

冗余度柔性杆机械臂自运动规划减振[†]

岳士岗 白师贤

(北京工业大学机械工程与应用电子学院, 北京, 100022)

摘要 提出了利用冗余度来减轻柔性杆机器人臂运动过程中的末端振动变形新方法, 通过寻优确定机器人臂最佳的自身运动, 使机器人臂末端在沿着预定轨迹运动的同时, 具有最小的振动变形. 平面三柔性杆机械臂动力学数值模拟显示了该方法的有效性.

关键词 机器人臂, 自身运动, 预定运动轨迹, 优化, 柔性变形

分类号 TH112.5, TP242

0 引言

柔性杆机器人臂运动中, 其末端因为柔性振动变形而不能精确追踪预定轨迹, 因此, 如何尽量减小或消除柔性杆机器人臂运动过程中的柔性振动变形, 已成为柔性机器人臂研究的重要课题. 文献[1]对两杆柔性机器人臂的振动控制作了分析和实验研究, 并对开环的输入脉冲规划法^[2]、闭环控制以及开闭环兼有的复合控制法的效果进行了比较.

冗余度柔性杆机器人臂是将冗余度机器人^[3]和柔性机械臂的研究成果相结合的新研究领域, 引起了研究者的兴趣^[4~6]. 冗余度的引入为解决柔性机械臂的振动变形问题提供了新的有力工具. Nguyen和Walker^[5]设计了一种闭环控制算法, 使具有一个柔性自由度的柔性杆机器人臂能利用自身运动使柔性变形振动因阻尼而不断衰减, 这种闭环控制方法是在冗余度数大于或等于柔性自由度数的情况下才能实施, 而且局限于一个柔性自由度, 使其应用受到很大限制.

对于具有多柔性杆的冗余度机器人臂进行开环控制, 以解决机械臂运动中的振动变形的问题还缺乏深入研究. 事实上, 这一开环控制方法常常在人们自身活动中有所体会. 最简单的例子是用手握住一根软的弹性棒挥动, 通过几次改变不同姿势的尝试, 一般都可发现使弹性棒发生较大或较小变形的动作, 这就是一种构造手臂关节运动而进行的开环控制.

本文针对这种情况, 研究了如何在保持机器人臂末端名义运动按预定轨迹运动的情况下, 通过优化来选择最佳的自身运动, 以使这一最佳自运动下的柔性机器人臂运动过程中的振动变形最小, 这一开环控制方法对于冗余度数和柔性自由度数两者间的关系没有任何要求, 柔性机器人臂的柔性自由度可由所采用的动力学模型来确定.

本文仅考虑杆件的柔性而未涉及关节处的柔性因素.

收稿日期: 1997-03-11

[†] 国家教委和北京市科委及博士启动基金资助项目

1 动力学模型

为建立柔性杆件机器人臂的动力学控制方程, 本文采用文献 [6, 7] 中的方法, 首先将机械臂划分为若干个单元, 并导出单元的动力学微分方程, 机械臂系统的整体动力学微分方程及其逆动力学方程可由各个单元的动力学微分方程装配并整理得到:

$$[M]\{\ddot{\Phi}\} + [C]\{\dot{\Phi}\} + [K]\{\Phi\} = \{P\} \quad (1)$$

$$\{\tau\} = ([D] + [J_z])\{\ddot{q}\} + \{H\} + \{E\} \quad (2)$$

以上两式中, $[M]$ 为 $nu \times nu$ 阶质量矩阵, $[C]$ 为 $nu \times nu$ 阶阻尼矩阵, $[K]$ 为 $nu \times nu$ 阶刚度矩阵, $\{P\}$ 为 $nu \times 1$ 阶惯性力列阵, $\{\ddot{\Phi}\}$, $\{\dot{\Phi}\}$ 和 $\{\Phi\}$ 为描述杆件变形的 $nu \times 1$ 阶广义坐标加速度列阵、速度列阵和位移列阵, nu 为描述杆件变形的广义坐标数目, $[D]$ 为描述关节变形的 $n \times n$ 阶惯性质量矩阵, $[K_z]$ 为 $n \times n$ 阶关节刚度矩阵, $\{q\}$ 和 $\{\ddot{q}\}$ 为描述转子转动位移的 $n \times 1$ 阶坐标列阵和加速度列阵, $\{H\}$ 为 $n \times 1$ 阶离心力、刚柔耦合及重力项列阵, $\{E\}$ 为 $n \times 1$ 阶杆件柔性耦合项列阵, $[J_z]$ 为 $n \times n$ 阶转子惯性质量矩阵, $\{\tau\}$ 为 $n \times 1$ 阶驱动力列阵, n 为机器人臂系统的关节数, 其中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 和 $\{P\}$ 皆为 $\{q\}$ 、 $\{\dot{q}\}$ 和 $\{\ddot{q}\}$ 的函数。

通过求解 (1)、(2) 式可得到机械臂在运动过程中的振动变形和驱动力矩的数值大小。

2 柔性机器人臂自运动

冗余度刚性机器人臂的末端是关节运动的函数, 对柔性冗余度机器人臂来说, 其末端位置不仅是关节运动的函数, 而且还与系统的柔性变形有关^[7, 8], 即有

$$\{x\} = f(q, \theta_f) \quad (3)$$

式中, $\{\theta_f\} \in R^l$, 为描述柔性变形的广义坐标, l 为其广义坐标数. 对 (3) 式求导可得

$$\{\dot{x}\} = [J_r]\{\dot{q}\} + [J_f]\{\dot{\theta}_f\} \quad (4)$$

式中 $[J_r] = \frac{\partial f(q, \theta_f)}{\partial q}$ 为刚性雅可比矩阵, $[J_f] = \frac{\partial f(q, \theta_f)}{\partial \theta_f}$ 为柔性雅可比矩阵. 由

(4) 式得

$$\{\dot{q}\} = [J_r^+](\{\dot{x}\} - [J_f]\{\dot{\theta}_f\}) + ([I] - [J_r^+][J_r])\{\dot{\varepsilon}\} \quad (5)$$

式中 $[J_r^+] \in R^{n \times m}$ 是冗余度机器人臂刚性雅可比矩阵的伪逆, 也称为广义逆, $[I] \in R^{n \times n}$ 是单位矩阵, $([I] - [J_r^+][J_r])$ 是零空间的映射矩阵, 而 $\{\dot{\varepsilon}\} \in R^n$ 是任意量. $([I] - [J_r^+][J_r])\{\dot{\varepsilon}\} \in N(J)$ 是正交于 $[J_r^+]\{\dot{x}\}$ 的齐次解, 齐次解指的是机器人臂连杆间的自身运动, 不引起末端的运动。

如果 $[J_r]$ 的秩等于 m , 则 $[J_r^+]$ 可由下式给出

$$[J_r^+] = [J_r]^T([J_r][J_r]^T)^{-1} \quad (6)$$

对 (4) 式求导得

$$\{\ddot{x}\} = [J_r]\{\ddot{q}\} + [\dot{J}_r]\{\dot{q}\} + [J_f]\{\ddot{\theta}_f\} + [\dot{J}_f]\{\dot{\theta}_f\} \quad (7)$$

从而, 由 (7) 式得

$$\{\ddot{q}\} = [J_r^+](\{\ddot{x}\} - [\dot{J}_r]\{\dot{q}\} - [J_f]\{\ddot{\theta}_f\} - [\dot{J}_f]\{\dot{\theta}_f\}) + ([I] - [J_r^+][J_r])\{\ddot{\varepsilon}\} \quad (8)$$

对于冗余度刚性机器人臂, 则有下列结果^[3].

$$\{\ddot{q}\} = [J^+](\{\ddot{x}\} - [J]\{\dot{q}\}) + ([I] - [J^+][J])\{\ddot{\varepsilon}\} \quad (9)$$

观察(8)、(9)式, (8)式中有关柔性变形的项使规划所得的冗余度柔性机器人臂关节运动能够对柔性变形进行补偿, 从而保证机器人臂的末端精确追踪预定轨迹. 为此, 不妨将有关的柔性项($-[J_f]\{\ddot{\theta}_f\} - [J_f]\{\dot{\theta}_f\}$)称之为机器人臂的柔变补偿项.

柔变补偿项虽然能对变形予以补偿以使末端精确追踪预定轨迹, 但我们注意到由于其中包含柔性加速度项, 会使规划所得的关节名义角加速度很不平稳, 在实际控制时较难实施, 同时不可避免地带来系统输入的剧烈波动, 从而加剧机器人臂的振动, 所以考虑到动力学系统和优化的稳定性, 在以下的研究中将不考虑柔变补偿项. 以后面的数值模拟中我们将会看到, 采用本文方法规划运动, 机器人臂的末端变形已大为减轻, 精确补偿已无必要.

在这种情况下, 精确追踪末端预定轨迹的柔变补偿项可以简化略去, 则(8)式成为

$$\{\ddot{q}\} = [J_r^+](\{\ddot{x}\} - [J_r]\{\dot{q}\}) + ([I] - [J_r^+][J_r])\{\ddot{\varepsilon}\} \quad (10)$$

如前所述, (10)式右端第二项($[I] - [J_r^+][J_r]$) $\{\ddot{\varepsilon}\}$ 描述机器人臂连杆间的自运动, 不引起末端的运动.

在 t 时刻, (10)式求出 $\{\ddot{q}\}$ 后, 由 $\{\ddot{q}\}$ 数值积分可计算出 $t + \Delta t$ 时刻的 $\{\tilde{q}\}$, 假定对应于 $\{\tilde{q}\}$ 的末端速度是 $\{\tilde{x}\}$, 由于数值计算的误差, 显然 $\{\tilde{x}\}$ 与预定的末端速度 $\{\dot{x}\}$ 是有差别的, 为避免数值计算引起的误差积累, 对 $\{\tilde{q}\}$ 要按下式进行修正^[9]

$$\{\dot{q}\} = \{\tilde{q}\} + [J_r^+](\{\dot{x}\} - \{\tilde{x}\}) \quad (11)$$

由(11)式计算出 $\{\dot{q}\}$, 再由数值积分可得角位移 $\{q\}$.

作为比较, 如果不考虑机器人臂的自身运动, 则 $\{\ddot{q}\}$ 可由下式求得

$$\{\ddot{q}\} = [J_r^+](\{\ddot{x}\} - [J_r]\{\dot{q}\}) \quad (12)$$

3 优化方法表述

对于末端沿着预定轨迹运动的柔性杆机器人臂, 在运动过程中的每一离散时刻, 都以末端变形最小为目标, 以表征机器人臂连杆间自身运动的齐次解中的任意矢量 $\{\ddot{\varepsilon}\}$ 为变量, 寻求最优的机器人臂连杆间的自身运动. 如此进行下去可得到的机器人臂各关节的一系列最优运动, 直至运动结束. 这样所得的机器人臂关节运动将使柔性机器人臂在完成末端运动任务的同时, 保持最小的末端柔性变形. 由于这一方法并未对机器人臂的柔性变形自由度提出要求, 所以, 从理论上可以认为该方法适用于具有任意数目柔性变形自由度的机器人臂.

若将其中任意时刻的优化问题表达为数学形式, 则有

$$\text{Min } f(\ddot{\varepsilon}_i) \quad (13)$$

$$\text{Sub } \{\ddot{\varepsilon}_i\}_l \leq \{\ddot{\varepsilon}_i\} \leq \{\ddot{\varepsilon}_i\}_u \quad (14)$$

式中 $f(\ddot{\varepsilon}_i)$ 为柔性机器人臂的末端变形, $\{\ddot{\varepsilon}_i\}_u$ 和 $\{\ddot{\varepsilon}_i\}_l$ 为任意矢量的上界和下界.

优化计算流程图如图1所示. 图中虚框内为某一时刻 t 的优化过程, 当满足所要求精度之后, 优化程序自动输出结果及相关参数并转入下一时刻的连杆间自运动优化过程中, 如此不断进行, 直到机器人臂预定轨迹运动结束. 由于在离散化的每一时刻都要寻求最优值, 因此该方法的计算量较大.

所采用的优化软件包为 OPB-1 中的约束变尺度法^[10]. 本文在具体使用过程中, 对输入输出接口作了适应性修改.

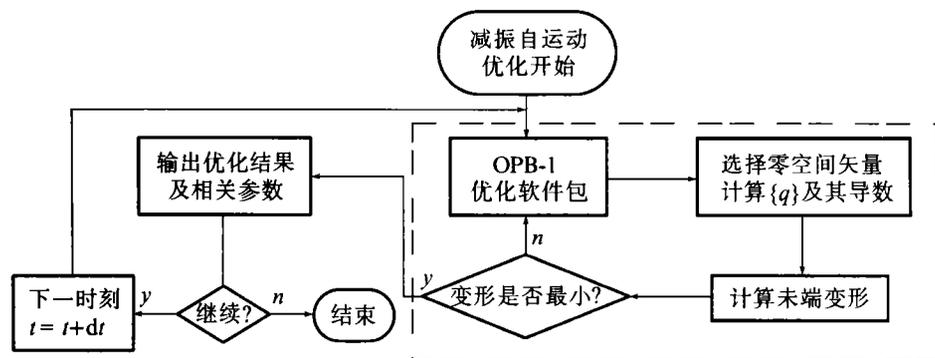


图1 自运动规划减振流程图

4 数值模拟及讨论

本文用平面三杆冗余度柔性杆机器人臂来验证上面所提出方法的有效性. 作为平面位置冗余的例子, 该机器人臂具有一个冗余度. 其参数为: 各杆长均为250 mm, 杆高均为5 mm, 杆宽均为4 mm, 材料为铝, 弹性模量为 71.0×10^9 Pa, 剪切模量为 26.0×10^9 Pa, 密度为 2.71×10^3 kg / m³, 假设各杆两端集中质量均为40 g, 末端集中质量为20 g, 第1、2和3关节处集中质量的转动惯量分别为 15×10^{-6} kg · m², 10×10^{-6} kg · m²和 5×10^{-6} kg · m², 未考虑关节柔性. 每杆1个单元, 共设置11个广义坐标.

机器人臂在水平面内运动, 因此与重力有关的项可以略去. 机器人臂末端在1 s内完成自起始点至终止点间的直线运动, 具体运动规律如下:

$$x = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \tag{15}$$

$$y = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \tag{16}$$

式中, $a_i (i = 0, \dots, 3)$ 和 $b_i (i = 0, \dots, 3)$ 为待定系数, 由机器人臂运动初始和终止时刻的条件决定. 假设机器人臂末端在运动初始时刻和终止时刻的速度都为零. 任意矢量 $\{\ddot{\epsilon}\}$ 元素的取值范围在模拟中设为 $[-1, 1]$, 各个时刻优化问题自变量初值都为零, 优化算法收敛精度 Acc 为0.01, 差分步长因子 T 为0.01.

数值模拟结果见以下各图. 图中实线为优化所得的结果, 虚线为按(12)式所求得的结果. 图2和图3为机器人臂末端的柔性变形比较. 结果表明, 利用优化冗余度机器人臂自身运动产生的各关节运动大大减轻了运动过程中机器人臂末端的柔性变形. 特别是整体固

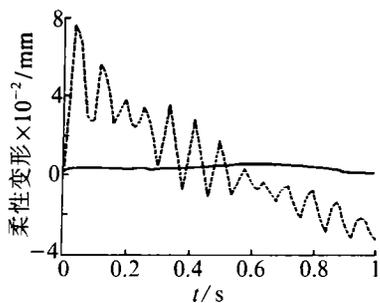


图2 冗余度柔性杆机器人臂末端变形(X)

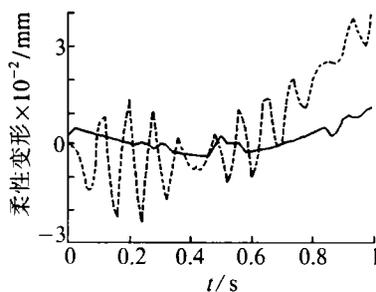


图3 冗余度柔性杆机器人臂末端变形(Y)

定坐标系 X 轴方向的柔性变形 (图 2), 与伪逆求得的关节运动下的柔性变形相比, 优化结果使之减小了大约 94%, 效果令人非常满意. 这一结果是在 1 个冗余自由度对 11 个柔性自由度 (例中机器人臂设置了 11 个广义坐标描述柔性变形) 的情况下获得的, 而对闭环控制来说, 多柔性自由度控制是非常困难的, 从这个角度来看, 开环控制在多柔性自由度机械臂上具有非常好的研究前景.

图 4~图 6 为各关节运动名义角加速度曲线比较. 注意到优化得到的角加速度曲线, 与按 (12) 式所求得的名义角加速度曲线在趋势上有明显区别. 另外, 优化的曲线上还有若干尖峰, 类似于文献 [2] 中所述的脉冲. 这可能是有助于消减柔性变形的“有益脉冲”.

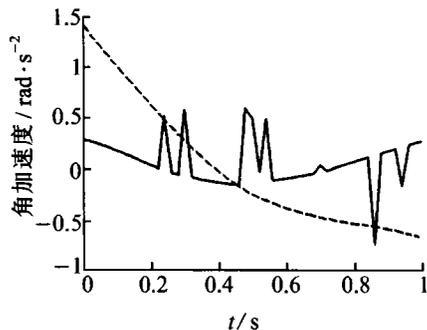


图4 第一关节名义角加速度

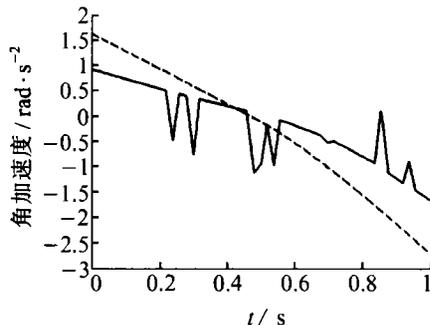


图5 第二关节名义角加速度

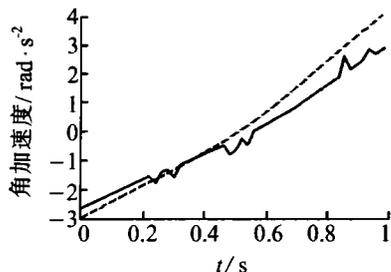


图6 第三关节名义角加速度

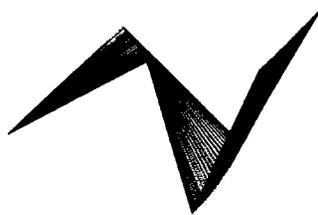


图7 机器人臂位形比较

虽然以上规划是在加速度水平上求得的, 由于各个时刻相应的关节角速度也可以同时按 (11) 式得出, 所以比较易于在具体实践中实施. 图 7 还作出优化和 (12) 式所求得的机器人臂在整个运动过程中的名义位形. 两者之间的区别是明显的, 除开始位置以外, 几乎各个杆件的各个位置都不重合, 特别是图中优化所得的机器人臂第一杆的运动范围显著增大.

5 结论

针对柔性杆件机器人臂运动过程中柔性变形将引起末端偏离预定轨迹. 本文提出了一种利用冗余度机器人臂的自身运动来消减冗余度柔性机器人臂运动过程中的柔性变形的新方法. 这一开环控制方法通过对运动过程中的机器人臂的各关节自运动进行优化, 在保证机器人臂末端按预定轨迹运动的前提下, 获得使机器人臂柔性变形幅度最小的各关节运动. 对于冗余度柔性杆机器人臂进行数值模拟获得了令人满意的结果, 充分证明了这一方

法的有效性. 这一方法可以推广应用于具有任意柔性自由度的机器人臂系统中.

参 考 文 献

- 1 Hillsley K L, Yurkovich S. Vibration Control of A Two-link Flexible Robot Arm. Proceedings of The IEEE Int Conf on Robotics and Automation. 1991. 2121~2126
- 2 Singer N C, Seering W P. Using Scausal Shaping Techniques to Reduce Robot Vibration. Proceeding of IEEE Conf on Robotics and Automation. 1988. 1434~1439
- 3 Nenchev D N. Redundancy Resolution Through Local Optimization: A Review. Journal of Robotic Systems, 1989, 6(6): 769~798
- 4 Barbieri E, Wang Qingyou. An example of Optimal Set-point Relegation for Self-motion Control in Redundant Flexible Robots. Proceeding of IEEE Conf on Robotics and Automation. 1990. 632~637
- 5 Nguyen L A, Walker I D, Defigueiredo R J P. Dynamic Control of Flexible Kinematicaly Redundant Robot Manipulators. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(6): 759~767
- 6 岳士岗. 冗余度柔性机器人动力学研究: [学位论文]. 北京工业大学基础科学部, 1995
- 7 Cleghorn W L, Fenton R G, Tabarrk, Finite Element Analysis of High-speed Flexible Mechanisms. Mechanisms and Machine Theory, 1981, 16(4): 407-424
- 8 Xi F, Fenton R G. On Flexible Link Manipulators: Modeling and Analysis Using The Algebra of Rotations. Robotica, 1994, 12: 371~381.
- 9 Kazerounian K, Nedungadi A. An Alternative Method for Minimization of The Driving Forces in Redundant Manipulators. Proceedings of IEEE Conf. on Robotics and Automation. 1987. 1701~1706
- 10 余俊, 周济. 优化方法程序库 OPB-1 原理及使用说明. 北京: 机械工业出版社, 1989

Vibration Reduction of Flexible Link Redundant Robot Manipulators by Self-motion Planning

Yue Shigang Bai Shixian

(School of Mechanical and Applied Electronics Engineering,
Beijing Polytechnic University, Beijing, 100022)

Abstract A new method is presented and it uses redundancy to reduce the endpoint vibration of a flexible robot arm. The suitable self-motion with minimum endpoint vibration deformation is determined, through optimization while tracing prescribe trajectory. The dynamic simulation of a three flexible links robot manipulator shows the effectiveness of the method.

Keywords robot manipulator, self-motion, prescribed trajectory, optimization, vibration deformation