

文章编号: 1002-0446(2000)01-0039-09

两柔性机器人协调操作的动力学模型 及其逆动力学分析*

窦建武 余跃庆

(北京工业大学 北京 100022)

摘要: 柔性机器人动力学是当前机器人研究的热点, 而其协调操作问题目前仍为空白. 本文首次建立了柔性机器人协调操作刚性负载的动力学模型, 利用有限元法和 Lagrange 方程, 在柔性机器人协调操作的运动学和动力学协调约束条件基础上, 推导出系统的动力学方程, 提出了其逆动力学问题的解决方案, 并成功给出了平面两 3R 柔性臂协调操作的数值算例.

关键词: 柔性机器人; 协调操作; 动力学模型

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

1 引言

高速、高精度、大承载和轻量化是未来机器人的发展趋势, 也是现代工业生产中生产率不断提高的必然要求, 在这类机器人中, 机械臂柔性、关节柔性和运动副间隙已经成为影响其运动学性能和动力学性能的重要因素, 柔性机器人动力学是当前机器人领域的热点前沿课题之一.

在柔性机器人动力学方面的研究主要集中在: 建模^[4,5]、动力学方程的数值算法、频域响应特性、正逆动力学的解法^[8]、振动的抑制、优化设计与综合等几个方面, 其研究对象主要是单个柔性机器人, 而在实际应用中, 单个机器人所能完成的作业毕竟十分有限, 对于象抓取不规则形状或太重的负载、抓取有自由度的负载、需要在机器人手中转换几次的复杂作业、抓取非刚性负载等任务, 单个机器人是很难完成的, 上述这些任务均需两或多个机器人之间的协调操作才能完成.

而在机器人协调操作这一研究领域中, 目前主要从机械臂指端和被操作物体间接触的物理解特性角度, 研究了接触约束为完整以及非完整约束时力的封闭性、抓取规划、抓取约束等方面的内容, 接触或连接的具体形式有: 固定、无摩擦、有摩擦(如软手指)、滚动、滑动等^[1]; 从机器人与负载本身的材料特性角度, 主要研究了: (1) 刚性机器人操纵刚性负载的协调操作^[1,6]; (2) 刚性机器人操纵简单的柔性负载的协调操作^[2]; (3) 含弹性关节机器人的协调操作^[3].

由此可以看出, 在以上两个领域的研究中, 均尚未涉及到柔性机器人的协调操作问题. 但从应用及趋势上看, 柔性机器人由于自身刚性差的不足, 必然向多臂协调操作的方向发展, 因此, 开发这一新领域具有重要的理论意义和应用价值.

柔性机器人协调操作系统是一个含柔性机器人内部各杆之间、运动协调约束和动力协调约束之间、柔性机器人和被操作物体之间以及柔性机器人之间高度耦合的复杂动力学系统. 建

* 收稿日期: 1999-04-13

模是全面开展这一新领域研究的首要工作, 本文利用有限元法和 Lagrange 方程建立了柔性机器人协调操作的动力学模型, 探索柔性机器人协调操作区别于刚性机器人协调操作的本质特性, 找出其逆动力学问题解法并通过数值算例进行了平面两 3R 柔性臂机器人协调操作动力学分析.

2 模型建立

刚性机器人协调操作时, 作用于被操作物体上的内力在数学形式上是不定的, 需利用附加约束或优化方法来对其进行分配, 但对柔性机器人而言, 由于抓取内力与柔性机械臂变形之间需满足一定的物理条件, 所以在柔性机器人的刚性名义运动给定时, 它在数学形式上是完备的. 但需指出的是: 柔性机器人协调操作的名义刚性运动可能不满足与之相对应的刚性机器人协调操作的运动协调约束条件. 这是因为柔性机器人系统几何形态的确定, 除了要具备与柔性机器人系统相对应的刚性机器人系统的刚性位形之外, 还应具备由于机械臂弹性而引起的变形量, 只有这两方面信息完全具备了, 才能说柔性机器人系统的几何形态完全确定了. 机械臂的弹性, 一方面打破了柔性机器人的名义刚性协调约束条件, 从而必须建立新的柔性机器人协调约束条件, 另一方面, 又因为机械臂的弹性变形与系统的动力学状态有关, 从而使柔性机器人协调操作系统的运动学分析与动力学分析发生耦合, 这两点正是柔性机器人协调操作区别于刚性机器人协调操作的本质特性.

基于以上认识, 下面建立两平面 3R 柔性机器人共同紧抓同一刚体的动力学模型.

2.1 柔性机器人的名义刚性运动分析

图 1 显示了刚性机器人的目标位姿和柔性机器人的名义刚性位姿在抓持部位之间的关系. 当给定被操作物体的目标运动参数时, 刚性机器人系统的关节位形及运动状态也随之而定. 设被操作物体的质心 s 在系统惯性坐标系下的目标坐标为 $(s_x, s_y)^T$, 目标速度为 $(v_x, v_y)^T$, 目标加速度为 $(a_x, a_y)^T$, 物体目标方位角为 φ , 目标角速度为 ω , 目标角加速度为 ϵ , 通过刚体运动学分析^[6], 易求得两刚性机器人的相对关节角 ${}^i\theta_r$, 相对关节速度 ${}^i\dot{\theta}_r$, 相对关节加速度 ${}^i\ddot{\theta}_r$, 其中, $j=1, 2$, 表示第 j 号机器人, $i=1, 2, 3$, 表示相应机器人的第 i 号关节, r 为刚性机器人记号. 由于柔性机器人的名义刚性运动不一定和与之相应的刚性机器人的运动一致, 所以我们假设在刚性机器人关节位形基础上, 增加一关节位移小量 $\Delta^i\theta_i$ ($j=1, 2, i=1, 2, 3$), 从而柔性机器人的名义刚性运动参数为: ${}^j\theta_i = {}^j\theta_r + \Delta^i\theta_i$, ${}^j\dot{\theta}_i = {}^j\dot{\theta}_r + \Delta^i\dot{\theta}_i$, ${}^j\ddot{\theta}_i = {}^j\ddot{\theta}_r + \Delta^i\ddot{\theta}_i$, ($j=1, 2, i=1, 2, 3$). 如图 1 所示, 它们在抓持点相对于刚性机器人位置的变化量为:

$$\begin{bmatrix} \Delta^j x \\ \Delta^j y \end{bmatrix} = {}^j J^r (\Delta^i\theta_1, \Delta^i\theta_2, \Delta^i\theta_3)^T \quad (1)$$

其中, $j=1, 2, i=1, 2, 3$, ${}^j J^r$ 为第 j 号刚性机器人在相应位形下的 Jacobian 矩阵, (1) 式两端分别对时间求一、二阶导数可得其速度和加速度.

我们把 1 号机器人作为分析时的主机器人, 2 号机器人作为分析时的从机器人, 如图 1, 设由主刚性机器人抓持点指向从刚性机器人抓持点的连接向量为 ${}^1O_4^r O_4^s = (C_x, C_y)^T$, 此向量的模为

$$Lp = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} \quad (2)$$

方位角为 φ (即被操作物体的方位角), 且

$$\operatorname{tg} \varphi_s = \frac{C_x}{C_y} \quad (3)$$

又设由主柔性机器人指向从柔性机器人的名义刚性抓持点的连接向量为:

$${}^1O_4{}^2O_4 = (C_x + \Delta C_x, C_y + \Delta C_y)^T, \text{ 其中} \quad (4)$$

$$\Delta C_x = \Delta^2 x - \Delta^1 x, \Delta C_y = \Delta^2 y - \Delta^1 y$$

此向量的模为 $Lp + \Delta Lp$, 方位角为 $\varphi_s + \Delta \varphi_s$, 其中 $\Delta Lp, \Delta \varphi_s$ 可由对(2), (3)两式的全微分得到:

$$\Delta Lp = \frac{C_x \Delta C_x + C_y \Delta C_y}{C_x^2 + C_y^2} \quad (5)$$

$$\Delta \varphi_s = \frac{\Delta C_x C_y - \Delta C_y C_x}{C_x^2 + C_y^2} \quad (6)$$

如图 1 所示, 刚性机器人在目标位姿下的抓持角分别为 φ_1, φ_2 (逆时针为正, 顺时针为负), 柔性机器人在名义刚性位形下的抓持角分别为: $(\varphi_1 - \epsilon_{\Delta 1})$ 与 $(\varphi_2 + \epsilon_{\Delta 2})$ (考虑到后面推导的方便, 此处 $\epsilon_{\Delta 1}, \epsilon_{\Delta 2}$ 的符号不同), 从而由图 1, 易得:

$$\epsilon_{\Delta 1} = - \left| \sum_{i=1}^3 (\Delta^1 \theta_i) - \Delta \varphi_1^s \right|, \epsilon_{\Delta 2} = \left| \sum_{i=1}^3 (\Delta^2 \theta_i) - \Delta \varphi_2^s \right| \quad (7)$$

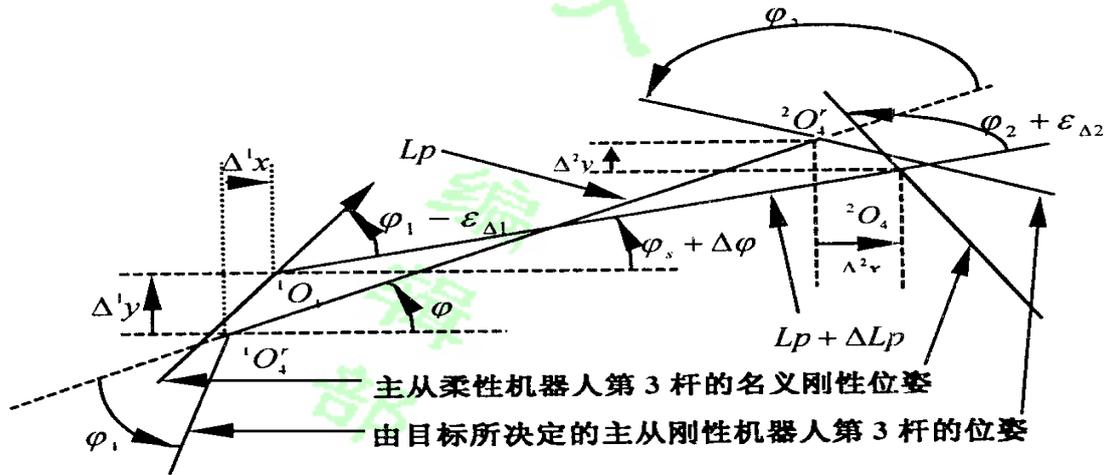


图 1 刚性机器人的目标位姿和柔性机器人的名义刚性位姿

2.2 柔性机器人的有限元模型

对于图 2 中的两 3R 柔性机器人进行单元划分, 将每一个杆作为一个单元, 从而整个系统共有 6 个单元. 以各单元两端的横、纵向弹性位移, 弹性转角以及曲率作为广义坐标, 并对每一单元内的横向弹性位移采用 5 次 Hermite 多项式位移场假设, 纵向弹性位移采用线性位移场假设, 则每个单元的状态可由 8 个广义坐标确定^[7], 利用 Lagrange 方程可求得每一单元在系统惯性坐标系下的单元动力学方程为^[7]:

$$[{}^j m_s] \{\dot{u}_s^{\infty}\} + [{}^j c_s] \{\dot{u}_s^i\} + [{}^j k_s] \{u_s^i\} = \{f_g^j\} + \{f_n^j\} + \{f_w^j\} \quad (8)$$

上式中, $j = 1, 2, s = 1, 2, 3$, 表示第 j 号机器人第 s 单元的各项参数, $[{}^j m_s], [{}^j c_s], [{}^j k_s] \in R^{8 \times 8}$ 分别为单元的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵, $\{u_s^i\}, \{\dot{u}_s^i\}, \{\dot{u}_s^{\infty}\} \in R^{8 \times 1}$ 分别为单元的广义

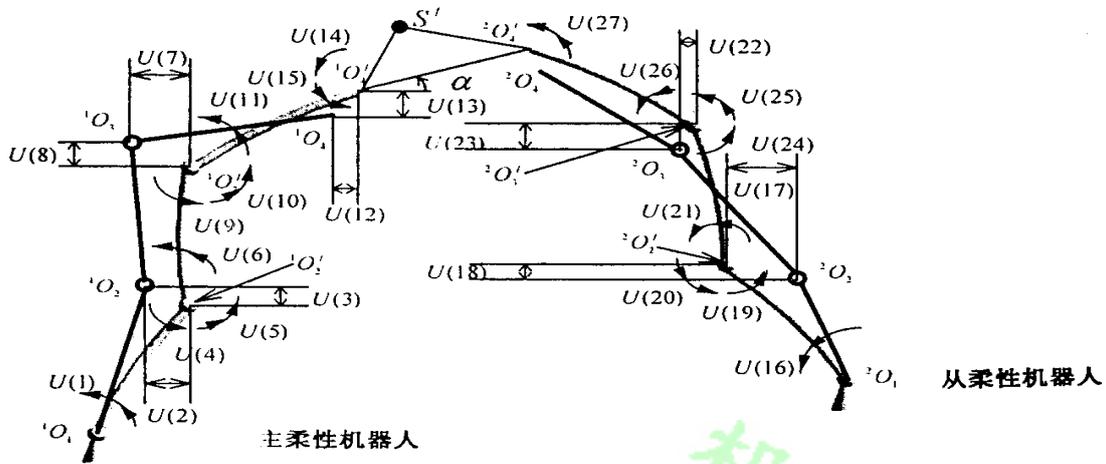


图2 柔性机器人协调操作系统的有限元模型

坐标、广义速度、广义加速度, $\{^i f_{g_s}\} \in R^{8 \times 1}$ 为单元刚性惯性力所对应的广义力, $\{^i f_{n_s}\} \in R^{8 \times 1}$ 为由相邻单元及被操作物体相互作用而产生的广义力, $\{^i f_{w_s}\} \in R^{8 \times 1}$ 为其它外载作用所产生的广义力。

为表示统一, 我们将整个系统的所有单元重新编号。由机架至夹持端, 主机器人编为第1至第3号单元, 从机器人编为第4至第6号单元, 则(8)式成为:

$$[\hat{m}_i]\{\ddot{u}_i\} + [\hat{c}_i]\{\dot{u}_i\} + [\hat{k}_i]\{u_i\} = \{f_{g_i}\} + \{f_{n_i}\} + f_{w_i} \quad (9)$$

其中, $i = 1 \sim 6, \hat{\xi}_i = \begin{cases} {}^1\xi_i & i = 1, \sim 3 \\ {}^2\xi_{i-3} & i = 4 \sim 6 \end{cases}$, ξ 分别为 $m, c, k, u, \dot{u}, \ddot{u}, fg, fn, fw$ 。

2.3 柔性机器人协调操作的运动协调约束条件

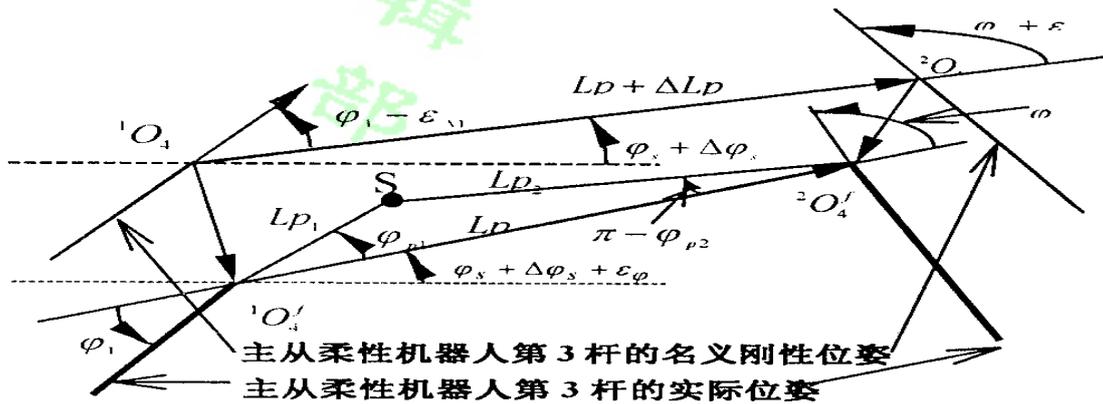


图3 柔性机器人的名义刚性位姿和实际位姿

如图3所示, ${}^1O_4', {}^2O_4'$ 为柔性机器人的实际抓持点(对应于系统变形后的实际位形), ${}^1O_4, {}^2O_4$ 为柔性机器人的名义刚性抓持点(对应于柔性机器人协调操作系统的名义刚性位形)。下面分析两者之间的关系, 导出其运动协调约束条件。

由图3中的几何关系可知, 系统第3号单元末端弹性转角

$$\hat{u}_3(7) = \epsilon_{\varphi} + \epsilon_{\Delta 1} \quad (10)$$

系统第 6 号单元末端弹性转角

$$\hat{u}_6(7) = \epsilon_{\varphi} + \epsilon_{\Delta 2} \quad (11)$$

其中, ϵ_{φ} 为 ${}^1O_4^f O_4^f$ 相对于 ${}^1O_4^2 O_4$ 的转角, $\epsilon_{\Delta 1}, \epsilon_{\Delta 2}$ 可由式 (7) 求得.

由式(10), 式(11)可推得

$$\hat{u}_6(7) = \hat{u}_3(7) - (\epsilon_{\Delta 1} \mathbf{0} \epsilon_{\Delta 2}) \quad (12)$$

$$\epsilon_{\varphi} = \hat{u}_3(7) - \epsilon_{\Delta 1} \quad (13)$$

注意到 2.2 中广义坐标的选取方式, 可知

$${}^1O_4^1 O_4^f = \begin{bmatrix} \hat{u}_3(5) \\ \hat{u}_3(6) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^2O_4^2 O_4^f = \begin{bmatrix} \hat{u}_6(5) \\ \hat{u}_6(6) \end{bmatrix} \quad (15)$$

对于四边形 ${}^1O_4^1 O_4^f O_4^f O_4^2$, 其封闭性条件为

$${}^1O_4^1 O_4^f + {}^1O_4^f O_4^2 = {}^1O_4^2 O_4 + {}^2O_4^2 O_4^f \quad (16)$$

将式(16)在系统坐标系的两个方向投影, 并将式(14), 式(15)代入, 则有

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_3(5) \\ \hat{u}_3(6) \end{bmatrix} + Lp \begin{bmatrix} \cos(\varphi + \epsilon_{\varphi}) \\ \sin(\varphi + \epsilon_{\varphi}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{u}_6(5) \\ \hat{u}_6(6) \end{bmatrix} + (Lp + \Delta Lp) \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) \\ \sin(\vartheta) \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中, $\vartheta = \varphi + \Delta\vartheta$. 将式 (17) 左端第二项在 φ 点按 *Talor* 级数展开且取一阶近似, 经整理后得

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_6(5) \\ \hat{u}_6(6) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{u}_3(5) - \sin(\vartheta) \epsilon_{\varphi} Lp - \Delta Lp \cos(\vartheta) \\ \hat{u}_3(6) + \cos(\vartheta) \epsilon_{\varphi} Lp - \Delta Lp \sin(\vartheta) \end{bmatrix} \quad (18)$$

上述式(12)和式(18)即为柔性机器人协调操作的运动协调约束条件.

2.4 被操作物体动力学方程与柔性机器人协调操作的动力协调约束条件

设被操作物体质心 S 在系统惯性坐标系下的实际坐标为 $(S_x^f, S_y^f)^T$, 方位角为 α , 如图 2 所示

$$\begin{bmatrix} S_x^f \\ S_y^f \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{104} + \hat{u}_3(5) + Lp_1 \cos(\varphi + \epsilon_{\varphi} + \varphi_{p1}) \\ Y_{104} + \hat{u}_3(6) + Lp_1 \sin(\varphi + \epsilon_{\varphi} + \varphi_{p1}) \\ \varphi + \epsilon_{\varphi} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式(19)中 $(X_{104}, y_{104})^T$ 为主柔性机器人第 3 单元末端点 1O_4 在系统惯性坐标系下的坐标, Lp_1 为被操作物体质心实际位置到主机器人实际夹持点的距离, φ_{p1} 为常数是 Lp_1 与 ${}^1O_4^f O_4^f$ 间的夹角.

式(19)左右两边分别对时间求一阶及二阶导数, 并注意到 ϵ_{φ} 的值相对于 (φ, φ_{p1}) 的变化来说是小量, 可得

$$\begin{bmatrix} \overset{\circ\circ}{S}_x^f \\ \overset{\circ\circ}{S}_y^f \\ \overset{\circ\circ}{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overset{\circ\circ}{X}_{104} + \overset{\circ\circ}{\hat{u}}_3(5) - Lp_1 \cos(\varphi + \varphi_{p1})(\overset{\circ}{\varphi} + \overset{\circ}{\epsilon}_{\varphi})^2 - Lp_1 \sin(\varphi + \varphi_{p1})(\overset{\circ}{\varphi} + \overset{\circ}{\epsilon}_{\varphi}) \\ \overset{\circ\circ}{Y}_{104} + \overset{\circ\circ}{\hat{u}}_3(6) - Lp_1 \sin(\varphi + \varphi_{p1})(\overset{\circ}{\varphi} + \overset{\circ}{\epsilon}_{\varphi})^2 + Lp_1 \cos(\varphi + \varphi_{p1})(\overset{\circ}{\varphi} + \overset{\circ}{\epsilon}_{\varphi}) \\ \overset{\circ\circ}{\varphi} + \overset{\circ\circ}{\epsilon}_{\varphi} \end{bmatrix} \quad (20)$$

设被操作物体的质量为 m_s , 相对于质心的转动惯量为 I_s , 利用 Newton-Euler 方程, 可求得被操作物体的动力学方程为

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 \\ 0 & m_s & 0 \\ 0 & 0 & I_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overset{\circ\circ}{S}_x^f \\ \overset{\circ\circ}{S}_y^f \\ \overset{\circ\circ}{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum F_{rx} \\ \sum F_{ry} \\ \sum M_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum F_{wx} \\ \sum F_{wy} \\ \sum M_w \end{bmatrix} \quad (21)$$

上式中的 $\overset{\circ\circ}{S}_x^f, \overset{\circ\circ}{S}_y^f, \overset{\circ\circ}{\alpha}$ 可参见(20)式, $\sum F_{wx}, \sum F_{wy}, \sum M_w$ 为其它外力作用于被操作物体的合外力和合外力矩, $\sum F_{rx}, \sum F_{ry}, \sum M_r$ 为机器人对被操作物体的夹持合力与夹持合力矩, 且有

$$\sum F_{rx} = -f\hat{n}_3(5) - f\hat{n}_6(5) \quad (22)$$

$$\sum F_{ry} = -f\hat{n}_3(6) - f\hat{n}_6(6) \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \sum M_r = & -f\hat{n}_3(7) - f\hat{n}_6(7) + \left| \begin{array}{c} -f\hat{n}_3(5) \\ -f\hat{n}_3(6) \end{array} \right|^T \left| \begin{array}{c} \sin(\varphi + \varphi_{p1}) \\ -\cos(\varphi + \varphi_{p1}) \end{array} \right| L p_1 \\ & + \left| \begin{array}{c} -f\hat{n}_6(5) \\ -f\hat{n}_6(6) \end{array} \right|^T \left| \begin{array}{c} \sin(\varphi + \varphi_{p2}) \\ -\cos(\varphi + \varphi_{p2}) \end{array} \right| L p_2 \end{aligned} \quad (24)$$

(21)~(24)即为柔性机器人协调操作的动力协调约束条件.

2.5 约束条件与系统动力学方程的建立

(9)式与(21)式共有 51 个方程, 48 个广义坐标, 它们之间不是独立的, 还要受到单元间的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, 为了缩减广义坐标的数量, 消去单元之间相互作用的内力, 我们需要将这些约束代入到上面 51 个方程中, 并重新定义系统广义坐标, 加以整理, 得到系统动力学方程.

考虑到单元节点处的运动连接约束条件和系统的运动协调约束条件, 设立如图 2 的 27 个系统广义坐标 $\{U\}_{27 \times 1}$, 并把单元广义坐标转换为相应的系统广义坐标, 再将系统的运动协调约束条件(12), (18)及动力协调约束条件(21)~(24)代入式(9), 经整理合并, 我们就得到了一个不显含内力, 在数学上完备的柔性机器人协调操作系统的动力学方程

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{Fw\} + \{Fg\} \quad (25)$$

(25)中的 $[M], [C], [K] \in R^{27 \times 27}$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵且均为非对称矩阵; $\{\ddot{U}\}, \{\dot{U}\}, \{U\} \in R^{27 \times 1}$ 分别为系统的广义加速度、广义速度、广义坐标向量. $\{Fw\} \in R^{27 \times 1}$ 为与外加负载有关的系统广义力向量, $\{Fg\} \in R^{27 \times 1}$ 为与系统名义刚性惯性参数有关的广义力向量.

3 逆动力学分析

逆动力学所要解决的问题是: 已知被操作物体的目标位姿(轨迹), 求跟踪此轨迹所需的驱动力(或力矩), 对于柔性机器人协调操作而言, 解决此问题的方法步骤如图 4 所示, 具体细节参见 2.1~2.5.

图 4 中的校正输入量对应于 2.1 中的 $\Delta'\theta_i$, 它既可作为离线开环主控校正输入, 也可作为在线闭环反馈校正输入, 在一般的分析问题中可令其为 0.

4 数值仿真

这里以两平面 3R 柔性机器人操纵一个刚性物体, 在规定的时间内完成预定(质心)轨迹

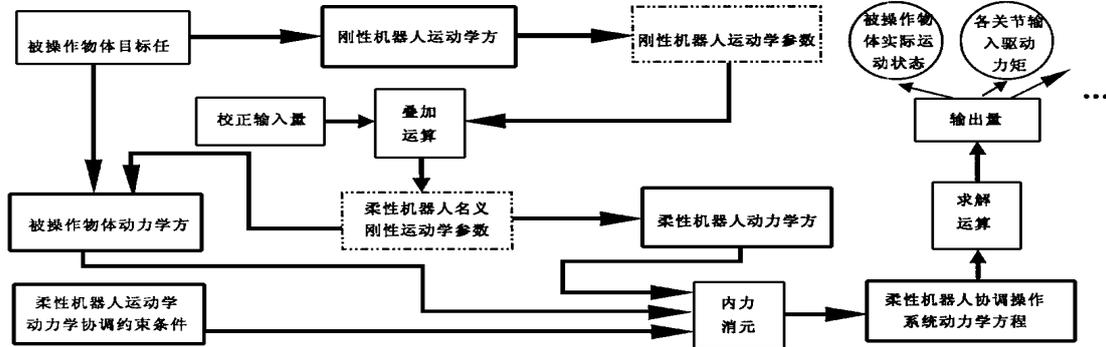


图 4 柔性机器人协调操作的逆动力学算法流程图

运动及方位转动的任务为例, 来说明本方法的正确性与有效性. 柔性机器人系统参数、被操作物体参数、目标任务参数分别见表 1、2、3.

表 1 柔性机器人系统参数(单位: m, kg/m³, N/m², rad)

	基座位置坐标	第 1 杆杆长 L ₁	第 2 杆杆长 L ₂	第 3 杆杆长 L ₃	材料	密度 ρ	弹性模量 E	弹性模量 G	截面形状	截面长度 a	截面宽度 b	Rayleigh 阻尼系数 α ₁	Rayleigh 阻尼系数 α ₂	抓持角 φ
主柔性机器人	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	1.5	1.5	0.45	铝	2710	6.77×10^{10}	2.60×10^{10}	矩形	0.01	0.01	0.03	0	
从柔性机器人	$\begin{bmatrix} 3 \\ 0 \end{bmatrix}$	1.5	1.5	0.45	铝	2710	6.77×10^{10}	2.60×10^{10}	矩形	0.01	0.01	0.03	π	

表 2 被操作物体参数(单位: m, kg·m², kg, rad)

质量 m _s	对质心的转动惯量 I _s	L _p	L _{p1}	L _{p2}	φ ₁	φ ₂
0.25	0.1	0.2	0.2	0.2	π/3	2π/3

表 3 目标任务参数(单位: m, s, rad, 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	终止方位角	总操作时间 T _s	起动耗时 T _q	制动耗时 T _z
$y = 0.5 + 0.5x$	$\begin{bmatrix} 2.0 \\ 1.5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.1 \\ 1.05 \end{bmatrix}$	π/2	$-\frac{2\pi}{3}$ (顺时针)	4	0.4	0.4
起动脉线(角)速度规律 $0 < t < T_q$			匀速线(角)速度运动规律 $T_q < t < T_s - T_z$		制动线(角)速度规律 $T_s - T_z < t < T_s$		
$v = \frac{[\cos(t/T_q \pi + \pi) + 1]}{2} V_c$			$v = V_c$		$v = \frac{\cos\{[t - (T_s - T_z)] \pi / T_z\} + 1}{2} V_c$		

注: 可由目标任务的其它参数唯一确定.

通过分析得到质心的运动误差和转角误差随时间的变化规律如图 5 所示, 各关节的驱动力矩随时间的变化规律如图 6 所示. 由图 5, 图 6 的结果可看出, 质心运动过程中 y 方向最大误差达 15mm, x 方向最大误差达 5mm, 转角最大误差达 0.015rad, 这说明机械臂的柔性变形对于多机器人协调操作精度有十分重要的影响; 同时, 从以上两图又可看出, 在起动和制动区间, 误差和驱动力矩的振动最剧烈和幅值最大, 因此, 选择适当的起动和制动规律及耗时对于改善柔性机器人协调操作系统的性能、提高精度也是非常重要的.

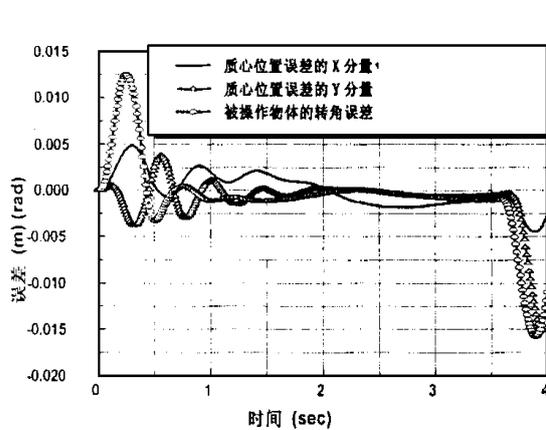


图5 被操作物体质心位置及转角误差

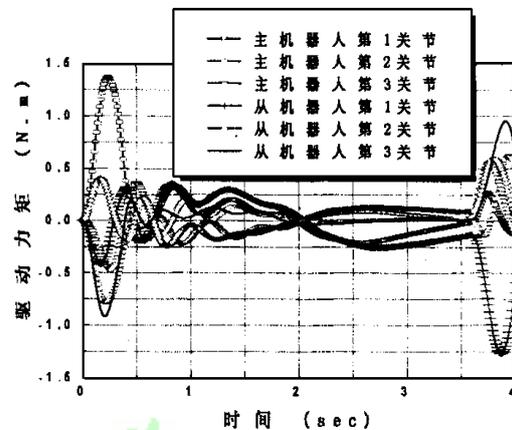


图6 各关节驱动力矩

5 结论

本文利用有限元法和 Lagrange 方程, 首次建立了两 3R 柔性机器人协调操作刚性负载的动力学模型, 并指出了柔性机器人协调操作区别与刚性机器人协调操作的两点本质特性: 1) 柔性机器人协调操作的名义刚性位形不一定满足相应的刚性机器人协调操作的协调约束条件; 2) 柔性机器人协调操作的运动学分析和动力学分析之间存在相互耦合. 而后, 利用本文提出的柔性机器人协调操作的逆动力学求解方法, 通过数值仿真分析, 说明了机械臂的柔性变形对于多机器人协调操作精度有十分重要的影响. 在柔性机器人协调操作动力学模型基础之上, 采取何种控制规划策略来提高多柔性机器人协调操作的精度将是以后研究的重要方向.

参 考 文 献

- 1 Richard M, Murray, Zexiang Li, S Shankar Sastry. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation CRC Press, Inc. 2000 Corporate Blvd, N W, Boca Ration, Florida 33431, USA. 1994
- 2 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- 762
- 3 Krzyszof P, Jankowski, Hoda A EIM araghy, Waguih H EIM araghy. Dynam ic Coordination of Mutiple Robot Arms With Flexible Joints. Int J Robotics Research, 1993, 12(6): 505- 528
- 4 Yue Shigang, Yu Yueqing, Bai Shixian. Flexible Robot Beam Element for the Manipulators with Joint and Link Flexibility. Mech Mach Theory, 1997, 32(2): 209- 219
- 5 Surdilovic D, Vukobratovic M. On Method for Efficient Dynam ic Modeling of Flexible Manipulators. Mech Mach Theory, 1996, 31(3): 297- 315
- 6 熊有伦. 机器人学机械工业出版社. 1993, 10
- 7 张策等. 弹性连杆机构的分析与综合. 机械工业出版社, 1997, 6
- 8 郭吉丰. 空间柔性机器人的正逆动力学模型. 机械工程学报, 1996, 32(4): 29- 36

ON THE DYNAMIC MODELING OF TWO FLEXIBLE MANIPULATOR COOPERATION AND ITS INVERSE DYNAMIC ANALYSIS

DOU Jian-wu YU Yue-qing

(Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

Abstract: The flexible manipulator dynamics is a topic of general interest in robotics, but the study on its cooperation is still in vacuum at present. Based on the kinematic and dynamic coordinated constraints, the dynamic model of flexible manipulator cooperation is obtained for the first time by using Finite Element Method and Lagrange Equation. The algorithm of its inverse dynamic problem is proposed and a numerical example of two planar 3-R flexible robots manipulating a rigid load is illustrated successfully.

Keywords: Flexible manipulator; cooperation; dynamic model

作者简介:

窦建武 (1973-), 男, 博士生. 研究领域: 柔性机器人, 多机器人协调控制.

余跃庆 (1958-), 男, 博士生导师. 研究领域: 柔性机器人, 机构动力学.

编辑部