

# 不同重力环境下空间机械臂切换控制<sup>①</sup>

刘福才<sup>②</sup> 赵文娜 孟玲聪

(燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

**摘要** 针对从地面到空间由于重力变化引起的空间机械臂的末端轨迹跟踪问题,提出了一种基于多 Lyapunov 函数的 PD 系统切换策略。根据运行环境的不同,将空间机械臂系统分为地面和空间 2 个子系统,分别设计对应的 PD 控制器,通过一定的切换规则,完成 2 个子系统和对应控制器的主动切换,从而实现从地面到空间机械臂期望轨迹的准确跟踪。运用多 Lyapunov 函数方法证明了该切换系统的稳定性。本文所提的控制算法在传统 PD 控制的基础上结合了切换控制的思想,通过与单一 PD 控制的仿真结果相比,体现了这一控制方法的优越性。

**关键词** 空间机械臂; 微重力; 切换系统; 多 Lyapunov 函数; PD 控制

## 0 引言

航天事业是一个国家先进技术和综合国力的重要体现,各国都曾在航天领域拥有话语权,因此加快了空间站的研发步伐。空间机械臂在空间站在轨建设与维护、航天器目标捕获、废弃卫星回收、太空垃圾清理、辅助航天员舱外作业等复杂航天任务中必不可少,应用前景广阔<sup>[1,2]</sup>。为保证机械臂在空间执行任务的可行性,在地面进行微重力环境模拟这项前期工作至关重要,如何提高地面微重力模拟水平引起了极大关注。文献[3]设计了一种绳索式减旋装置和速率控制系统,提高了火箭消旋和姿态的控制精度,保证了利用微重力火箭进行微重力试验的可靠性。文献[4]提出了一种混合微重力仿真方法,通过中性浮力和被控对象的电磁力的共同作用来抵消重力,仿真结果表明微重力模拟精度优于中性浮力法。文献[5]设计了一种可以实现在垂直方向开展空间机构多维运动的微重力模拟系统,主要由垂直升降装置、PID 控制器、伺服电机和空气轴承

组成,该系统能够实时抵消重力。然而,这些在地面环境下模拟空间微重力的方法,大多通过使用机械装置来实现,并不能完全消除重力带来的影响。文献[6]中,机械臂飞行验证(manipulator flight demonstration, MFD)系统在地面进行轨迹跟踪测试时,机械臂末端在 Y 轴方向的位置误差为 1 mm,而在空间飞行实验时测得的位置误差却为 -3.4 mm。针对这一现象,文献[7]指出,地面微重力环境模拟效果有限,应考虑运动行为模拟的方法。因此,文献[8]提出了一种分数阶终端滑模控制器,使空间机械臂在考虑关节铰间隙的情形下,在不同重力环境下的轨迹跟踪均能达到理想效果。文献[9]提出的控制方案中,设计了自适应律对重力进行估计,结合了反演滑模控制的优点,仿真结果表明该控制算法对 2 种重力环境下空间机械臂的末端轨迹均能实现理想跟踪。然而,以上文献所提的控制器结构较复杂,在实际情况中恐难实现。本文在传统 PD 控制的基础上,结合了切换控制的思想,提出了一种空间机械臂 PD 系统切换控制方法。

切换系统包含多个子系统,针对每个子系统设

<sup>①</sup> 载人航天预研(2016040301)和河北省自然科学基金(F2019203505)资助项目。

<sup>②</sup> 男,1966 年生,博士,教授;研究方向:空间机构运动行为分析与控制技术研究;联系人,E-mail: lfc@ysu.edu.cn  
(收稿日期:2019-11-29)

计了相应的控制器,这些子系统和子控制器之间的切换依据一定的由时间或状态决定的切换条件来完成<sup>[10]</sup>。对切换系统的稳定性分析已形成较成熟的理论体系<sup>[11]</sup>。实际被控对象的复杂性和外界环境的不确定性使得切换系统较之单一固定的控制结构具有明显优势,并且在生产实践和工程应用中得到广泛体现<sup>[12-14]</sup>。

本文根据空间机械臂在地面和空间 2 种情形下不同的动力学特性,提出了一种空间机械臂 PD 系统切换控制方法。将空间机械臂从装调到运行分为地面和空间 2 个子系统,分别设计对应的 PD 控制器,通过一定的切换规则,完成 2 个子系统和对应控制器的切换,从而实现空间机械臂的期望轨迹跟踪。基于多 Lyapunov 函数方法<sup>[15]</sup>证明了该切换系统的稳定性。仿真结果表明,与传统的单一 PD 控制方法相比,切换控制方法具有明显的优越性。

## 1 空间机械臂模型

针对空间机械臂系统(如图 1 所示)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 1 个转动自由度且受主动控制。

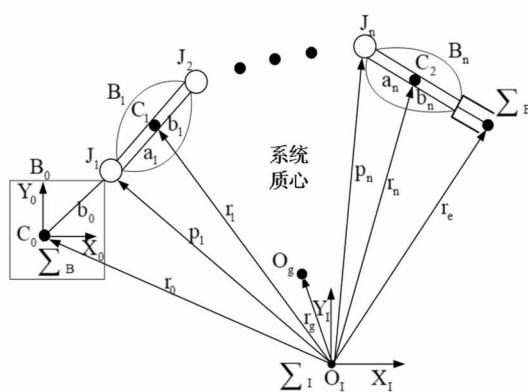


图 1  $n$  自由度自由漂浮空间机械臂模型

### 1.1 地面阶段模型

在地面试验阶段,机械臂受到重力作用,系统的拉格朗日函数等于系统的总动能与总势能之差。由拉格朗日方程推导而来的基座固定的空间机械臂的动力学方程为

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

其中,  $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$  是系统的惯性矩阵,  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$  表示离心力和哥氏力矩阵,  $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^n$  表示重力载荷向量矩阵,  $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ \cdots \ q_n]^T \in \mathbf{R}^n$  表示系统关节角的位移矢量,  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2 \ \cdots \ \tau_n]^T \in \mathbf{R}^n$  表示作用在空间机械臂各关节上的驱动力矩。

用  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$  表示空间机械臂末端在工作空间的位置和姿态,  $\mathbf{J}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{6 \times n}$  为系统的雅可比矩阵,并且满足非奇异,即  $\mathbf{J}(\mathbf{q})$  可逆,则系统在工作空间的运动学方程为

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

### 1.2 空间阶段模型

在空间微重力环境中,基座处于自由漂浮状态,从而整个系统的运动增加了 6 个自由度。系统的拉格朗日函数等于系统的总动能。由拉格朗日方程推导得到的系统的动力学方程为

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{(n+6) \times (n+6)}$  表示系统的惯性矩阵,  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbf{R}^{(n+6) \times (n+6)}$  表示系统的离心力和哥氏力矩阵,  $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_b^T \ \mathbf{q}_m^T]^T \in \mathbf{R}^{n+6}$  表示系统的广义位移矢量,  $\mathbf{q}_b = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T \in \mathbf{R}^6$  表示基座的位姿矢量,  $\mathbf{q}_m = [q_1 \ q_2 \ \cdots \ q_n]^T \in \mathbf{R}^n$  表示关节角的位移矢量,  $\boldsymbol{\tau} = [\mathbf{0}_{6 \times 1}^T \ \boldsymbol{\tau}_{n \times 1}^T]^T \in \mathbf{R}^{(n+6) \times 1}$  表示作用在空间机械臂上的驱动力矩,  $\mathbf{0}_{6 \times 1}$  表示作用在基座关节上的驱动力矩,  $\boldsymbol{\tau}_{n \times 1}$  表示作用在实际机械臂关节上的驱动力矩。

用  $\mathbf{x}$  表示空间机械臂末端执行器在工作空间的位置和姿态,  $\mathbf{J}^*(\mathbf{q}) = [\mathbf{J}_b(\mathbf{q}) \ \mathbf{J}_m(\mathbf{q})]$  表示广义雅可比矩阵,其中,  $\mathbf{J}_b(\mathbf{q}) = \partial \mathbf{x} / \partial \mathbf{q}_b$  为系统基座的雅可比矩阵,  $\mathbf{J}_m(\mathbf{q}) = \partial \mathbf{x} / \partial \mathbf{q}_m$  为机械臂本体的雅可比矩阵。假设  $\mathbf{J}^*(\mathbf{q})$  为非奇异矩阵,即  $\mathbf{J}^*(\mathbf{q})$  可逆,则系统在工作空间的运动学方程为

$$\dot{x} = J^*(q)\dot{q} \quad (4)$$

本文将用到空间机械臂的如下特性<sup>[16]</sup>。

**特性1**  $M(q)$  为正定对称阵且有界, 满足

$$\lambda_m \| \eta \|^2 \leq \eta^T M(q) \eta \leq \lambda_M \| \eta \|^2, \quad \forall \eta \in \mathbf{R}^{n+6}$$

其中,  $\lambda_m$  和  $\lambda_M$  分别表示对称正定矩阵的最小和最大特征值, 都是正常数。

**特性2**  $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$  是反对称矩阵, 满足

$$\eta^T (\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})) \eta = 0, \quad \forall q, \dot{q}, \eta \in \mathbf{R}^{n+6}$$

## 2 控制器设计和稳定性分析

### 2.1 控制器设计

首先, 根据空间机械臂在地面和空间所受重力的不同, 将地面和空间看成2个子系统, 再分别为地面子系统和空间子系统设计不同的PD控制器。开始时刻, 机械臂在地面调试阶段, 此时地面子系统和对应的控制器处于工作状态。当重力加速度测量系统<sup>[17]</sup>检测到重力加速度  $\leq 10^{-4} g$ , 表明此时空间机

械臂已处于微重力环境, 则控制系统从地面子系统切换到空间子系统, 对应的PD控制器同时发生转换。2个子系统的PD控制器形式如下。

地面阶段

$$\tau = -K_p e - K_v \dot{e} + G(q) \quad (5)$$

空间阶段

$$\tau = -K_p e - K_v \dot{e} \quad (6)$$

其中, 关节角度误差  $e = q_d - q$ ,  $q_d$  是期望的角度位置矢量, 则关节角度误差变化率  $\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$ 。且有:

$$\begin{cases} K_p = \text{diag}(k_{p1}, k_{p2})^T & k_{pi} > 0 \\ K_v = \text{diag}(k_{v1}, k_{v2})^T & k_{vi} > 0 \end{cases}$$

空间机械臂系统的闭环方程可表示为如下形式:

$$M_i(q)\ddot{e} + C_i(q, \dot{q})\dot{e} + K_v e + K_p \dot{e} = -d_i \quad (7)$$

其中,  $i = 1$  表示地面子系统,  $i = 2$  表示空间子系统,  $d_i = M_i(q)\ddot{q}_d + C_i(q, \dot{q})\dot{q}_d + G_i$ , 且有  $G_1 = 0$ ,  $G_2 = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 \sin(q_1)g - m_1 g a_1 \sin(q_1) \\ -m_2 g a_2 \sin(q_1 + q_3) - m_2 g a_2 \sin(q_1 + q_3) \end{bmatrix}$

空间机械臂PD系统切换控制结构图如图2所示。

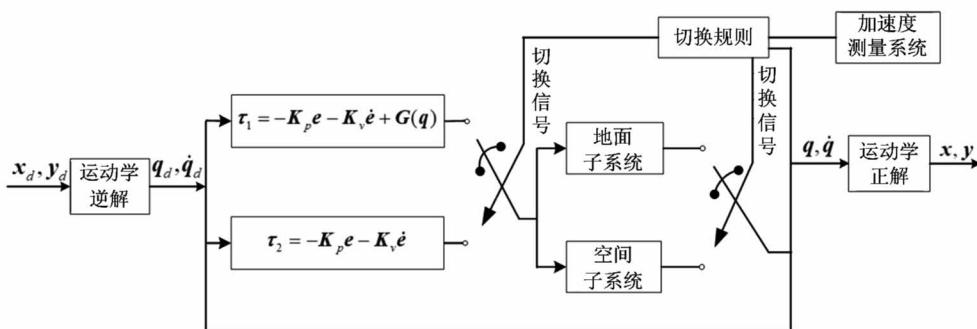


图2 空间机械臂PD系统切换控制图

### 2.2 稳定性分析

首先证明2个子系统的稳定性。

为第*i*个子系统选取1个Lyapunov函数:

$$V_i(e, \dot{e}) = \frac{1}{2} e^T K_p e + \frac{1}{2} \dot{e}^T M_i \dot{e} + \alpha e^T M_i f(e) \quad (8)$$

其中,  $f(e) = \frac{e}{1 + \|e\|} = \beta e$ ,  $0 < \alpha < 1$

计算  $\dot{V}_i(e, \dot{e})$ , 结合式(7), 可得:

$$\dot{V}_i(e, \dot{e}) = -\dot{e}^T K_p e - \alpha f(e)^T K_p e - \alpha f(e)^T K_v \dot{e}$$

$$+ \alpha \dot{e}^T M_i(q) f(e) + \alpha \dot{e}^T C_i(q, \dot{q}) f(e) - (\dot{e}^T + \alpha f(e)^T) d_i \quad (9)$$

其中,

$$\begin{aligned} d_i &= M_i(q)\ddot{q}_d + C_i(q, \dot{q})\dot{q}_d + G_i \\ &\leq \sup(\|M_i(q)\|\|\ddot{q}_d\| + \|C_i(q, \dot{q})\|\|\dot{q}_d\| + \|G_i\|) + \sup(k_c\|q_d\|)\|\dot{e}\| \end{aligned} \quad (10)$$

因为

$$\begin{aligned} \dot{e}^T C_i(q, \dot{q}) f(e) &= \dot{e}^T C_i(q, \dot{q}_d + \dot{e}) f(e) \\ &\leq \beta \sup(k_{cl}\|\dot{q}_d\|)\|e\|\|\dot{e}\| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + k_{c2} \|\dot{\boldsymbol{e}}\|^2 \\
= & \beta \lambda_3 \|\boldsymbol{e}\| \|\dot{\boldsymbol{e}}\| + \lambda_4 \|\dot{\boldsymbol{e}}\|^2
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\|\boldsymbol{e}\| \|\dot{\boldsymbol{e}}\| \leq \frac{\boldsymbol{e}^2 + \dot{\boldsymbol{e}}^2}{2} \tag{12}$$

所以

$$\begin{aligned}
\dot{V}_i(\boldsymbol{e}, \dot{\boldsymbol{e}}) \leq & -(\lambda_{\min}(\mathbf{K}_v) - \gamma_5 - \frac{\alpha\beta\gamma_6}{2}) \|\dot{\boldsymbol{e}}\|^2 + \gamma_1 \|\dot{\boldsymbol{e}}\| \\
& - \alpha\beta \left( \lambda_{\min}(\mathbf{K}_p) - \frac{\gamma_6}{2} \right) \|\boldsymbol{e}\|^2 + \alpha\beta\gamma_1 \|\boldsymbol{e}\|
\end{aligned} \tag{13}$$

其中,

$$\gamma_5 = 2\alpha\beta\lambda_{\max}(\mathbf{M}_i(\mathbf{q})) + \gamma_2 + \alpha\gamma_4$$

$$\gamma_6 = -\lambda_{\min}(\mathbf{K}_v) + \gamma_2 + \gamma_3$$

由不等式定理得:

$$\begin{aligned}
& - \left( \lambda_{\min}(\mathbf{K}_v) - \gamma_5 - \frac{\alpha\beta\gamma_6}{2} \right) \|\dot{\boldsymbol{e}}\|^2 + \gamma_1 \|\dot{\boldsymbol{e}}\| \\
\leq & \frac{\gamma_1^2}{\frac{1}{2}(\lambda_{\min}(\mathbf{K}_v) - \gamma_5 - \frac{\alpha\beta\gamma_6}{2})} - \frac{1}{4}(\lambda_{\min}(\mathbf{K}_v) \\
& - \gamma_5 - \frac{\alpha\beta\gamma_6}{2}) \|\dot{\boldsymbol{e}}\|^2
\end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
& - \left( \lambda_{\min}(\mathbf{K}_p) - \frac{\lambda_6}{2} \right) \|\boldsymbol{e}\|^2 + \gamma_1 \|\boldsymbol{e}\| \\
\leq & \frac{\gamma_1^2}{\left( \lambda_{\min}(\mathbf{K}_p) - \frac{\gamma_6}{2} \right)} - \frac{1}{4} \left( \lambda_{\min}(\mathbf{K}_p) - \frac{\gamma_6}{2} \right) \|\boldsymbol{e}\|^2
\end{aligned} \tag{15}$$

综上,有:

$$\dot{V}_i(\boldsymbol{e}, \dot{\boldsymbol{e}}) \leq -\zeta_1 \|\dot{\boldsymbol{e}}\|^2 - \zeta_2 \|\boldsymbol{e}\|^2 + \eta \tag{16}$$

由于  $\alpha$  可取很小的值,因此总能找到足够大的  $\mathbf{K}_p$  和  $\mathbf{K}_v$ , 保证  $\zeta_1 > 0$ ,  $\zeta_2 > 0$ , 从而使  $\boldsymbol{e}$  和  $\dot{\boldsymbol{e}}$  按指数收敛到半径为  $r_i$  的封闭球。

可以得出,地面和空间 2 个子系统均能保证稳定性。

下面证明切换系统的稳定性。

假设第  $i$  个子系统存在常数  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ 。

由式(8),结合特性 1,可知:

$$a_i \|\dot{\boldsymbol{e}}\|^2 \leq V_i \leq b_i \|\dot{\boldsymbol{e}}\|^2 \tag{17}$$

从而,

$$\|\dot{\boldsymbol{e}}\|^2 \leq \frac{V_i}{a_i} \tag{18}$$

由式(16)可知:

$$\dot{V}_i(\boldsymbol{e}, \dot{\boldsymbol{e}}) \leq -c_i \|\dot{\boldsymbol{e}}\|^2 \tag{19}$$

结合式(18)、式(19),可得:

$$\dot{V}_i \leq -\frac{c_i}{a_i} V_i \tag{20}$$

即,

$$\dot{V}_i \leq -\lambda_i V_i, \lambda_i = \frac{c_i}{a_i} \tag{21}$$

假设  $\sigma(t) = i$ ,  $\forall t \in [t_0, t_0 + \tau]$ ,  $i = 1, 2$ 。其中,  $\sigma(t)$  表示切换信号,  $\tau$  是一个正常数。则:

$$V_i(x(t_0 + \tau)) \leq e^{-\lambda_i \tau} V_i(x(t_0)) \tag{22}$$

假设系统初始状态为  $(x(t_0), \sigma(t_0)) = (x_0, 1)$ , 在  $t_1, t_2$  发生切换,  $\sigma(t_1^+) = 2$ ,  $\sigma(t_2^+) = 1$  以及  $t_1 - t_0 \geq \tau$ ,  $t_2 - t_1 \geq \tau$ 。可以推出:

$$V_2(t_1) \leq \frac{b_2}{a_1} V_1(t_1) \leq \frac{b_2}{a_1} e^{-\lambda_1 \tau} V_1(t_0) \tag{23}$$

由此得:

$$\begin{aligned}
V_1(t_2) \leq & \frac{b_1}{a_2} V_2(t_2) \leq \frac{b_1}{a_2} e^{-\lambda_2 \tau} V_2(t_1) \\
\leq & \frac{b_1 b_2}{a_1 a_2} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)\tau} V_1(t_0)
\end{aligned} \tag{24}$$

只要  $\tau$  足够大,就可以保证  $V_1(t_2) \leq V_1(t_0)$ , 引用多 Lyapunov 函数稳定性条件可知,此时切换系统全局渐近稳定。

### 3 仿真研究

为了验证切换控制理论应用于空间机械臂的可行性,用 Matlab 软件对地面重力环境和空间微重力环境中空间机械臂的末端轨迹跟踪进行了仿真研究,同时将本文所提控制策略与 PD 控制方法进行了比较。表 1 为 2 自由度空间机械臂的仿真参数。控制器参数为

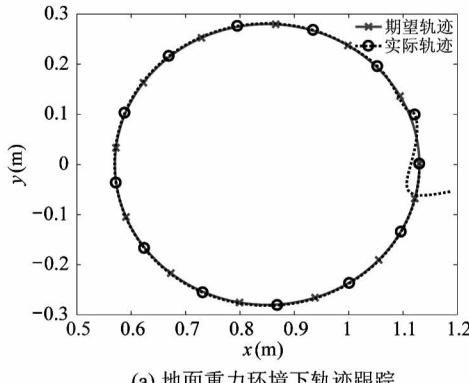
$$\mathbf{K}_p = \text{diag}\{250, 250\}, \mathbf{K}_v = \text{diag}\{25, 25\}$$

空间机械臂的期望末端轨迹为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_d = 0.28 \cos \frac{\pi t}{5} + 0.85 \\ \mathbf{y}_d = 0.28 \sin \frac{\pi t}{5} \end{cases}$$

**表1 2自由度空间机械臂仿真参数**

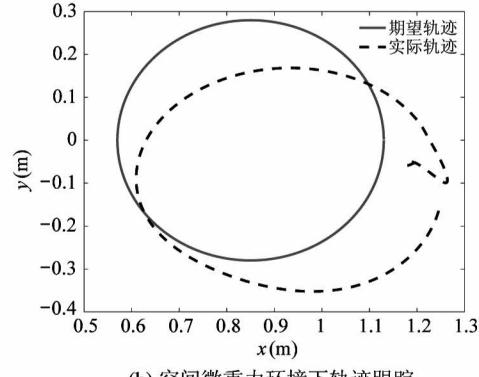
杆件号	$a_i$ (m)	$b_i$ (m)	$m_i$ (kg)	$I_i$ (kg · m <sup>2</sup> )
0	-	0.5	40	6.667
1	0.5	0.5	4	0.333
2	0.5	0.5	3	0.250



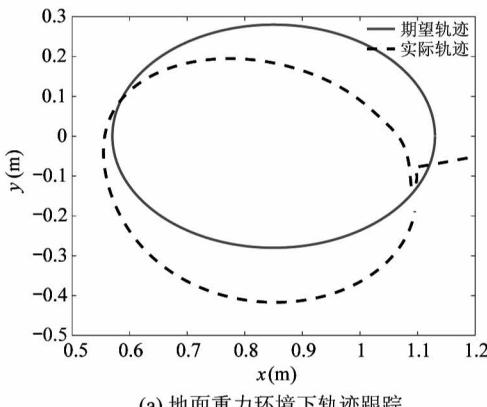
### 3.1 有重力补偿的空间机械臂轨迹跟踪

$$\text{PD控制器: } \boldsymbol{\tau} = -\mathbf{K}_p \mathbf{e} - \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{G}(\mathbf{q})$$

图3表示在同一有重力补偿项的PD控制器作用下的空间机械臂在地面和空间2个阶段的末端轨迹跟踪情况。

**图3 有重力补偿的空间机械臂轨迹跟踪**

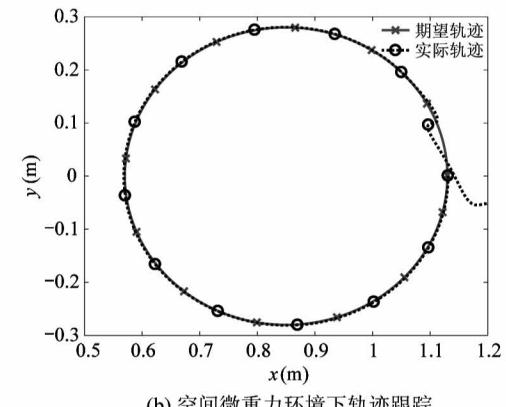
由图3(a)可知,在地面环境中,机械臂受到的重力作用与PD控制器中的重力项相抵消,因此轨迹跟踪情况较理想。而图3(b)说明了在空间微重力环境中,PD控制器中的重力项对机械臂不起作用,导致空间机械臂末端的实际轨迹与期望轨迹严重不符。



### 3.2 无重力补偿的空间机械臂轨迹跟踪

$$\text{PD控制器: } \boldsymbol{\tau} = -\mathbf{K}_p \mathbf{e} - \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}}$$

图4表示在同一无重力补偿的PD控制器作用下的空间机械臂在地面和空间2个阶段的末端轨迹跟踪情况。

**图4 无重力补偿的空间机械臂轨迹跟踪**

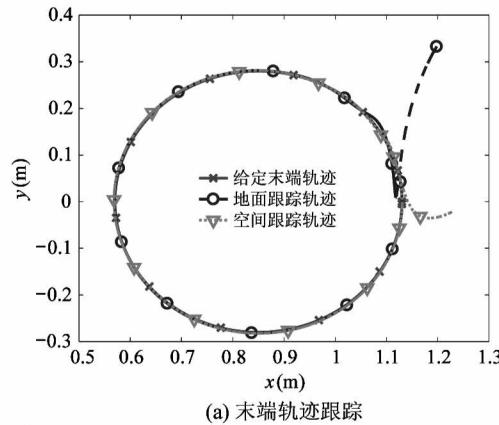
从图4(b)可知,采用没有重力项的PD控制器,空间阶段的机械臂末端轨迹跟踪达到理想效果。而图4(a)说明了在地面环境中,机械臂受到的重力由于未得到实时补偿,末端实际轨迹无法准确跟踪

期望轨迹。

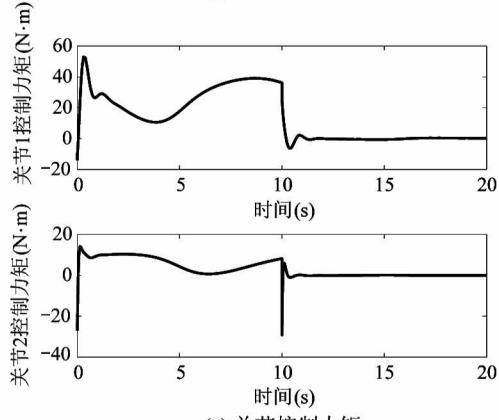
### 3.3 采用切换控制的空间机械臂轨迹跟踪

通过以上仿真结果可以得出,在地面和空间2种环境中,采用不同的PD控制器,空间机械臂末端

实际轨迹都能较好跟踪理想轨迹。据此本文提出的 PD 系统切换控制策略,能够实现从地面到空间 2 个阶段的机械臂末端轨迹的准确跟踪。以下为具体仿真过程。

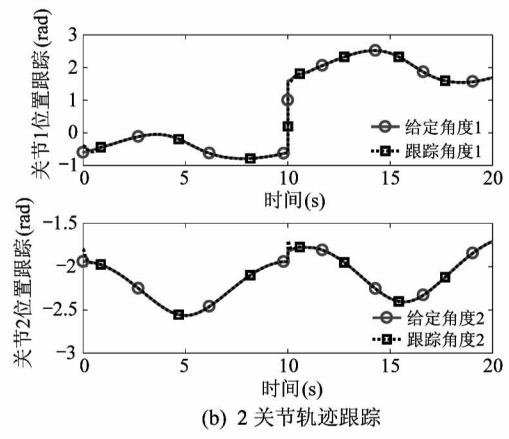


(a) 末端轨迹跟踪

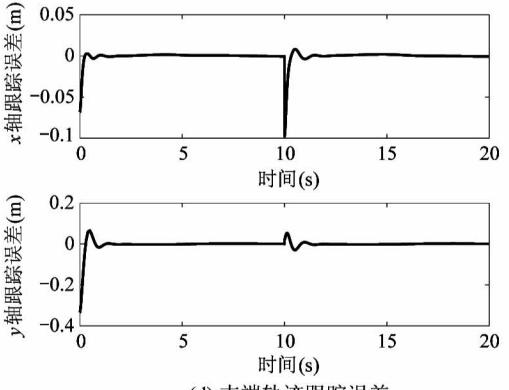


(c) 关节控制力矩

仿真时间为 20 s。假设加速度测量系统在第 10 s 时检测到重力加速度  $\leq 10^{-4}$  g, 则控制系统从地面子系统切换到空间子系统, 对应的 PD 控制器同时发生转换。仿真结果如图 5(a)~5(d) 所示。



(b) 2 关节轨迹跟踪



(d) 末端轨迹跟踪误差

图 5 空间机械臂切换控制仿真结果

从图 5(a) 和 5(b) 可以看出, 采用本文提出的 PD 系统切换策略, 在地面阶段, 地面子系统和子控制器处于工作状态, 机械臂的末端和 2 个关节的轨迹跟踪均取得了较好效果。到达切换时刻时, 子系统和相应的控制器能够快速同步作出响应。切换后的机械臂的末端和 2 个关节依然能快速跟踪上期望轨迹, 且切换过程迅速平稳, 无较大波动, 切换前后 2 个子系统均是稳定的, 满足切换系统的多 Lyapunov 函数稳定性条件。

图 5(c) 给出了空间机械臂在地面和空间 2 个阶段关节力矩的变化情况, 可以看出, 空间环境中, 2 个关节所需的控制力矩较之地面阶段显著减小, 符合实际情形。发生系统和控制器切换时, 控制力矩没有因此发生剧烈变化, 为空间机械臂末端提供了

稳定的控制作用。图 5(d) 表示空间机械臂的末端轨迹跟踪误差, 可以看出, 在地面和空间 2 种环境下, 空间机械臂的末端轨迹跟踪误差都趋近于 0, 实际轨迹都能较好跟踪期望轨迹, 系统和控制器切换的发生并没有造成误差的增大, 保证了系统的鲁棒性。

## 4 结 论

针对空间机械臂从地面阶段到空间阶段因重力变化而引起的末端轨迹跟踪问题, 提出了一种 PD 系统切换控制策略。当检测到重力发生变化时, 能够主动实现从地面子系统到空间子系统, 从地面 PD 控制器到空间 PD 控制器的同步切换, 切换过程在

保证系统稳定性的基础上体现了较好的快速性。仿真结果表明该控制方法在地面和空间2种环境中空间机械臂的末端轨迹跟踪均能取得较好效果,通过与单一的PD控制方法进行比较,证明了本文所提控制策略的优越性。本文的控制算法结合了PD控制和切换控制的优点,简单易行,并具有较强的鲁棒性,对解决空间机械臂在地面和空间不同重力环境下的控制问题提出了新的思路,具有较好的参考价值。

### 参考文献

- [1] 刘宏,蒋再男,刘业超.空间机械臂技术发展综述[J].载人航天,2015,21(5):435-443
- [2] Flores-Abad A, Ma O, Pham K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, 68:1-26
- [3] 李大伟,刘成.探空火箭微重力环境的实现[J].电子设计工程,2016,24(7):20-22
- [4] Yuan J, Zhu Z, Ming Z, et al. An innovative method for simulating microgravity effects through combining electromagnetic force and buoyancy[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(2):355-364
- [5] Mo L D, Chen Y K, Guan X C, et al. Experimental study on the multi-dimensional microgravity simulation system for manipulators I[C]//2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), Harbin, China, 2015: 1222-1227
- [6] Nagatomo M, Mitome T, Kawasaki K, et al. MFD robot arm and its flight experiment[C]//American Society of Civil Engineers 6th ASCE Specialty Conference and Ex-
- position on Engineering, Construction, and Operations in Space, Albuquerque, USA, 1998: 319-324
- [7] 王文魁.空间机构运动行为模拟概念研究[J].载人航天,2013,19(5):59-66
- [8] 刘福才,夏威,兰会,等.不同重力环境下含铰间隙空间机械臂FOTSMC轨迹跟踪控制[J].高技术通讯,2018,28(11-12):65-73
- [9] 刘福才,李倩,梁利环,等.不同重力环境下空间机械臂轨迹跟踪的自适应反演滑模控制[J].高技术通讯,2015,25(4):384-392
- [10] Liberzon D. *Switching in Systems and Control*[M]. Boston: Birkhäuser, 2003
- [11] Sun Z. Switched linear systems[J]. *Control and Design*, 2005, 51(4):666-674
- [12] Putyrski M, Schultz C. Switching heterotrimeric G protein subunits with a chemical dimerizer[J]. *Chemistry and Biology*, 2011, 18(9):1126-1133
- [13] Bao W, Li B, Chang J, et al. Switching control of thrust regulation and inlet buzzprotection for ducted rocket[J]. *Acta Astronautica*, 2010, 67(7):764-773
- [14] Tang L, Zhao J. Switched threshold-based fault detection for switched nonlinear systems with its application to Chua's circuit system[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2018, 99:1-9
- [15] Branicky M S. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(4): 475-482
- [16] 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
- [17] 薛大同,雷军刚,程玉峰,等.“神舟”号飞船的微重力测量[J].物理,2004(5):351-358

## Switching control of space manipulator under different gravity settings

Liu Fucai, Zhao Wenn, Meng Lingcong

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

### Abstract

For the problem of trajectory tracking of space manipulator resulting from the change of gravity from ground to space, a PD system switching strategy based on multi-Lyapunov function is proposed. According to different operating environments, the space manipulator system is divided into two subsystems, the ground subsystem and the space subsystem. The corresponding PD controllers are designed respectively. Through certain rules, the switch of two subsystems can be realized autonomously, at the same time, one controller is replaced by the other. In consequence, space manipulator can quickly track the desired trajectory in the two gravity environments. The stability of switching system is proved by means of multi-Lyapunov function method. The proposed control approach combines the theory of switching system and the traditional PD control. Compared with the simulation results of traditional PD controller, the superiority of this control method can be proved.

**Key words:** space manipulator, microgravity, switching system, multi-Lyapunov function, PD control