

文章编号: 1002-0446(2003)02-0097-04

基于模态的柔性机器人协调操作系统的动力学分析

毛立军 余跃庆

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院 北京 100022)

摘要: 目前,对于柔性机器人协调操作动力学问题的研究已经取得了一定的研究成果,但是这些研究大多采用有限元法来建立动力学模型,很难将这种模型应用到实际的控制中.本文利用假设模态法和 Lagrange 方程,建立了柔性机器人协调操作系统的动力学方程,并给出平面两 3R 柔性机器人协调操作刚性负载完成目标运动规划任务的数值仿真算例,从而验证本方法的可行性和正确性.

关键词: 假设模态; 柔性机器人; 协调操作; 动力学

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

DYNAMIC ANALYSIS OF FLEXIBLE ROBOT COOPERATION SYSTEM BASED ON ASSUMED MODES

MAO Li-jun YU Yue-qing

(Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

Abstract: In this paper, the system dynamic equations are developed by using assumed modes method and Lagrange equation. A numerical example of two planar 3-R flexible robots manipulating a rigid body to realize the given kinematic planning task of the objective is illustrated successfully. The simulation results demonstrate the feasibility and effectiveness of the method.

Keywords: assumed mode, flexible manipulator, cooperation, dynamics

1 引言(Introduction)

对于许多的作业任务,如抓取不规则形状或太重的负载、操作有自由度的物体以及不需夹具或固定而由多机械臂在空中组装零件等,单臂机器人是无法完成的,这些任务需要双臂或多臂机器人之间的协调操作才能完成.因此,机器人协调操作的研究无论是从应用还是理论上都有很高的价值.刚性机器人协调操作^[1~4]和柔性机器人协调操作^[5~7]动力学研究的深入和发展,使得机器人协调操作的研究成为了一个前沿课题;同时这些研究成果也为进一步进行柔性机器人协调操作的研究奠定了基础.

当前,大多研究均采用有限元法建立柔性机器人协调操作的动力学模型.这种建模方法建立的动力学模型,方程数目多且维数高,而且由于计算出的刚度矩阵较实际的刚度矩阵大得多,使得其闭环系统不稳定,很难将这种动力学模型应用到实际的工业控制中.

本文将对两平面 3R 柔性机器人协调操作刚性负载的动力学问题进行研究.在建模时综合考虑柔性机器人内部各杆之间、柔性机器人与负载之间的运动学和动力学耦合关系,利用假设模态法和 Lagrange 方程,推导出柔性机器人协调操作系统的运动学以及动力学协调约束条件,建立协调操作系统的动力学方程,并给出平面两 3R 柔性机器人协调操作刚性负载完成目标运动规划任务的数值仿真算例.

2 柔性机器人的动力学方程 (Dynamic equation of flexible manipulators)

图 1 为两平面 3R 柔性机器人协调操作刚性负载的示意图.选取 Euler-Bernoulli 梁作为柔性杆模型,利用 Lagrange 方程和假设模态法,经过推导,第 i 个柔性机器人动力学方程可以写为^[8]

$${}^iM({}^i q) {}^i \ddot{q} + {}^i h({}^i q, {}^i \dot{q}) + K {}^i q = Q {}^i u + {}^i F \quad (1)$$

其中: ${}^i q = (\theta_1, \dots, \theta_n, \delta_{11}, \dots, \delta_{1,m_1}, \dots, \delta_{n1}, \dots, \delta_{n,m_n})^T$ 为一个 N 维的广义坐标, ($N = n + \sum_j m_j$), ${}^i u$ 为 n 维的关节输入力矩. ${}^i M$ 为广义质量矩阵, ${}^i h$ 为离心力向量, ${}^i K$ 为广义刚度矩阵, Q 为一输入形式为 $[I_{n \times n} \ O_{n \times (N-n)}]^T$ 的矩阵, ${}^i F$ 为作用在模态坐标上的广义力.

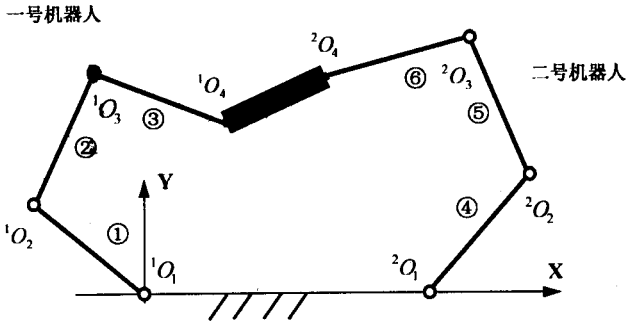


图1 两柔性机器人协调操作系统

Fig.1 Coordinated manipulation system of two flexible robots

3 运动协调约束条件 (Kinematic coordination constraints)

如图2所示, A, B 两点分别为一号柔性机器人和二号柔性机器人的实际抓持点(对应于系统变形后的实际位形). 下面经过分析, 得出系统的运动协调约束条件.

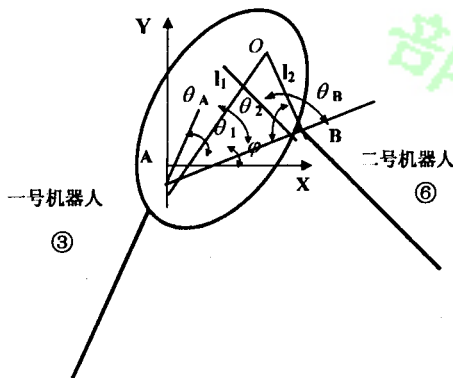


图2 柔性机器人与操作负载位置示意图

Fig.2 Position sketch of flexible manipulators and payload

由于柔性机器人所抓持的物体为刚体, 因而两抓持点 A, B 之间的距离为一定常值 l_{AB} . 质心 O 点在惯性坐标系下的绝对坐标为 $P_o = (x_o \ y_o)^T$, 其相对坐标为 ${}^i p_o = ({}^i x_o \ {}^i y_o)^T$, A 点在惯性坐标系下的绝对坐标为 $p_A = (x_A \ y_A)^T$, B 点在惯性坐标系下的绝对

坐标为 $p_B = (x_B \ y_B)^T$. 图上 θ_1, θ_2 为被抓持物体的质心和柔性机器人抓持点的连线与抓持点 A, B 之间连线的夹角. θ_A, θ_B 为柔性机器人抓持点的连线到各个柔性机器人末杆的转角, φ 为柔性机器人抓持点之间的连线与 X 轴之间的夹角. 由图上所示的几何关系可知有

$$p_A = p_o - {}^i G_1 {}^i p_o \quad (2)$$

$$p_B = p_o - {}^i G_2 {}^i p_o \quad (3)$$

其中: ${}^i G_1$ 和 ${}^i G_2$ 为相应的从相对坐标系向绝对坐标系转换的坐标转换矩阵, 并有

$${}^i G_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_A + \varphi) & -\sin(\theta_A + \varphi) \\ \sin(\theta_A + \varphi) & \cos(\theta_A + \varphi) \end{bmatrix}$$

$${}^i G_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_B + \varphi) & -\sin(\theta_B + \varphi) \\ \sin(\theta_B + \varphi) & \cos(\theta_B + \varphi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(2)、(3)即为柔性机器人协调操作的运动协调约束条件.

4 动力协调约束条件 (Dynamic coordination constraints)

柔性机器人协调操作的动力约束条件一方面是指各机器人抓持力的合力与物体的惯性力相平衡, 另一方面还指机器人之间的载荷分配关系. 如图2所示, 设被操作物体质心 O 在系统惯性坐标系下的实际坐标为 $(S_x \ S_y)^T$, 方位角为 φ 令

$$x = (S_x \ S_y \ \varphi)^T \quad (5)$$

被操作物体的动力学方程为

$$[M_o] \{\ddot{x}\} = - \sum_{i=1}^m [{}^i D] \{{}^i F'\} \quad (6)$$

其中: $[M_o]$ 是物体的质量矩阵, $[{}^i D]$ 是第 i 个机器人的力转换矩阵, $\{{}^i F'\}$ 是第 i 个机器人作用于被操作物体上的外力向量.

式(6)即为柔性机器人协调操作的动力协调约束条件.

5 协调操作系统的动力学方程 (Dynamic equations of coordinated manipulation system)

由上述的(1)、(2)、(3)、(6)可以得到柔性机器人协调操作的动力学方程如下:

$${}^i M({}^i q) {}^i \ddot{q} + {}^i h({}^i q, \dot{{}^i q}) + {}^i K {}^i q = Q {}^i u + {}^i F \quad (1)$$

$$p_A = p_o - {}^i G_1 {}^i p_o \quad (2)$$

$$p_B = p_o - {}^i G_2 {}^i p_o \quad (3)$$

$$[M_o] \{\ddot{x}\} = - \sum_{i=1}^m [{}^i G] \{{}^i F'\} \quad (6)$$

对于本章研究的算例,式(1)和(6)共有 21 个方程,18 个广义坐标,它们之间并不是相互独立的,而是还要受到机器人各杆之间连接约束条件和柔性机器人协调操作的协调约束条件的限制.对于相应的有限元模型算例,将每一根杆作为一个柔性梁单元,系统共有 51 个方程,48 个广义坐标.为了缩减式(1)和(6)广义坐标的数量,我们需要将系统约束代入到上述的 21 个方程中去,并重新定义系统的广义坐标,加以整理,得到系统的动力学方程.同时,由于(2)、(3)、(6)式是在惯性坐标系下加以表述的,因而我们必须将它转换到模态坐标系下才能同其他方程相结合.将(1)式中与机器人末端位置有关的广义变量转换成与被操作负载质心位置相关的广义变量,然后通过(6)式进行内力消元即可得到要求解的系统动力学方程.

6 仿真算例 (Simulation example)

现在以两平面 3R 柔性机器人协调操作刚性负载在规定的时间内完成给定轨迹运动以及方位角转动的逆动力学任务为例,来说明本方法的可行性和正确性.协调系统的结构简图如图 1,以下各量均采用国际单位制.两柔性机器人系统参数相同,各杆长分别为: $L_1=1, L_2=1, L_3=0.5$,材料均为铝($\rho=2710, E=6.77 \times 10^{10}$),截面为边长均为 0.01 的正方形,各关节的质量为 0.5,其转动惯量为 0.0025,2 号机器人的连架节点坐标分别为: $(0,0)^T$ 和 $(2,0)^T$,抓持角分别为: $\theta_A=\pi/4, \theta_B=3\pi/4$.被操作负载的质心与 1,2 号机器人抓持点间的连线为一边长为 0.2 的等边三角形,被操作负载的质量为 0.25,对质心的转动惯量为 0.005.

所期望完成的目标轨迹任务为如表 1 所示.

表 1 目标任务参数:(单位:m,rad,s,m/s,rad/s)

Table 1 Object parameters: (Units: m,rad,s,m/s,rad/s)

质心轨迹方程	质心起点坐标	质心终点坐标	起始方位角 φ	终止方位角 φ	总操作时间 s	启动耗时	制动耗时
$y=0.5+0.5x$	$\begin{pmatrix} 1.2 \\ 1.1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.6 \\ 0.8 \end{pmatrix}$	0	$\pi/6$	1.2	0.3	0.3
启动线(角)速度规律 $0 < t < T_q$			$v = \frac{[\cos(t/T_q \pi + \pi) + 1]}{2} V_c$				
匀速线(角)速度规律 $T_q < t < T_s - T_z$			$v = V_c$				
制动线(角)速度规律 $T_s - T_z < t < T_s$			$v = \frac{\cos\{[t - (T_s - T_z)]\pi/T_z\} + 1}{2} V_c$				

注: V_c 可由目标任务的其他参数唯一确定,对 S_x 为 -0.667,对 S_y 为 -0.333,对 φ 为 0.5819.

通过仿真分析可以得到被操作负载质心的位置误差和转角误差分别如图 3、图 4 所示,各关节驱动力矩随时间的变化规律如图 5、图 6 所示.通过以上各图可以看出:被操作负载质心的位姿误差和机器人各关节驱动力矩的最大幅值主要发生在启动和制动区间上,这表明启动、制动的规律和时间对于协调系统的动力学特性和操作精度有十分重要的影响;在匀速运动期间,由于关节的实际运动与给定的运动规律存在一定差异以及系统的弹性变形引起了一

定的位姿误差和关节驱动力矩,但其幅值较运动过程的最大值要小的多;同时可由图 5、图 6 看出驱动力矩的(绝对)最大值一般都出现在柔性机器人的连架关节(即一、二号柔性机器人的第 1 关节)上,详见表 2.由以上分析可知,采用假设模态法建立柔性机器人协调操作系统的动力学模型可以在保证被操作物体位姿精度的前提下,简化动力学方程的求解难度,提高其求解速度,具有一定的实际意义.

表 2 最大误差和关节驱动力矩

Table 2 Maximum error and driving moment of joints

最大质心位置误差(mm)		最大负载转角误差(rad)	一号机器人各关节最大驱动力矩(N.m)			二号机器人各关节最大驱动力矩(N.m)		
X 方向	Y 方向		第 1 关节	第 2 关节	第 3 关节	第 1 关节	第 2 关节	第 3 关节
16.97	11.81	0.0133	-2.1404	1.4753	-0.3575	-1.6218	0.9595	-0.1643

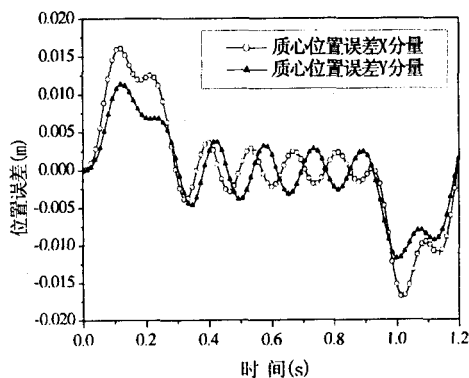


图3 负载质心位置误差

Fig. 3 Position error of payload mass center

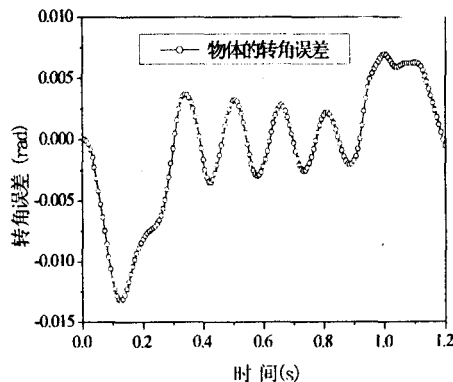


图4 被操作负载转角误差

Fig. 4 Angle error of payload

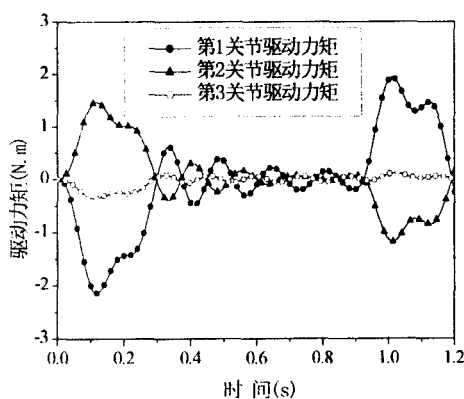


图5 一号机器人各关节驱动力矩

Fig. 5 Joint torques of manipulator No. 1

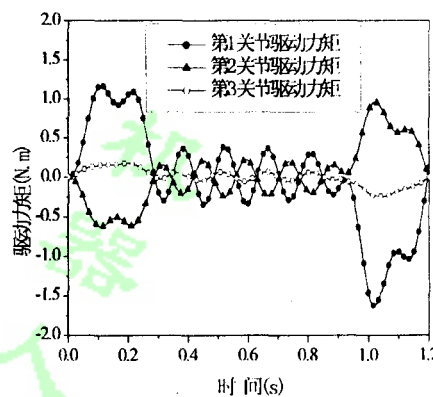


图6 二号机器人各关节驱动力矩

Fig. 6 Joint torques of manipulator No. 2

7 结论(Conclusion)

本文在对柔性机器人协调操作特性分析的基础上,利用假设模态法和 Lagrange 方程,建立了平面两 3R 柔性机器人协调操作刚性负载的动力学模型,并通过仿真算例表明:1) 采用假设模态法和 Lagrange 方程来建立动力学模型,能有效的减少动力学方程的个数,从而降低了动力学方程的复杂程度,提高其运算速度,具有一定的实际意义。2) 机械臂的柔性和目标任务启动、制动的规律和时间对于协调系统的动力学特性和操作精度有十分重要的影响。

参考文献 (References)

- [1] Luh J Y S, Zheng Y F. Constrained relations between two Coordinated industrial robots for motion control. *Int J Robotics Res*, 1987, 6(3): 60-70
- [2] Arimoto S, Miyazaki F, Kawamura S. Cooperative motion control of multiple robot arms or fingers. *Proc IEEE Conf On Robotics and Automation*, Raleigh, NC, 1987, 1407-1412

- [3] Kovivo A J, Unseren M A. Modeling Closed Chain Motion of Two Manipulators Holding A Rigid Object. *Mech Mach. Theory*, 1990, 25(4): 427-438
- [4] Dong Sun, Yunhui Liu. Modeling and Impedance Control of a Two-Manipulator System Handling a Flexible Beam. *ASME J of Dyn Sys Mea, and Con*, 1997, 119: 736-742
- [5] Matsuno F, Hatayama M. Robust cooperative control of two two-link flexible manipulators on the basis of quasi-static equations. *Int Journal of Robotics Research* 1999, 18(4): 414-428
- [6] 窦建武, 余跃庆. 两柔性机器人协调操作的动力学模型及其逆动力学分析. *机器人*, 2000, 22(1): 39-47
- [7] 张成新, 余跃庆. 柔性机器人协调操作的冗余驱动. *机械设计与研究*. 2002, 18(1): 13-16
- [8] De Luca A, Siciliano B. Closed-form Dynamic Model of Planar Multilink Lightweight Robots. *IEEE Trans Sys Man Cybernet*, 1991, SMC-21(4): 826-839

作者简介:

毛立军 (1977-), 男, 湖南人, 硕士. 研究领域: 机器人学.

余跃庆 (1958-), 男, 四川人, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人学, 机构学.