

重力作用下的摩擦对空间机械臂运动控制的影响^①刘福才^② 刘彩凤 秦 利 刘 峰 王文魁

(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 针对空间机械臂在太空处于微重力环境,在地面装调时需要考虑重力及由重力引起的摩擦的影响的问题,以平面运动的二自由度机械臂为例研究了摩擦补偿控制,提出了一种主动补偿控制方法,用来减小甚至消除由地面重力作用产生的摩擦的影响。该方法首先采用几何方法求解运动学逆解,根据力矩平衡计算摩擦力矩,再结合 Kane 方程推导出系统的动力学模型,最后运用 PD 控制算法分别在考虑摩擦和不考虑摩擦两种情况下对机械臂动力学模型进行仿真研究,并在不同关节质量的条件下进行轨迹跟踪仿真研究。仿真结果表明,摩擦对控制机械臂运动的驱动力以及轨迹跟踪精度所产生的影响与重力密切相关,重力越小,影响越小。

关键词 空间机械臂,重力,摩擦,驱动力矩,力矩平衡,PD 控制,Kane 方程

0 引 言

随着航天事业的快速发展,空间机械臂在人类探索太空的过程中发挥越来越大的作用^[1],因此各国都致力于机械臂在轨服务技术的研究^[2-5]。近年来研究发现,重力引起的摩擦可以导致系统进入混沌状态,对于做轨迹跟踪的机械臂来说,当速度转向时,摩擦会造成机械臂较大的跟踪误差和出现极限环振荡^[6],摩擦力矩会造成机械臂低速运行时的爬行现象和跟踪滞后^[7]。由于空间机械臂在太空处于微重力环境,在地面对其装调时需要考虑重力及由重力引起的摩擦的影响。本文以空间二自由度机械臂为例,专门研究了由重力引起的摩擦对机械臂系统的影响,包括对机械臂运动控制驱动力的影响以及对机械臂系统的影响,包括对机械臂运动控制驱动力的影响以及对机械臂轨迹跟踪精度的影响,而且给出了主动补偿控制方法,以减小或消除重力产生的摩擦的作用。

1 相关研究

关节摩擦会使机械臂控制系统品质恶化,造成

系统不稳定。文献[8]通过对一个具体的机械手的实验研究表明,机械手运动的驱动力矩(驱动力)大约有 20% 消耗在克服摩擦阻力上。克服摩擦给系统带来的危害,最直接的办法就是尽量减小系统中存在的摩擦力(力矩)。工程中主要采用改善润滑条件、提高有关机械零件的加工精度、合理设计传动系统、采用高性能轴承如气浮轴承、磁悬浮轴承以及控制补偿等。而纯机械的方法造价昂贵,甚至是不可能做到的。近年来很多学者在研究摩擦补偿方面做了大量的研究和试验工作。文献[9-11]对摩擦的各种模型、分析工具和补偿方法进行了综述性的研究,总结了两大类补偿技术:基于无摩擦模型的摩擦补偿技术和基于摩擦模型的摩擦补偿技术。文献[12]为了消除在地面环境下对空间飞行器进行试验时由于重力作用而产生的摩擦力的影响,以一台由电机驱动小车车轮在导轨上滚动运动的小车作为研究对象,提出了针对地面重力产生的摩擦力进行主动补偿控制的方法,来减小或消除因重力而产生的摩擦力的作用,为在地面环境下实现无重力环境提供了一条新的途径。文献[13]针对小型 DC 电机采用自适应模糊系统在线逼近摩擦模型并将辨识结果作为 PD 算法的补偿项。文献[14]针对一类多自由度机械系统,提出了用模糊状态估计器估计摩

① 863 计划资助项目。

② 男,1966 年生,博士,博士生导师,教授;研究方向:计算机控制及机器人控制;联系人,E-mail:lfc@ysu.edu.cn
(收稿日期:2013-05-06)

擦模型中的不可测量。文献[15]以平面运动的三关节机械臂为例,研究了摩擦对机械臂运动的影响。文献[16]以三自由度漂浮空间机械臂为例,分别对其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了仿真研究,但没有考虑由重力引起的摩擦的影响。

本研究以空间二自由度机械臂为例,利用几何方法,求解机械臂的运动学逆解,同时采用 Kane 方程建立空间机械臂的动力学模型。根据力矩平衡原理建立空间机械臂在不同重力环境下的摩擦模型,最后对重力作用下的摩擦对机械臂运动控制驱动力的影响、微重力环境下的摩擦特性以及在不同关节质量下摩擦对轨迹跟踪精度的影响进行仿真,以弄清重力作用下的摩擦对空间机械臂运动控制的影响。

2 二自由度机械臂的运动学逆解

针对空间机械臂系统作如下假设:

- (1) 系统为刚体系统;
- (2) 系统由基座和连杆组成,连杆每个关节具有一个转动自由度且受主动控制。

为方便讨论,定义如下符号: B_i 为第 i 个连杆 ($i = 1, 2$); C_i 为第 i 个连杆的质心 ($i = 1, 2$); m_i 为第 i 个连杆的质量 ($i = 1, 2$); a_i 为从第 i 个关节到第 $i + 1$ 个连杆质心的矢量 ($i = 1, 2$); b_i 为从第 i 个连杆质心到第 $i + 1$ 个关节的矢量 ($i = 1, 2$); l_i 为第 i 个连杆的长度 ($i = 1, 2$); $\mathbf{q}$ 为机械臂关节角矢量, $\mathbf{q} = [q_1, q_2]^T$; $\mathbf{q}_d$ 为期望的机械臂关节角, $\mathbf{q}_d = [q_{d1}, q_{d2}]^T$; $\dot{\mathbf{q}}$ 为机械臂关节的角速度, $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2]^T$; $\mathbf{Tf}$ 为地面重力环境下关节的摩擦力矩, $\mathbf{Tf} = [Tf_1, Tf_2]$; $\mathbf{Tf}^*$ 为空间微重力环境下关节的摩擦力矩, $\mathbf{Tf}^* = [Tf_1^*, Tf_2^*]$ 。

采用几何方法求解二自由度机械臂的运动学逆解。利用几何方法求解各关节的位移,无需建立机械臂的运动学方程^[17]。

机械臂的几何解析如图 1 所示,已知末端手爪 W 的坐标为 (x, y) , 求解各关节的位移量。从图 1 中可以看出,两连杆有两种位姿都对应于点 W , 因此,机械臂的逆运动学有两组解,分别为 q_1, q_2 和 q'_1, q'_2 。

对于三角形 OAW , 利用余弦定理,有

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2\cos(\pi - q_2) \quad (1)$$

所以有

$$\begin{cases} q_2 = \arccos \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}, & 0 \leq q_2 \leq \pi \\ q'_2 = -\arccos \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}, & -\pi \leq q'_2 \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

如图 1 做辅助角 β, γ , 则 $\beta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$, 利用余弦定理,有

$$\begin{cases} l_2^2 = x^2 + y^2 + l_1^2 - 2l_1 \sqrt{x^2 + y^2} \cos \gamma \\ \gamma = \arccos \frac{x^2 + y^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{x^2 + y^2}}, & 0 \leq \gamma \leq \pi \\ \gamma' = -\arccos \frac{x^2 + y^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{x^2 + y^2}}, & -\pi \leq \gamma \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

对应

$$\begin{cases} q_1 = \beta - \gamma \\ q'_1 = \beta + \gamma \end{cases} \quad (5)$$

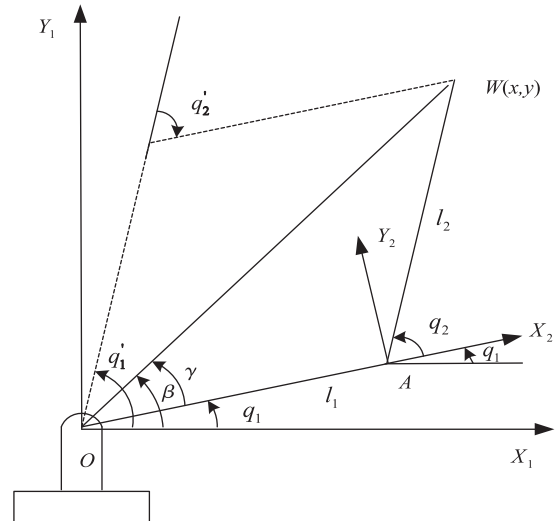


图 1 机械臂的几何解析

3 系统动力学方程的建立

本文采用 Kane 方程建立空间机械臂的动力学模型,根据力矩平衡原理建立空间机械臂在不同重力环境下的摩擦模型。尽管各种多体动力学建模方法都很复杂,但采用 Kane 方程建模,过程反而不难^[18]。并且 Kane 方法选取物体之间的相对运动作为系统的广义坐标,这样可以避免建立过多的约束方程,并且避开了力、速度、加速度等复杂运算;既可以建立相对惯性系的运动,又可以建立相对非惯性系的动力学方程,方法规格化,方程数目少^[19]。

Kane 方法求解系统的动力学,只需通过求“偏速度”、“偏角速度”、“广义主动力”、“广义惯性力”,就可以直接建立其动力学方程。

如图 2 选固定坐标系 $OXYZ$, 局部坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 、 $O_2X_2Y_2Z_2$ 分别与各杆固连。各杆轴线间夹角 q_1 、 q_2 彼此独立,可用于描述此平面机构的位形,且规定 q_1 、 q_2 及其导数逆钟方向为正。用 $\mathbf{i}_a$ 、 $\mathbf{j}_a$ 、 $\mathbf{k}_a$ 分别表示 $O_aX_aY_aZ_a$ 坐标轴的单位矢。选 $\dot{q}_1$ 、 $\dot{q}_2$ 为广义速率(即 $u_1 = \dot{q}_1$, $u_2 = \dot{q}_2$),则根据各刚体的质心 C_a 速度和角速度的表示式,可找其相对应的偏速度和偏角速度,各杆的偏速度、偏角速度如表 1 所示($a = 1, 2$)。

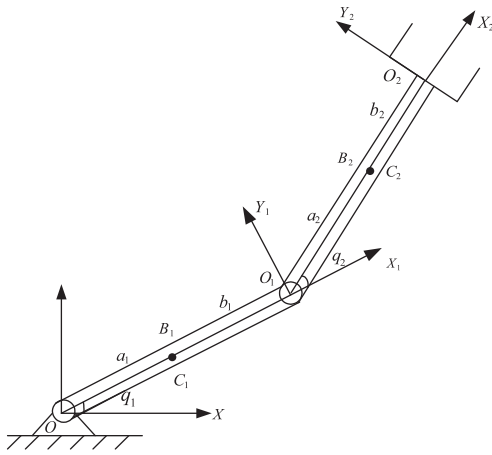


图 2 二自由度机械臂示意图

表 1 各杆的偏速度、偏角速度

	u_r	
$\omega_a^{(r)}$	$u_1 = \dot{q}_1$	$u_2 = \dot{q}_2$
$\mathbf{v}_{ca}^r$		
$\mathbf{v}_{c1}$	$l_1\mathbf{j}_1/2$	0
$\mathbf{v}_{c2}$	$l_1\mathbf{j}_1 + l_2\mathbf{j}_2/2$	$l_2\mathbf{j}_2/2$
$\boldsymbol{\omega}_1$	$\mathbf{k}$	0
$\boldsymbol{\omega}_2$	$\mathbf{k}$	$\mathbf{k}$

其中, u_r 为广义速率, $\mathbf{v}_{ac}^{(r)}$ 为各杆的偏速度, $\boldsymbol{\omega}_a^{(r)}$ 为各杆的偏角速度。

当不考虑摩擦时,作用于此系统的主动力有重力 $\mathbf{G}_1 = -m_1g\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{G}_2 = -m_2g\mathbf{j}$, 工作阻力矩 $\mathbf{L}_2 = -L_2\mathbf{k}$, 驱动力矩 $\mathbf{T}_1 = T_1\mathbf{k}$ 、 $\mathbf{T}_2 = T_2\mathbf{k}$; 当考虑摩擦时,此系统的主动力还包含摩擦力矩 $\mathbf{Tf}_1 = -Tf_1\mathbf{k}$ 、 $\mathbf{Tf}_2 = -Tf_2\mathbf{k}$ 。

不考虑摩擦时,系统的广义主动力 $F^{(1)}$ 、 $F^{(2)}$ 计算如下:

$$\begin{aligned} F^{(1)} &= \sum_{a=1}^2 F_a^{(1)} \\ &= -m_1g\mathbf{j} \cdot \frac{l_1}{2}\mathbf{j}_1 + (-m_2g\mathbf{j}) \cdot \left(l_1\mathbf{j}_1 + \frac{l_2}{2}\mathbf{j}_2\right) \\ &\quad + T_1\mathbf{k} \cdot \mathbf{k} + (T_2\mathbf{k} - L_2\mathbf{k}) \cdot \mathbf{k} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F^{(2)} &= \sum_{a=1}^2 F_a^{(2)} \\ &= -m_2g\mathbf{j} \cdot \frac{l_2}{2}\mathbf{j}_2 + (T_2\mathbf{k} - L_2\mathbf{k}) \cdot \mathbf{k} \end{aligned} \quad (7)$$

考虑摩擦时,系统的广义主动力 $F^{(1)}$ 、 $F^{(2)}$ 计算如下:

$$\begin{aligned} F^{(1)} &= \sum_{a=1}^2 F_a^{(1)} = \sum_{a=1}^2 \mathbf{f}_a \cdot \mathbf{v}_{ca}^{(1)} \\ &= -m_1g\mathbf{j} \cdot \frac{l_1}{2}\mathbf{j}_1 + (-m_2g\mathbf{j}) \cdot \left(l_1\mathbf{j}_1 + \frac{l_2}{2}\mathbf{j}_2\right) \\ &\quad + (T_1\mathbf{k} - Tf_1\mathbf{k}) \cdot \mathbf{k} + (T_2\mathbf{k} - Tf_2\mathbf{k} - L_2\mathbf{k}) \cdot \mathbf{k} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} F^{(2)} &= \sum_{a=1}^2 F_a^{(2)} = \sum_{a=1}^2 \mathbf{f}_a \cdot \mathbf{v}_{ca}^{(2)} \\ &= -m_2g\mathbf{j} \cdot \frac{l_2}{2}\mathbf{j}_2 + (T_2\mathbf{k} - Tf_2\mathbf{k} - L_2\mathbf{k}) \cdot \mathbf{k} \end{aligned} \quad (9)$$

各杆的惯性力主矢 $-m_1\mathbf{a}_{c1}$ 、 $-m_2\mathbf{a}_{c2}$ 及对质心的主矩 $\mathbf{T}_1^* = -I_1\boldsymbol{\epsilon}_1$ 、 $\mathbf{T}_2^* = -I_2\boldsymbol{\epsilon}_2$ 。且 $\mathbf{a}_{c1} = \frac{d\mathbf{v}_{c1}}{dt}$, $\mathbf{a}_{c2} = \frac{d\mathbf{v}_{c2}}{dt}$, $\boldsymbol{\epsilon}_1 = \frac{d\boldsymbol{\omega}_1}{dt}$, $\boldsymbol{\epsilon}_2 = \frac{d\boldsymbol{\omega}_2}{dt}$ 。广义惯性力 $F^{*(1)}$ 、 $F^{*(2)}$ 计算如下:

$$\begin{aligned} F^{*(1)} &= \sum_{a=1}^2 F_a^{*(1)} \\ &= (-m_1\mathbf{a}_{c1}) \cdot \mathbf{v}_{c1}^{(1)} + (-m_2\mathbf{a}_{c2}) \cdot \mathbf{v}_{c2}^{(1)} \\ &\quad + (-I_1\boldsymbol{\epsilon}_1) \cdot \boldsymbol{\omega}_1^{(1)} + (-I_2\boldsymbol{\epsilon}_2) \cdot \boldsymbol{\omega}_2^{(1)} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} F^{*(2)} &= \sum_{a=1}^2 F_a^{*(2)} \\ &= (-m_1\mathbf{a}_{c1}) \cdot \mathbf{v}_{c1}^{(2)} + (-m_2\mathbf{a}_{c2}) \cdot \mathbf{v}_{c2}^{(2)} \\ &\quad + (-I_1\boldsymbol{\epsilon}_1) \cdot \boldsymbol{\omega}_1^{(2)} + (-I_2\boldsymbol{\epsilon}_2) \cdot \boldsymbol{\omega}_2^{(2)} \end{aligned} \quad (11)$$

在地面装调阶段,空间机械臂要考虑重力和摩擦的作用,根据力矩平衡,摩擦力矩、重力矩、切向方向的广义惯性力的和为零,建立系统地面装调阶段的摩擦力矩模型如下:

$$\begin{aligned} Tf_1 &= m_2ga_2c_{12} + m_2gl_1c_{11} + m_1ga_1c_{11} \\ &\quad + F_{\text{切向}}^{*(1)} \cdot a_1 + F_{\text{切向}}^{*(2)} \cdot (l_1c_2 + a_2) \end{aligned} \quad (12)$$

$$Tf_2 = m_2 g a_2 c_{12} + F_{\text{切向}}^{*(2)} \cdot a_2 \quad (13)$$

其中, $F_{\text{切向}}^{*(1)} = (-m_1 \mathbf{a}_{c1}) \cdot \mathbf{v}_{c1}^{(1)} + (-m_2 \mathbf{a}_{c2}) \cdot \mathbf{v}_{c2}^{(1)}$, $F_{\text{切向}}^{*(2)} = (-m_1 \mathbf{a}_{c1}) \cdot \mathbf{v}_{c1}^{(2)} + (-m_2 \mathbf{a}_{c2}) \cdot \mathbf{v}_{c2}^{(2)}$, $c_1 = \cos q_1, c_2 = \cos q_2, c_{12} = \cos(q_1 + q_2)$ 。

将广义主动力和广义惯性力代入 Kane 方程, 则有

$$F^{(1)} + F^{*(1)} = 0 \quad (14)$$

$$F^{(2)} + F^{*(2)} = 0 \quad (15)$$

得到考虑摩擦时该系统的动力学方程为

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{Tf}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (16)$$

以及不考虑摩擦时该系统的动力学方程为

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (17)$$

其中, $\mathbf{q} = [q_1, q_2]^T$ 为机械臂的关节角, $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2]^T$ 为关节角的驱动力矩, $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ 是系统的惯性矩阵, $\mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ 是系统的哥氏力和离心力矩阵, $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$ 是重力载荷向量矩阵, $\mathbf{Tf}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$ 是摩擦载荷向量矩阵。

同理, 可以建立空间机械臂在空间微重力环境下的摩擦力矩模型为

$$Tf_1^* = \Xi_{\text{切向}}^{*(1)} \cdot a_1 + \Xi_{\text{切向}}^{*(2)} \cdot (l_1 c_2 + a_2) \quad (18)$$

$$Tf_2^* = \Xi_{\text{切向}}^{*(2)} \cdot a_2 \quad (19)$$

其中, $\Xi_{\text{切向}}^{*(1)}$ 和 $\Xi_{\text{切向}}^{*(2)}$ 为空间微重力环境下切向方向的广义惯性力矩。

4 仿真实验研究

4.1 摩擦对机械臂运动控制驱动力的影响

为了研究摩擦对机械臂运动控制驱动力的影响, 采用 MATLAB 仿真软件分别对考虑摩擦和不考虑摩擦的动力学特性进行仿真研究。表 2 给出了二自由度机械臂的参数。

表 2 二自由度机械臂参数

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

二自由度机械臂关节的运动轨迹为

$$\begin{cases} q_{d1} = \frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi t}{2} \\ q_{d2} = \frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi t}{2} \end{cases} \quad (20)$$

图 3 和图 4 分别给出了关节 1 和关节 2 在不考虑摩擦和考虑摩擦两种情况下的驱动力矩, 可以看出, 两者有较大差别。

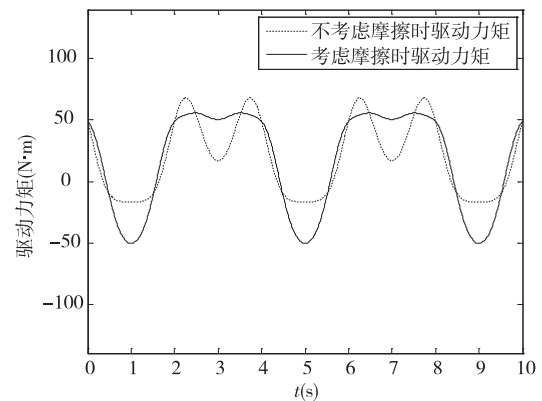


图 3 不考虑摩擦与考虑摩擦时关节 1 的驱动力矩

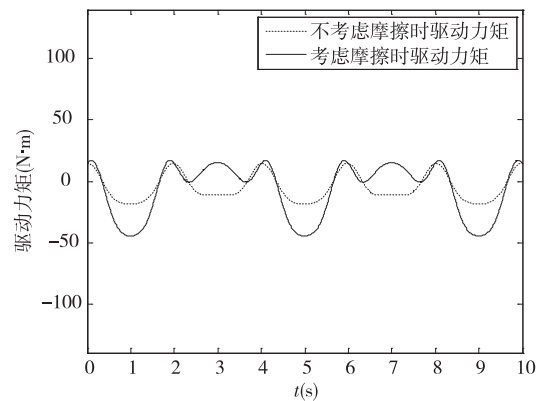


图 4 不考虑摩擦与考虑摩擦时关节 2 的驱动力矩

4.2 不同重力环境对摩擦力矩的影响

为了研究不同重力环境对空间机械臂摩擦力矩的影响, 采用 MATLAB 仿真软件对关节 1 和关节 2 在不同重力环境下的摩擦力矩进行仿真研究, 仿真结果如图 5 和图 6 所示。

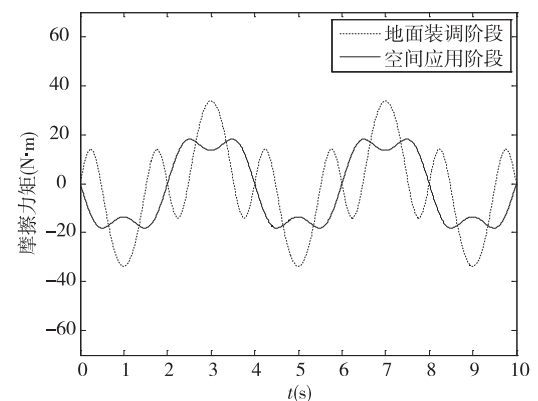


图 5 不同重力环境下关节 1 的摩擦力矩

从图 5、图 6 可以看出:空间微重力环境下关节的摩擦力矩相对于地面装调时有所减小。

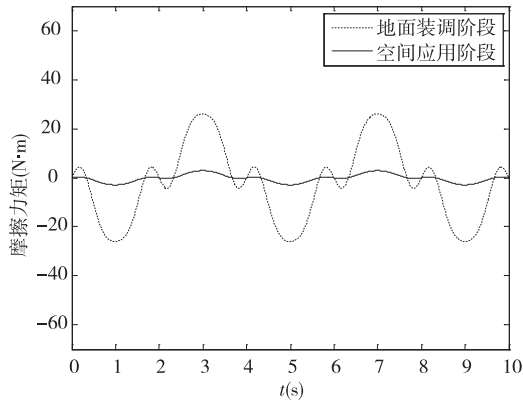


图 6 不同重力环境下关节 2 的摩擦力矩

4.3 摩擦对机械臂轨迹跟踪精度的影响

为了研究摩擦对机械臂轨迹跟踪精度的影响,首先分析二自由度机械臂连杆质量 m_1 和 m_2 对空间轨迹跟踪精度的影响。采用 MATLAB 仿真软件分别对考虑摩擦补偿和不考虑摩擦补偿的轨迹跟踪情况进行仿真研究。

二自由度机械臂的末端抓手的初始位姿为 $(1.0, 0.05)$, 期望轨迹为

$$\begin{cases} x_{1d} = 0.28 \cos \frac{\pi t}{5} + 0.85 \\ x_{2d} = 0.28 \sin \frac{\pi t}{5} \end{cases} \quad (21)$$

轨迹跟踪的控制算法采用 PD 控制^[20], 控制器参数为 $k_p = 250, k_d = 25$ 。

下面对二自由度机械臂在有摩擦补偿控制器和没有摩擦补偿控制器下轨迹跟踪分别进行仿真研究。

考虑摩擦补偿的 PD 控制器为

$$\tau = k_p e + k_d \dot{e} + G(q) + Tf(q) \quad (22)$$

不考虑摩擦补偿的 PD 控制器为

$$\tau = k_p e + k_d \dot{e} + G(q) \quad (23)$$

分别取二自由度机械臂连杆 1 和 2 的质量为原质量的 1/1、1/2、1/5 和 1/10 进行轨迹跟踪控制的仿真研究, 仿真结果如图 7 – 图 11 所示。

从上面仿真图可知:有摩擦补偿时实际轨迹能够跟踪上期望轨迹, 没有摩擦补偿时实际轨迹不能够跟踪上期望轨迹。机械臂连杆 1 和 2 的质量对轨迹跟踪情况有影响, 随着 m_1 和 m_2 的减小, 控制器中摩擦补偿项对机械臂轨迹跟踪精度的影响也会减

小, 因此轨迹跟踪的误差越来越小, 同时由于机械臂在运动过程中连杆 1 和 2 的摩擦产生的力矩较之原来减小, 因此关节 1 和 2 的控制力矩也减小。

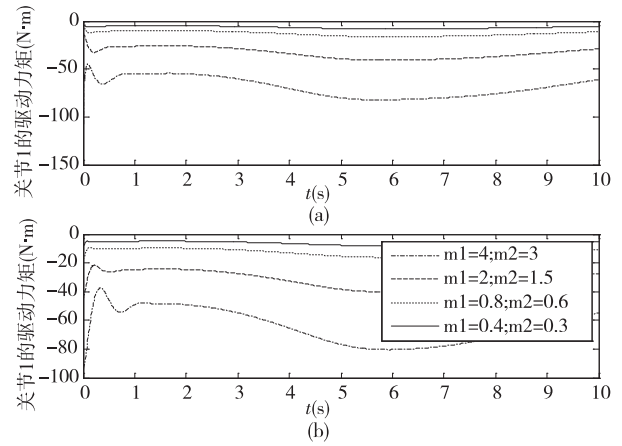


图 7 不考虑(a)和考虑(b)摩擦补偿时
关节 1 的驱动力矩

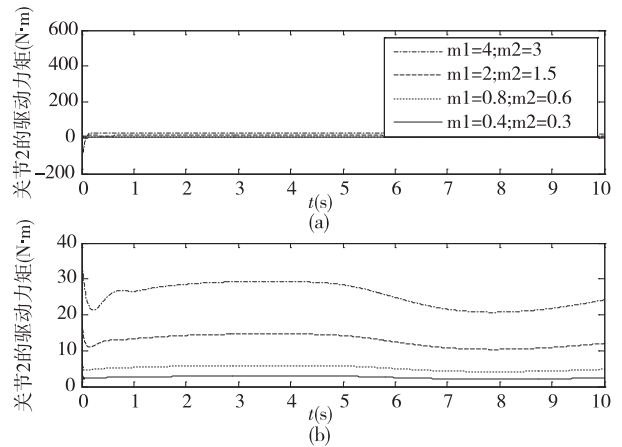


图 8 不考虑(a)和考虑(b)摩擦补偿时
关节 2 的驱动力矩

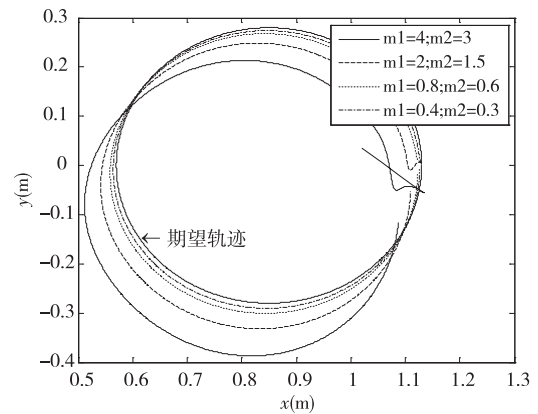


图 9 不考虑摩擦补偿时末端的期望轨迹
与实际轨迹

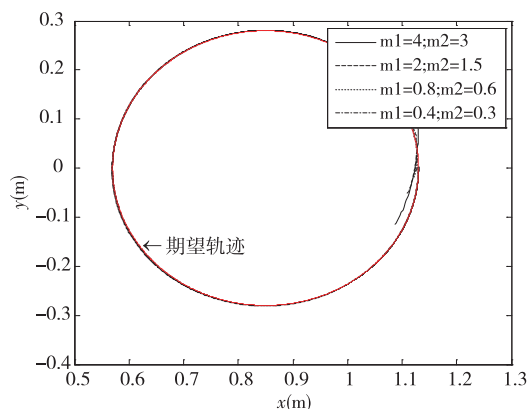


图 10 考虑摩擦补偿时末端的期望轨迹与实际轨迹

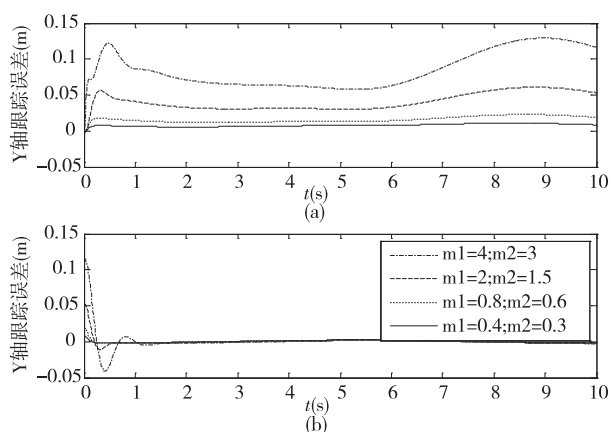


图 11 不考虑(a)和考虑(b)摩擦补偿时末端轨迹跟踪误差

5 结论

本研究专门探讨了由重力引起的摩擦对空间机械臂运动控制驱动力矩及轨迹跟踪精度的影响,以及对空间应用时微重力环境下摩擦力矩的影响。以空间二自由度机械臂为例,建立了系统在考虑摩擦和不考虑摩擦情况下的动力学模型,并分别对机械臂考虑了摩擦和未考虑摩擦的动力学特性、机械臂在有摩擦补偿和没有摩擦补偿时的轨迹跟踪以及连杆质量不同时的轨迹跟踪进行了计算机仿真研究和比较分析。仿真结果表明,考虑了摩擦作用时的机械臂和未考虑摩擦作用时的机械臂相比,两者的运动存在差别。有摩擦补偿时实际轨迹能够跟踪上期望轨迹,没有摩擦补偿时实际轨迹不能够跟踪上期望轨迹。机械臂连杆的质量对轨迹跟踪精度有影响,随着质量的减小,控制器中摩擦补偿项对机械臂

轨迹跟踪情况的影响也会减小,因此轨迹跟踪的误差越来越小,同时由于机械臂在运动过程中连杆的摩擦产生的力矩比原来减小,因此关节的控制力矩也减小。需要说明的是,本文只考虑了空间机械臂在地面装调情况下重力及由重力作用产生的摩擦对机械臂运动行为的影响,下一步的研究工作是不同重力环境下关节柔性及摩擦对机械臂运动行为的影响。

参考文献

- [1] 邵志宇,孙汉旭,贾庆轩等.一种空间机械臂构造模块的研制.宇航学报,2007,28(1):147-151
- [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 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 2006. 4587-4594
- [4] Liang B, Li C, Xue L J, et al. A Chinese small intelligent space robotic system for on-orbit servicing. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 2006. 4603-4607
- [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] Henrik O, Karl A. Friction generated limit cycles. In: Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications, Dearborn, USA, 1996. 798-803
- [7] Mu D J, Wang H R, Wang X. Observer based friction compensation in robot control. In: Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai, China, 2004. 26-29
- [8] Craig J. Introduction to robotics. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1986
- [9] Armstrong-Helouvry B, Dupont P, Canudas de Wit C. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction. *Automatic*, 1994, 30(7):1083-1138
- [10] Babilio B, Marina I. Friction compensation in robotics: an Overview. In: Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005, Seville, Spain, 2005. 4360-4361
- [11] 刘强,尔联洁,刘金琨等.摩擦非线性环节的特性、建模与控制补偿综述.系统工程与电子技术,2002,24

- (11):45-52
- [12] 房立金,王洪光,徐志刚等. 重力环境下的摩擦补偿控制方法研究. 见:全国第十届空间及运动体控制技术学术会议论文集. 中国宇航学会,2002
- [13] 王永富,柴天佑. 一种补偿动态摩擦的自适应模糊控制方法. 中国电机工程学报,2005,25(2):139-143
- [14] 王永富,王殿辉,柴天佑等. 基于状态估计的摩擦模糊建模与鲁棒自适应控制. 自动化学报,2011,37(2):245-251
- [15] 樊世超,丁文镜,陆明万等. 摩擦对机械臂运动的影响. 工程力学,2002,19(2):64-67,82
- [16] 刘福才,高娟娟,王跃灵等. 重力对空间机械臂运动控制的影响. 高技术通讯,2012,22(9):944-950
- [17] 彭金柱. 机器人轨迹跟踪的智能控制方法研究:[硕士学位论文]. 湖南:湖南大学控制理论与控制工程,2005
- [18] 张军,胡海霞. 空间机器人动力学建模与模型验证. 空间控制技术与应用,2009,35(6):6-12
- [19] 徐世钰. Kane 方程在机械臂动力学中的应用. 西安电子科技大学学报,1988,15(2):100-108
- [20] 刘明治,刘春霞. 柔性机械臂动力学建模和控制研究. 力学进展,2001,31(1):1-8

Influence of the friction caused by gravity on the motion control of a space manipulator

Liu Fucai, Liu Caifeng, Qin Li, Liu Feng, Wang Wenkui

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

Abstract

The effects of the gravity caused friction on space manipulators were studied because they work in the micro-gravity environment in space so the friction caused by gravity should be considered during their ground alignment. Then, an active compensation control method was developed to reduce or even eliminate the influence of friction caused by the ground gravity and its effectiveness was validated on a two-DOF manipulator. The method consists of three steps: first, the inverse kinematics is derived by using a geometric method; next, the friction torque and dynamic equations are derived based on the torque balance and the Kane equation; finally, the dynamic properties with and without friction are studied, and the trajectory tracking in different joint qualities is simulated by using the PD control algorithm. The simulation results show that the influences of the friction on the driving force of the manipulator motion control and the trajectory tracking accuracy are closely related with the gravity. Namely the smaller the gravity is, the smaller the influence will be.

Key words: space manipulator, gravity, friction, driving torque, torque balance, PD control, Kane equation