

重力对空间机械臂运动控制的影响^①刘福才^② 高娟娟^③ 王跃灵

(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 为研究空间机械臂系统在重力条件下的地面装调阶段和微重力条件下的空间应用阶段重力项的变化对其运动控制的影响,以 n 自由度自由漂浮空间机械臂为研究对象,分别分析了空间机械臂在地面装调重力条件和空间应用微重力条件下的运动特点,建立了系统的运动学模型,同时运用拉格朗日方程推导了系统的动力学模型,并以三自由度自由漂浮空间机械臂为例,分别对其在地面装调阶段和空间应用阶段的动力学特性和轨迹跟踪控制进行仿真研究,仿真结果表明重力项对空间机械臂运动控制的驱动力矩及轨迹跟踪精度均有影响。

关键词 空间机械臂,地面装调,空间应用,重力项,运动控制

0 引言

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,因而许多国家都致力于空间机械臂在轨服务技术的研究^[1-6]。而微重力科学研究与应用是重要研究内容。目前,模拟微重力的地面实验系统主要有基于自由落体运动的实验系统、基于抛物线飞行的实验系统、气浮式地面实验系统、水浮式地面实验系统、吊丝配重实验系统以及硬件在环内的混合地面实验系统。文献[7]总结了目前国际上空间微重力地面模拟试验方法的发展现状及优缺点,并提出了一种三维微重力环境试验装置的设计思想。文献[8]搭建了以气浮为重力补偿方式、可实现空间机械臂在二维平面上运动的地面试验平台。文献[9]介绍了在地面进行空间操作过程模拟的水浮法,设计了水中的悬浮模型,使其浮力恰好抵消重力,并使其具备 6 自由度运动。文献[10]介绍了微重力模拟实验系统的特点,归纳了研究中的关键问题,总结了主要实现方法,提出了动力学模拟与运动学等效的两种思想,并建立了实验系统。文献[11]研究了机械臂的重力平衡方法,对于关节式机械臂结构,采用拉弹簧的方式对机械臂重力进行较大范围的平衡。但随着重力水平极大的减弱,物体运动特性可能发生较大的变

化,不能仅仅简单地将运动方程中的重力项忽略不计^[12]。

空间机械臂在地面进行装配和调试时重力无处不在,在轨操作过程中却处于微重力状态,且基座不是固定的,这样使整个系统的运动增加了 6 个自由度。当空间机械臂在轨动作时,它会对基座施加一个动态力或力矩,使基座的位姿发生改变,这样使整个系统的控制变得复杂。因此研究重力对空间机械臂运动控制的影响是至关重要的。本文以 n 自由度自由漂浮空间机械臂为研究对象,通过分析其在地面重力作用和空间微重力作用下的运动特点,推导出末端速度与基座位姿、各关节角速度的数学关系,建立其运动学方程,同时运用拉格朗日方程建立系统的动力学模型,最后分别对三自由度自由漂浮空间机械臂在地面装调和空间应用两阶段的动力学特性和轨迹跟踪控制进行仿真研究,分析其在控制器变化和参数变化条件下的运动情况,通过仿真结果说明重力项对 n 自由度空间机械臂的动力学特性和轨迹跟踪精度的影响情况。

1 系统描述

图 1 为 n 自由度自由漂浮空间机械臂示意图,

① 863 计划资助项目。

② 男,1966 年生,教授,博士生导师;研究方向:模糊辨识与预测控制等;E-mail: lfc@ysu.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail: gaojuanjuan_2008@163.com

(收稿日期:2011-10-20)

系统为刚体系统,空间忽略微重力,不受其它外力及外力矩。系统由基座和 n 个连杆组成,基座的位姿不受主动控制,每个关节具有一个转动自由度且受主动控制。

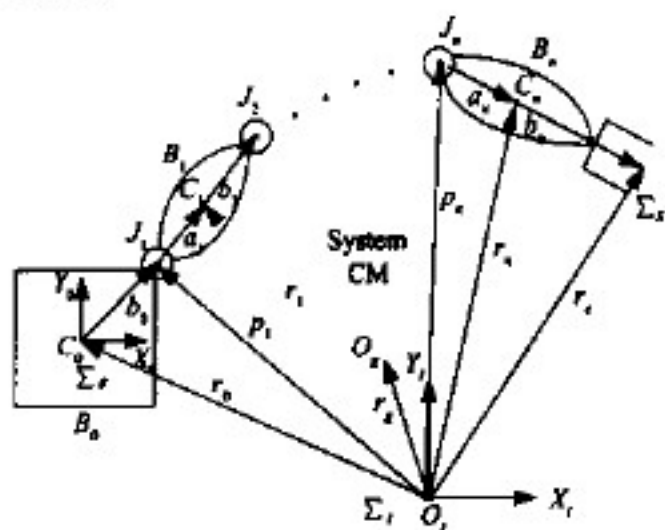


图1 n 自由度自由漂浮空间机械臂模型

首先建立如下的几个坐标系:(1)惯性坐标系 Σ_I ; (2)基座坐标系 Σ_B ; (3)末端坐标系 Σ_E 。

定义如下符号: B_i 为空间机械臂的基座和第 i 个连杆 ($i = 1, 2, \dots, n$); J_i 为第 i 个关节 ($i = 1, 2, \dots, n$); C_i 为基座和第 i 个连杆的质心 ($i = 1, 2, \dots, n$); m_i 为基座和第 i 个连杆的质量 ($i = 1, 2, \dots, n$); M 为基座和各连杆的总质量; a_i 为从第 i 个关节到第 i 个连杆质心的矢量 ($i = 1, 2, \dots, n$); b_i 为从第 i 个连杆质心到第 $i+1$ 个关节的矢量 ($i = 1, 2, \dots, n$); l_i 为第 i 个连杆的长度 ($i = 1, 2, \dots, n$); r_s 为系统质心的位置矢量; r_i 为基座和各连杆质心的位置矢量 ($i = 1, 2, \dots, n$); r_e 为机械臂末端抓手质心的位置矢量; $q_m = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ 为机械臂关节角矢量; $q_d = [q_{d1}, q_{d2}, \dots, q_{dn}]^T$ 为期望的机械臂关节角; $\dot{q}_m = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n]^T$ 为机械臂关节的角速度; $\dot{q}_0$ 为基座位姿矢量; k_i 为 J_i 旋转方向的单位矢量 ($i = 1, 2, \dots, n$); I_i 为机械臂第 i 个连杆相对于其质心的转动惯量 ($i = 1, 2, \dots, n$)。文中出现的所有向量均为惯性坐标系中的表示。

1.1 空间应用阶段

空间机械臂系统在空间应用阶段,处于微重力环境,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。

由图1可知,各连杆质心位置矢量 r_i 及末端的位置矢量 r_e 为

$$r_i = r_0 + b_0 + \sum_{k=1}^{i-1} (a_k + b_k) + a_i \quad (1)$$

$$r_e = r_0 + b_0 + \sum_{k=1}^n (a_k + b_k) \quad (2)$$

对式(1)和(2)求导可得各连杆质心线速度 v_i 及空间机械臂末端的线速度 v_e 为

$$v_i = v_0 + \omega_0 \times (r_i - r_0) + \sum_{k=1}^i [k_k \times (r_i - p_k)] \dot{q}_k \quad (3)$$

$$v_e = v_0 + \omega_0 \times (r_e - r_0) + \sum_{k=1}^n [k_k \times (r_e - p_k)] \dot{q}_k \quad (4)$$

各连杆质心角速度 ω_i 及空间机械臂末端的角速度 ω_e 为

$$\omega_i = \omega_0 + \sum_{k=1}^i k_k \dot{q}_k \quad (5)$$

$$\omega_e = \omega_0 + \sum_{k=1}^n k_k \dot{q}_k \quad (6)$$

因此,空间机械臂末端的线速度和角速度与基座的线速度和角速度的关系可以表达成如下形式:

$$\begin{bmatrix} v_e \\ \omega_e \end{bmatrix} = J_b \begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} + J_m \dot{q}_m \quad (7)$$

其中, J_b 为与基座运动相关的雅克比矩阵, J_m 为与机械臂运动相关的雅克比矩阵,其表达式如下:

$$J_b = \begin{bmatrix} E_3 & -(r_e - r_0) \\ 0 & E_3 \end{bmatrix} \in R^{6 \times 6}$$

$$J_m = \begin{bmatrix} k_1 \times (r_e - p_1) & \dots & k_n \times (r_e - p_n) \\ k_1 & \dots & k_n \end{bmatrix} \in R^{6 \times n}$$

忽略空间微重力及其他外力,系统的线动量和角动量守恒。假设初始时刻的线动量和角动量都为0,则经推导可得基座的线速度和角速度与各关节角速度关系如下:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} = -H_b^{-1} H_m \dot{q}_m \quad (8)$$

其中:

$$H_b = \begin{bmatrix} ME & -Mr_{0e} \\ Mr_{0e} & H_N \end{bmatrix};$$

$$H_m = \begin{bmatrix} J_{Tm} \\ H_{MJ} \end{bmatrix};$$

$$H_N = I_0 + \sum_{i=1}^n (I_i + m_i r_{0i}^T r_{0i}) \in R^{3 \times 3};$$

$$H_{MJ} = \sum_{i=1}^n (I_i J_{Ai} + m_i r_{0i} J_{Ti}) \in R^{3 \times n};$$

$$J_{Tm} = \sum_{i=0}^n (m_i J_{Ti}) \in R^{3 \times n};$$

$$J_{Ai} = [k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_i \quad 0 \quad \dots \quad 0] \in R^{3 \times n};$$

$$J_{\tau} = \begin{bmatrix} k_1 \times (r_1 - p_1) & \cdots & k_n \times (r_n - p_n) & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \in R^{3 \times n};$$

$$r_{0i} = r_i - r_0; r_{0i} = r_i - r_0.$$

将式(8)代入式(7)中,可得空间应用阶段自由漂浮空间机械臂的运动学模型:

$$\begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} = (-J_0 H_0^{-1} H_m + J_n) \dot{q}_n = J^* \dot{q}_n \quad (9)$$

其中, $J^* = -J_0 H_0^{-1} H_m + J_n$ 是系统的广义雅克比矩阵,它是固定基座机械臂的雅克比矩阵的推广,反映了自由漂浮空间机械臂系统的动力学耦合。

对于广义坐标为 $q \in R^n$ 、拉格朗日函数为 L 的 n 自由度机械系统,动力学方程为^[13]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

其中, $L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q)$, $L(q, \dot{q})$ ——拉格朗日函数; $T(q, \dot{q})$, $V(q)$ ——以广义坐标表示的系统动能与势能; τ_i ——作用在第 i 个广义坐标上的外力。

由于空间机械臂在空间应用阶段不受重力的作用,因此系统的能量仅包含动能,定义系统的动能 T 为基座和各连杆的动能之和:

$$T = \sum_{i=0}^n T_i = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n (\omega_i^T \cdot I_i \cdot \omega_i + m_i \cdot v_i^T \cdot v_i) \quad (11)$$

系统拉格朗日函数 $L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q})$, 对 $L(q, \dot{q})$ 求偏导数和导数,然后把相应的各导数和偏导数代入拉格朗日方程中,可以得到系统的动力学方程:

$$M(q) \ddot{q} + B(q, \dot{q}) \dot{q} = \tau \quad (12)$$

其中 $q \in R^{n+6}$ 为基座位姿和各个关节角, $\tau \in R^{n+6}$ 为基座和各个关节角的驱动力矩, $M(q) \in R^{(n+6) \times (n+6)}$ 是系统的惯性矩阵, $B(q, \dot{q}) \in R^{(n+6) \times (n+6)}$ 是系统的哥氏力和离心力矩阵。

对于自由漂浮空间机械臂系统,由于基座不受主动控制,可以看成加在伪机械臂(基座)关节上的驱动力矩为零,所以空间应用阶段系统的动力学方程可以表示为

$$M(q) \ddot{q} + B(q, \dot{q}) \dot{q} = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 1} \\ \tau_{n \times 1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $0_{6 \times 1}$ 为作用在伪机械臂(基座)关节上的驱动力矩; $\tau_{n \times 1}$ 为作用在实际机械臂关节上的驱动力矩。

1.2 地面装调阶段

空间机械臂系统在地面装调阶段,基座是固定

的,因此基座没有自由度,所以系统有 n 个自由度。

在地面装调阶段,空间机械臂系统的运动学方程为

$$\begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} = J_n \dot{q}_n \quad (14)$$

其中, $J_n \in R^{6 \times n}$ 为固定基座机械臂的雅克比矩阵, $q_n = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ \cdots \ q_n]^T$ 为机械臂各个关节角。

由于空间机械臂在地面装调阶段受重力作用,因此拉格朗日函数等于系统的动能与势能之差,则可以得到地面装调阶段空间机械臂系统的动力学方程:

$$M(q) \ddot{q} + B(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = \tau \quad (15)$$

其中 $q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ \cdots \ q_n]^T$ 为机械臂各个关节角, $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \cdots \ \tau_n]^T$ 为各个关节角的驱动力矩, $M(q) \in R^{n \times n}$ 是系统的惯性矩阵, $B(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 是系统的哥氏力和离心力矩阵, $G(q) \in R^{n \times 1}$ 是重力载荷向量矩阵。

2 仿真研究

2.1 动力学仿真

为了研究重力项对空间机械臂运动控制的驱动力矩的影响,分别对三自由度自由漂浮空间机械臂在地面重力和空间微重力条件下的动力学特性进行仿真研究。图2为三自由度自由漂浮空间机械臂示意图,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 10s。

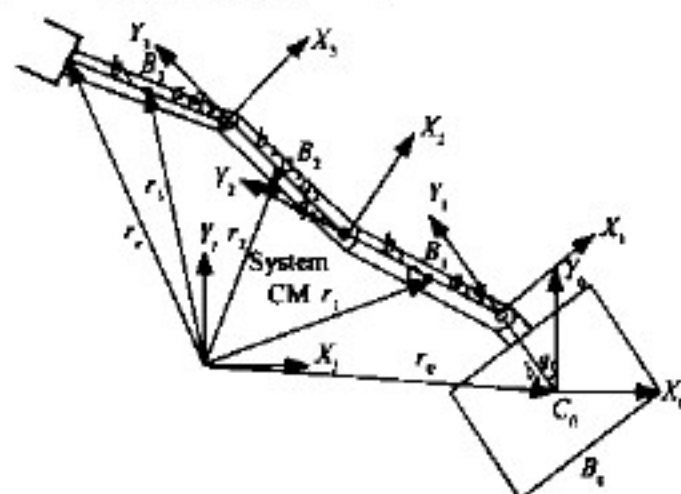


图2 三自由度自由漂浮空间机械臂

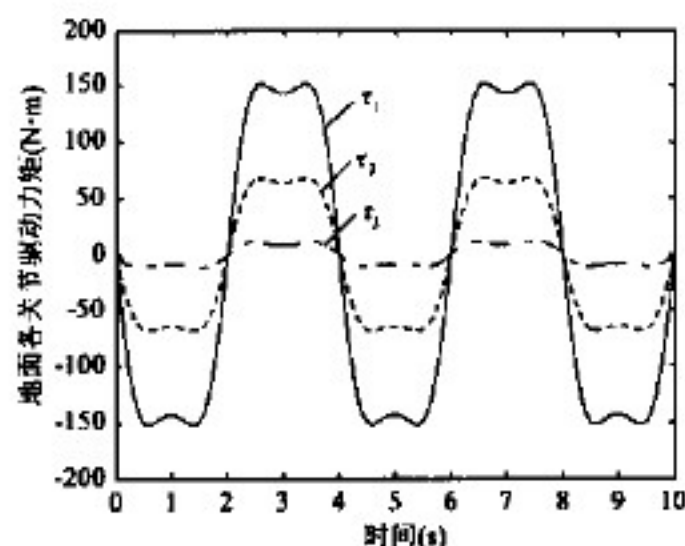
表1 三自由度自由漂浮空间机械臂系统参数

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
3	0.5	0.5	2	0.250

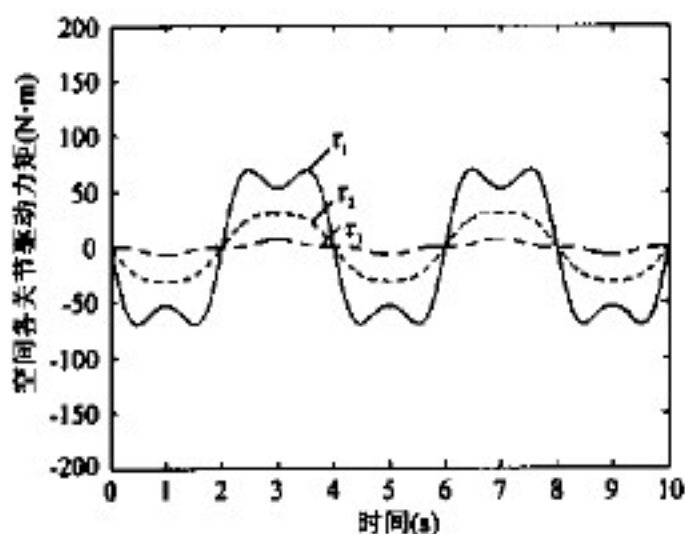
空间机械臂系统在关节空间内运动时,地面装调阶段模型如式(15)所示,空间应用阶段模型如式(13)所示,关节空间的运动轨迹为

$$\begin{cases} q_{d1} = \sin(\frac{\pi t}{2}) \\ q_{d2} = \sin(\frac{\pi t}{2}) \\ q_{d3} = \sin(\frac{\pi t}{2}) \end{cases}$$

图3(a)和图3(b)分别为空间机械臂系统在地面装调和空间应用阶段关节空间内运动所需的驱动力矩。从上面的两组仿真曲线可得:当三自由度自由漂浮空间机械臂的关节运动轨迹相同时,机械臂在地面上运动由于受到重力的影响,关节1、2和3所需的驱动力矩都较大,但在空间中,由于机械臂不受重力的影响,关节1、2和3所需的驱动力矩明显小于在地面上运动所需的驱动力矩。



(a) 地面装调各关节驱动力矩



(b) 空间应用各关节驱动力矩

图3 空间机械臂运动的驱动力矩

2.2 轨迹跟踪控制仿真

为了研究重力项对空间机械臂系统轨迹跟踪情况的影响,分别对三自由度自由漂浮空间机械臂在地面重力和空间微重力条件下的跟踪情况进行仿真

研究。三自由度自由漂浮空间机械臂示意图见图2,仿真参数见表1,仿真环境为 Matlab7.0,仿真时间为10s。

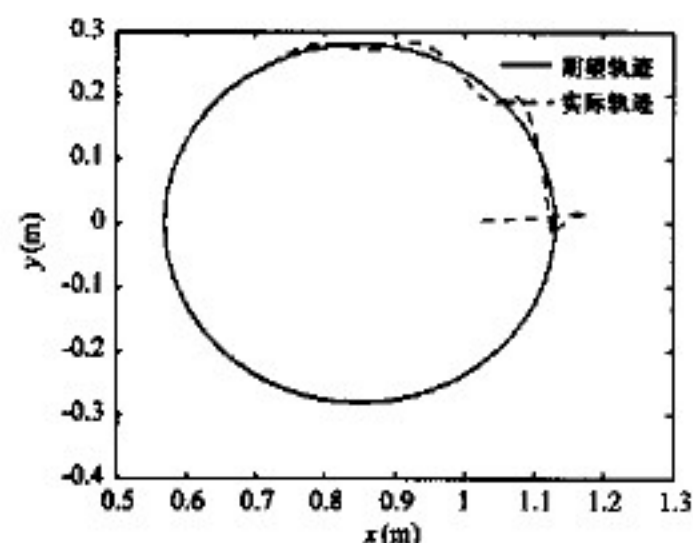
轨迹跟踪控制算法采用PD控制^[14],控制器参数为 $k_p = 250$, $k_d = 15$ 。三自由度自由漂浮空间机械臂系统基座的初始姿态角为 -2rad ,任务空间内运动的末端抓手初始位姿为 $(1.0, 0, \pi/5)$,给定的期望轨迹为

$$\begin{cases} x_d = 0.28\cos(\frac{\pi t}{5}) + 0.85 \\ y_d = 0.28\sin(\frac{\pi t}{5}) \\ \phi_d = \frac{\pi}{5} \end{cases}$$

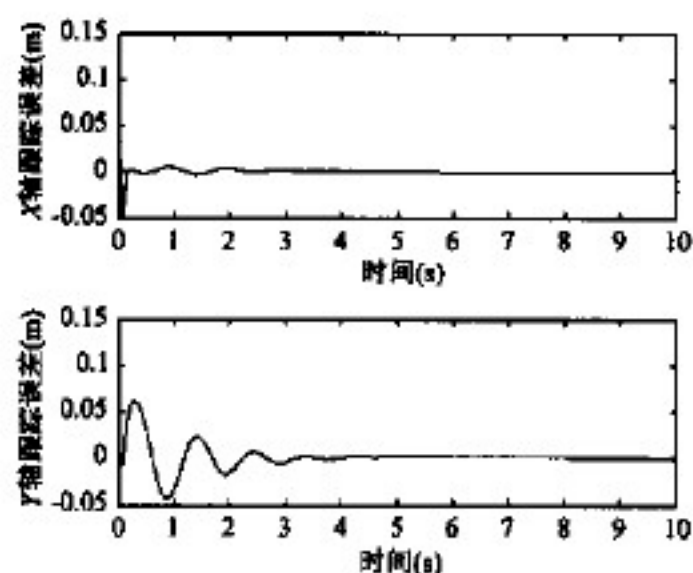
(1) 同一控制器下系统的跟踪情况:

PD控制器为: $\tau = k_p e + k_d \dot{e} + G(q)$ 。

图4和图5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任务空间的轨迹跟踪情况。从图4和图5可得:在同一控制器下,三自由度自由漂浮空间机械臂在重力条件下的地面装调阶段的动

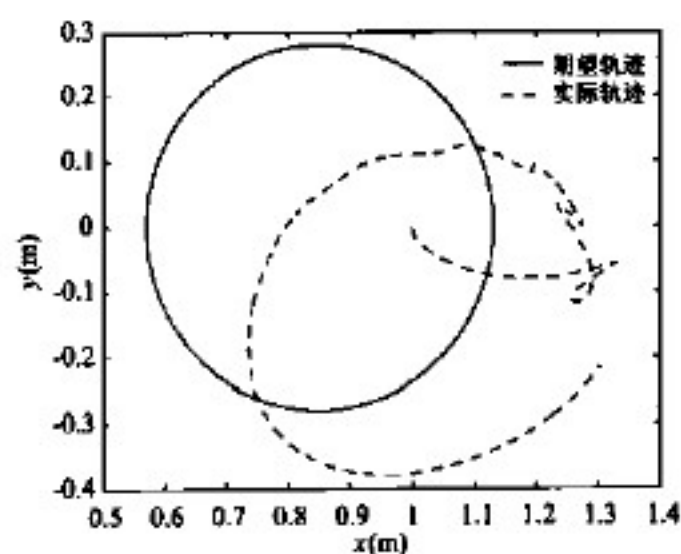


(a) 末端期望轨迹与实际轨迹

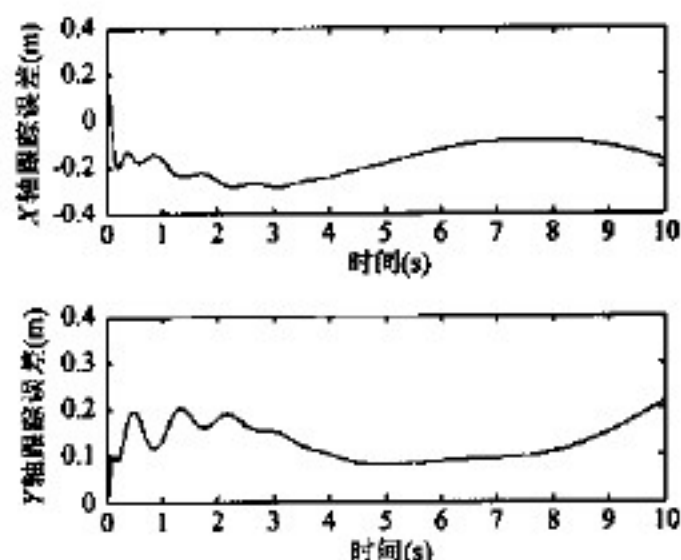


(b) 末端的轨迹跟踪误差

图4 地面装调时的轨迹跟踪情况



(a) 末端期望轨迹与实际轨迹



(b) 末端的轨迹跟踪误差

图 5 空间应用时的轨迹跟踪情况

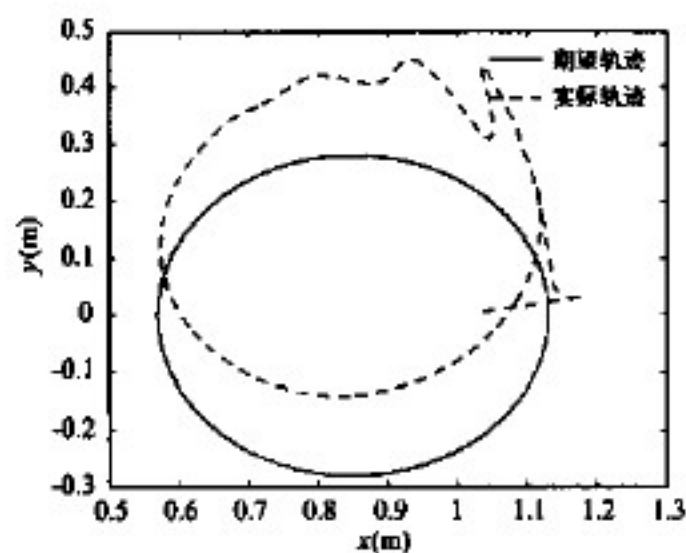
力学模型中的重力载荷向量矩阵可以和控制器中的重力补偿项相互抵消,因此可以快速地跟踪上期望的轨迹,并且跟踪误差能够快速地收敛到 0。但在微重力条件下的空间应用阶段,由于空间机械臂系统不受重力的作用,控制器中的重力补偿项会对机械臂的轨迹跟踪情况产生影响,因此三自由度自由漂浮空间机械臂难以跟踪上期望的轨迹。

(2) 连杆质量对轨迹跟踪情况的影响:

PD 控制器为: $\tau = k_p e + k_d \dot{e} + G(q)$ 。

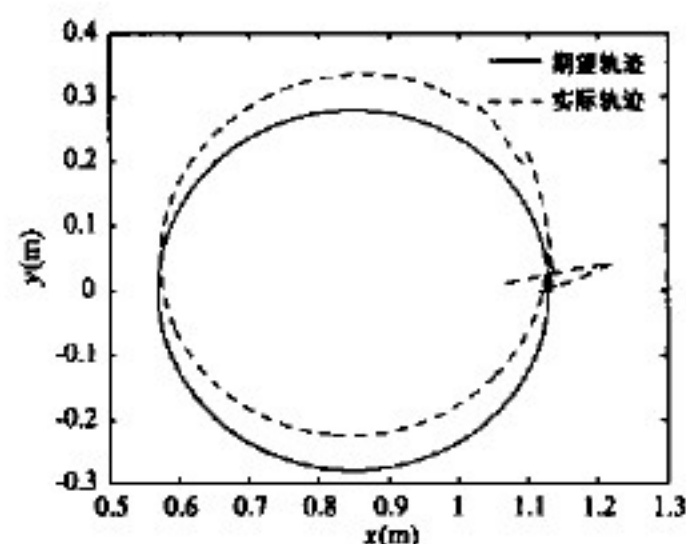
分别取三自由度自由漂浮空间机械臂连杆 1、2 和 3 的质量为原质量的 1/2、1/5 和 1/10 进行轨迹跟踪控制的仿真研究。

从图 6、图 7 和图 8 可得:三自由度自由漂浮空间机械臂连杆 1、2 和 3 的质量变化对轨迹跟踪情况有影响,随着 m_1 、 m_2 和 m_3 的减小,控制器中重力补偿项对机械臂轨迹跟踪情况的影响也会随之减小,因此轨迹跟踪误差越来越小,同时由于连杆质量的减小,空间机械臂系统在运动过程中连杆 1、2 和 3 的重力产生的力矩也较之原来明显减小,因此关节 1、2 和 3 的控制力矩也会越来越小。



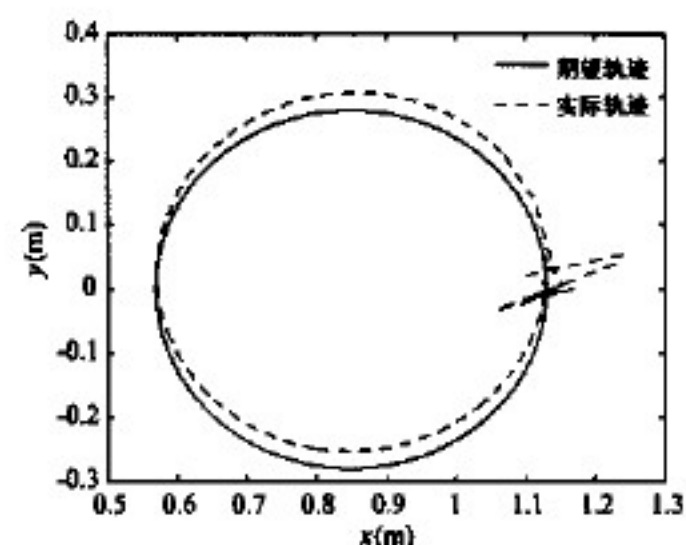
情形 1: $m_1 = 2\text{kg}$, $m_2 = 1.5\text{kg}$, $m_3 = 1\text{kg}$

图 6 $m' = 0.5m$ 的轨迹跟踪情况



情形 2: $m_1 = 0.8\text{kg}$, $m_2 = 0.6\text{kg}$, $m_3 = 0.4\text{kg}$

图 7 $m' = 0.2m$ 的轨迹跟踪情况



情形 3: $m_1 = 0.4\text{kg}$, $m_2 = 0.3\text{kg}$, $m_3 = 0.2\text{kg}$

图 8 $m' = 0.1m$ 的轨迹跟踪情况

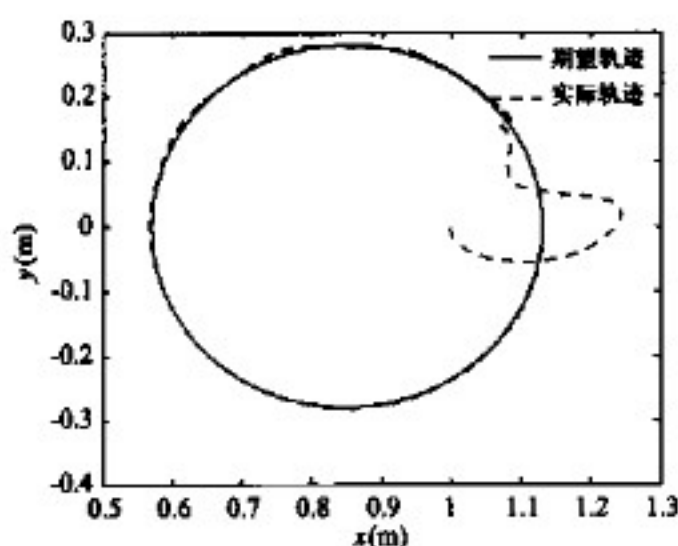
(3) 不同控制器下的轨迹跟踪情况:

地面 PD 控制器为: $\tau = k_p e + k_d \dot{e} + G(q)$;

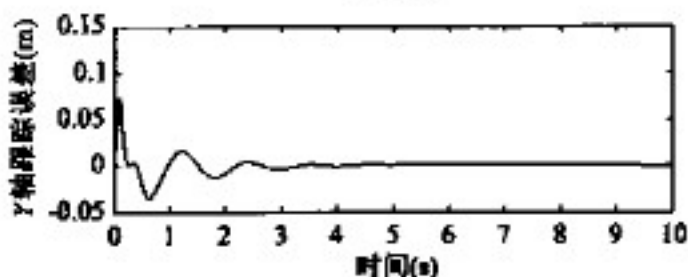
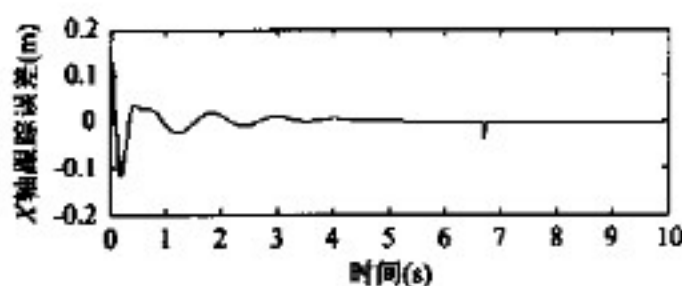
空间 PD 控制器为: $\tau = k_p e + k_d \dot{e}$ 。

图 4 和图 9 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任务空间的轨迹跟踪情况。由图 4 和图 9 可得:由于三自由度自由漂浮空间机械臂在空间应用阶段不受重力的作用,基座的姿态

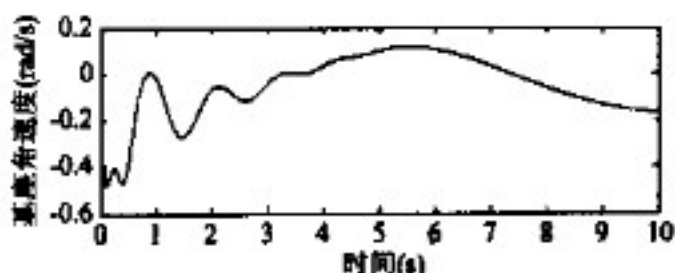
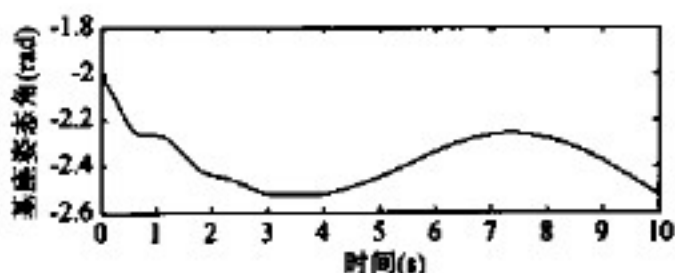
角和速度并不受控,同时由于控制器中不存在重力补偿项,因此空间机械臂系统可以快速的跟踪上给定的期望轨迹,并且跟踪误差能够快速的收敛到0。



(a) 末端期望轨迹与实际轨迹



(b) 末端的轨迹跟踪误差



(c) 基座的姿态角和速度

图9 空间应用时的轨迹跟踪情况

3 结论

本文针对 n 自由度空间机械臂建立了系统在重力条件下的地面装调和微重力条件下的空间应用两阶段的运动学模型和动力学模型,并以三自由度自

由漂浮空间机械臂为例,分别对其在地面和空间的动力学特性和轨迹跟踪进行计算机仿真研究和比较分析。仿真结果表明,由于空间机械臂系统在轨操作时处于微重力环境,因此系统在空间应用阶段运动较之地面装调阶段所需的驱动力矩更小,并且随着机械臂连杆质量的减小,机械臂关节所需的驱动力矩也越来越小;在地面装调过程中机械臂连杆的重力虽然不变,但在运动过程中重力产生的力矩时刻在变化,因此重力项对机械臂运动所需的驱动力矩有影响。同时重力项对轨迹跟踪精度也有影响,在同一控制器下, n 自由度空间机械臂在地面重力条件下可以快速的跟踪上期望的轨迹,并且跟踪误差能够快速的收敛到零;但在空间微重力条件下,由于系统不受重力的作用,控制器中的重力补偿项会对轨迹跟踪精度产生影响,因此 n 自由度空间机械臂难以跟踪上期望的轨迹,需要进一步设计自适应控制器以解决地面装调与空间应用的矛盾。

参考文献

- [1] 崔乃刚,王平,郭继峰等. 空间在轨服务技术发展综述. 宇航学报, 2007, 28(4): 33-39
- [2] Yoshida K. Engineering test satellite vii flight experiments for space robot dynamics and control: theories on laboratory test beds ten years ago, now in orbit. *International Journal of Robotics Research*, 2003, 22(5): 321-335
- [3] Landzettel K, Preusche C, Albu-schaffer A, et al. Robotic on-orbit servicing-DLR's experience and perspective. In: *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 2006. 4587-4594
- [4] Yoshida K, Dimitrov D, Nakanishi H. On the capture of tumbling satellite by a space robot. In: *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 2006. 4127-4132
- [5] Hirzinger G, Landzettel K, Brunner B, et al. DLR's robotics technologies for on-orbit servicing. *Advanced Robotics*, 2004, 18(2): 139-174
- [6] Javier M V, Luis G H. Operational space trajectory tracking control of robot manipulators endowed with a primary controller of synthetic joint velocity. *ISA Transactions*, 2011, 50: 131-140
- [7] 齐乃明,张文辉,高九州等. 空间微重力环境地面模拟试验方法综述. 航天控制, 2011, 29(3): 95-100
- [8] 吴国庆,孙汉旭,贺庆轩. 基于气浮方式的空间机器人地面试验平台的设计与实现. 现代机械, 2007, 3: 1-2, 19

- [9] 姚燕生, 梅涛. 空间操作的地面模拟方法——水浮法. 机械工程学报, 2008, 44(3): 182-188
- [10] 徐文福, 梁斌, 李成等. 空间机器人微重力模拟实验系统研究综述. 机器人, 2009, 31(1): 88-96
- [11] 罗杨宇, 李金泉, 王健美等. 人机合作机器人重力平衡设计. 机器人, 2006, 28(5): 540-543
- [12] 胡文瑞. 微重力科学进展. 见: 中国科学技术协会“科学技术面向新世纪”学术年会, 北京, 1998
- [13] 蔡自兴. 机器人学. 北京: 清华大学出版社, 2000. 89-90
- [14] Alessandro D L, Bruno S, Loredana Z. PD control with on-line gravity compensation for robots with elastic joints: Theory and experiments. *Automatica*, 2005, 41: 1809-1819

Effects of gravity on the motion control of a space manipulator

Liu Fucui, Gao Juanjuan, Wang Yueling

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

Abstract

To investigate the effects of the variation of gravity items of a space manipulator on its motion control during its ground alignment under gravity environment and space applications under microgravity environment, a n -DOF free-floating space manipulator system was taken as the control object, and a kinematic model was established through analyzing its kinematic characteristics under the conditions of microgravity and gravity, respectively. Furthermore, the dynamic equation of the n -DOF manipulator system was established by the Lagrangian approach. And a three DOF free-floating space manipulator was studied by this paper simulation on its dynamic characteristics and trajectory tracking during both ground alignment under gravity environment and space applications under microgravity environment. The simulation results showed that the driving torque and the trajectory tracking accuracy of the n -DOF manipulator were influenced by gravity items.

Key words: space manipulator, ground alignment, space applications, gravity items, motion control