时间系统的变结构控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(6): 643-646.
 (Mi Y, Li W L, Jing Y W, et al. Variable structure control for a class of discrete-time system based on power reaching law[J]. Control and Decision, 2008, 23(6): 643-646.)
 [12] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
 (Han J Q. Auto-disturbances-rejection controller and its applications[J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.)

(责任编辑: 孙艺红)