

一种柔性前臂机械手控制算法*

徐建闽 朱蓓蓓 周其节

(华南理工大学自动控制工程系·广州, 510641)

摘要: 本文研究柔性机器人的轨迹跟踪控制问题. 通过坐标变换导出以可测关节角为变量的柔性机器人的动态模型, 在 Deluca 等人^[1]提出的 CTJ 控制算法基础上提出一种改进的计算力矩控制算法 ICTJ, 并从理论上证明了新算法的收敛性. 仿真结果表明 ICTJ 算法比 CTJ 算法在跟踪精度上有明显的改善.

关键词: 柔性机器人; 轨迹跟踪; 计算力矩

1 引言

柔性机器人因其高速, 低耗, 质轻, 灵便等特点, 在工业、国防等应用领域中占有十分重要的地位. 因此, 近年来对柔性机器人的研究已受到广泛的关注并取得了不少成果. 如关于柔性关节机器人的动力学建模与控制问题, Spong^[2], 周其节和徐建闽^[3]已分别进行了综述. 而对柔性连杆机器人, 绝大多数都是利用 Lagrange 方程^[4]或利用 Hamilton 原理建模. 柔性连杆机器人的控制问题, 一直是个更具挑战性的课题, 根据机器人既定任务和预期性能的不同, 可选择设计不同的控制方法, 如反馈线性化, PD 控制^[5], 奇异摄动控制^[6], 变结构控制等.

文献[1]是以一具有柔性前臂的两连杆机器人作为对象, 研究了 PD 控制和基于计算力矩的三种控制算法. 本文针对文献[1]中给出的柔性机器人模型, 通过模型转换提出了一种改进的计算力矩控制算法, 并对此算法的收敛性进行证明. 仿真结果表明, 新算法控制效果比文献[1]中的各算法效果都好.

2 柔性机器人的动态模型

本文的研究对象是一个具有柔性前臂的两连杆平面机器人, 其基本结构图如图 1 所示.

文献[1]中给出了一个关于两连杆机器人的非线性动态模型:

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + Kq + D\dot{q} = Gu. \quad (1)$$

其中, 考虑两种变形模态, 则 $q = (\theta_1, \theta_2, \delta_1, \delta_2)^T \in \mathbb{R}^4$, θ_1 和 θ_2 如图中所定义, δ_1 和 δ_2 分别为它们的变形模态.

$B(q)$ 对任意 q 为正定对称惯性矩阵; $C(q, \dot{q})$ 是 Coriolis 力和向心力, G 为输入力矩转换矩阵; K 为弹性矩阵; 而关节粘性摩擦力和模型阻尼系数则排列在 D 的对角线上. 这些矩阵具体表达式见文献[1].

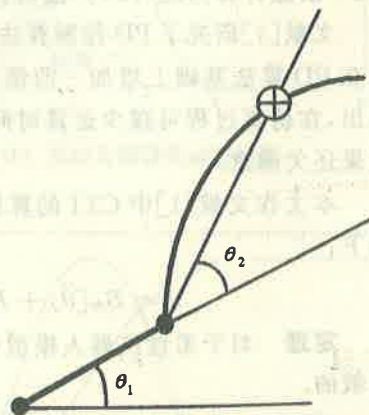


图 1 柔性前臂机械手的示意图

* 国家自然科学基金(69405004)和广东省自然科学基金(940069)资助项目.

本文于 1996 年 3 月 21 日收到, 1997 年 2 月 27 日收到修改稿.

3 控制算法

3.1 模型转换

文献[1]给出的模型(1)是关于 θ 的方程,但在实际系统中,只能得到由编码器测得的角度位移 θ_c :

$$\theta_c = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 + \Phi'_{10}\delta_1 + \Phi'_{20}\delta_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

因此,将(2)式代入(1)式,可得到以 θ_c 为变量的模型.

命题 模型(1)可转换成以下模型:

$$B_c(q_c)\ddot{q}_c + C_c(q_c, \dot{q}_c) + K_c q_c + D_c \dot{q}_c = G_c u. \quad (3)$$

且方程可分解为:

$$B_{\theta\theta}\ddot{\theta}_c + B_{\theta\delta}\ddot{\delta} + C_\theta = u, \quad (4)$$

$$B_{\delta\theta}^T\ddot{\theta}_c + B_{\delta\delta}\ddot{\delta} + C_\delta + K_\delta\delta + D_\delta\dot{\delta} = 0. \quad (5)$$

其中 $q_c = (\theta_{c1}, \theta_{c2}, \delta_1, \delta_2)^T \in \mathbb{R}^4$, $\theta_c = (\theta_{c1}, \theta_{c2})^T$, $\delta = (\delta_1, \delta_2)^T$,

$$B_c(q_c) = \begin{bmatrix} B_{\theta\theta} & B_{\theta\delta} \\ B_{\theta\delta}^T & B_{\delta\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} - \Phi'_{10}b_{12} & b_{14} - \Phi'_{20}b_{12} \\ b_{12} & b_{22} & -\Phi'_{10}b_{22} & -\Phi'_{20}b_{22} \\ b_{13} - \Phi'_{10}b_{12} & -\Phi'_{10}b_{22} & 1 + \Phi'_{10}{}^2b_{22} & \Phi'_{10}\Phi'_{20}b_{22} \\ b_{14} - \Phi'_{20}b_{12} & -\Phi'_{20}b_{22} & \Phi'_{10}\Phi'_{20}b_{22} & 1 + \Phi'_{10}{}^2b_{22} \end{bmatrix},$$

$$C(q_c, \dot{q}_c) = \begin{bmatrix} C_\theta \\ C_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 - \Phi'_{10}c_2 \\ c_4 - \Phi'_{20}c_2 \end{bmatrix}, \quad K_c = K, \quad D_c = D, \quad G_c = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}.$$

证 详见文献[7].

3.2 改进计算力矩(ICTJ)控制算法

文献[1]研究了PD控制算法和基于计算力矩的三种控制算法,其中效果最好的CTJ算法是在PD算法基础上增加一前馈项来获得对非线性的补偿,所增加的前馈项是通过离线计算得出,在仿真过程可减少运算时间,但不足之处是没有将实际输出及时反馈进行在线运算,故效果还欠满意.

本文在文献[1]中CTJ的算法基础上提出了一种改进的计算力矩(ICTJ)控制算法,形式如下:

$$u = B_{\theta\theta}[\ddot{\theta}_d + K_p(\theta_d - \theta_c) + K_D(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_c)] + B_{\theta\delta}\ddot{\delta} + C_\theta. \quad (6)$$

定理 对于柔性机器人模型(3),若采用控制律(6),则柔性机器人的跟踪误差是全局指数收敛的.

证 将(6)式代入(4)式,可得:

$$B_{\theta\theta}\ddot{\theta}_c + B_{\theta\delta}\ddot{\delta} + C_\theta = B_{\theta\theta}[\ddot{\theta}_d + K_p(\theta_d - \theta_c) + K_D(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_c)] + B_{\theta\delta}\ddot{\delta} + C_\theta, \quad (7)$$

设 $e = \theta_c - \theta_d$, 有 $\dot{e} = \dot{\theta}_c - \dot{\theta}_d$, $\ddot{e} = \ddot{\theta}_c - \ddot{\theta}_d$, 则(7)式可写为:

$$B_{\theta\theta}(\ddot{e} + K_D\dot{e} + K_p e) = 0, \quad (8)$$

因为 $B_{\theta\theta}$ 是正定的,则有:

$$\ddot{e} + K_D \dot{e} + K_P e = 0. \quad (9)$$

又因为 K_D, K_P 是正定对角阵, 因此, 跟踪误差 e 是全局指数收敛的. 证毕.

4 仿真结果

在仿真中, 柔性机器人的物理参数采用文献[1]中的数据.

同样, 采用文献[1]中给出的期望轨迹:

$$\dot{\theta}_{d1}(t) = \begin{cases} \frac{4\pi}{T^2}, & t \in [0, \frac{T}{2}], \\ -\frac{4\pi}{T^2}, & t \in [\frac{T}{2}, T], \end{cases} \quad \ddot{\theta}_{d2}(t) = \begin{cases} \frac{16\pi}{T^2}, & t \in [0, \frac{T}{4}], \\ -\frac{16\pi}{T^2}, & t \in [\frac{T}{4}, \frac{3T}{4}], \\ \frac{16\pi}{T^2}, & t \in [\frac{3T}{4}, T]. \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\theta_{d1}(0) = 0, \theta_{d1}(T) = \pi, \theta_{d2}(0) = \theta_{d2}(T) = 0, \theta_{d2}(\frac{T}{2}) = \pi, T = 4 \text{ 秒}. \quad (11)$$

对角增益 K_D, K_P 也采用文献[1]中的数据:

$$K_{D1} = 2 \text{ Nm} \cdot \text{s/rad}, \quad K_{D2} = 0.8 \text{ Nm} \cdot \text{s/rad}, \quad K_{P1} = 11.5 \text{ Nm/rad}, \quad K_{P2} = 6 \text{ Nm/rad}.$$

经过仿真, CTJ 控制算法的控制效果如图 2(a, b) 所示, 而本文提出的改进的计算力矩控制算法 (ICTJ) 的控制效果如图 3(a, b) 所示. 由图中可直观地比较出 ICTJ 控制算法跟踪误差大大减小, 达到较满意的结果. 其中, 关节 1 的最大误差为 0.04° , 关节 2 的最大误差为 0.15° ; 而 CTJ 算法的关节 1 的最大误差为 16° , 关节 2 的最大误差约为 3.25° . 可见改进的计算力矩法 (ICTJ) 对跟踪误差有较大的改善.

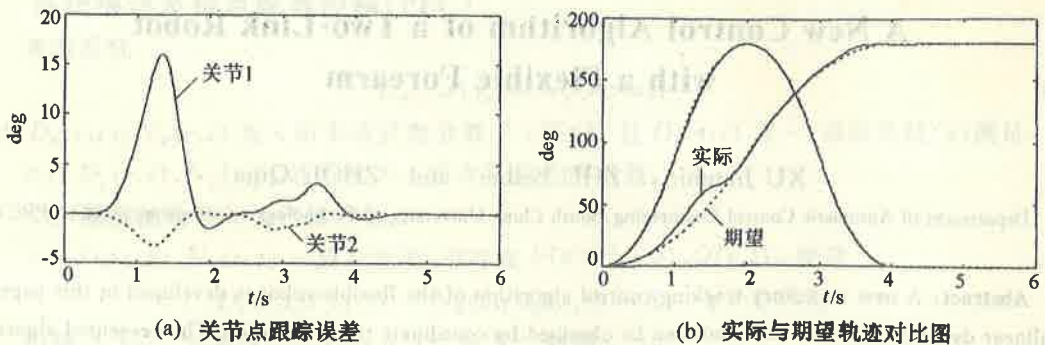


图2 CTJ控制仿真结果

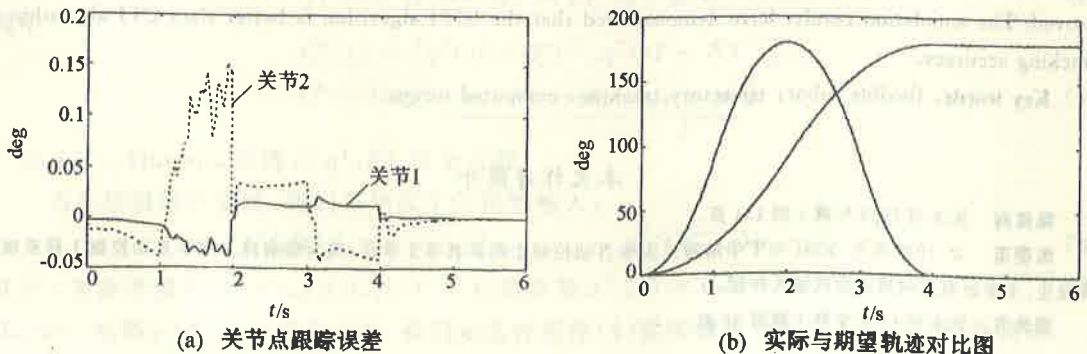


图3 ICTJ控制仿真结果

5 结 论

本文针对文献[1]中给出的柔性连杆机器人模型,通过模型转换提出了一种改进的柔性机器人计算力矩控制算法,并对此算法的收敛性进行了证明.用 MATLAB 语言进行的仿真结果证实了此算法的可行性,并且,通过与文献[1]中控制算法的对比,更直观地证明了新的控制算法对关节轨迹跟踪的改善作用.仿真结果也证明了所建议使用的模型精度已经满足了控制设计要求,此结果也可作为原始资料以便和更先进的控制算法作比较.

参 考 文 献

- 1 DeLuca, A., Lannari, L., Lucibello, P., Panzieri, S. and Ulivi, G.. Control experiments on a two-link robot with a flexible forearm. Proc. of the 29th IEEE Conference on Decision and Control, Honolulu, Hawaii, December, 1990, 520-570
- 2 Spong, M. W.. The Control of Flexible Joint Robots: A Survey in New Trends and Application of Distributed Parameter Control Systems. G. Chen et al (Eds.), New York: Marcel Dekker Publisher, 1991
- 3 周其节, 徐建闽. 柔性机器人的控制. 控制理论与应用, 1994, 11(2): 226-228
- 4 Siciliano, B., Prasad, J. V. R. and Calise, A. J.. Output feedback two-time scale control of multilink flexible arms. ASME J. Dynam. Syst. Meas. and Contr., 1992, 114(1): 70-77
- 5 Yigit, A. S.. On the stability of PD control for a two-link rigid-flexible manipulator. ASME J. Dynam. Syst. Meas and Contr., 1994, 116(2): 208-215
- 6 Schoenwald, D. A. and Ozguner, U.. On combining slewing and vibration control in flexible manipulators via singular perturbations. Proc. of 29th Conference on Decision and Control, Honolulu, 1990, 533-538
- 7 朱蓓蓓, 徐建闽, 周其节. 两连杆柔性前臂机器人的模型转换. 华南理工大学学报, 1997, 25(12): 7-11

A New Control Algorithm of a Two-Link Robot with a Flexible Forearm

XU Jianmin, ZHU Beibei and ZHOU Qijie

(Department of Automatic Control Engineering, South China University of Technology • Guangzhou, 510641, PRC)

Abstract: A new trajectory tracking control algorithm of the flexible robot is developed in this paper. A nonlinear dynamic model of the robot can be obtained by coordinate transformation. The presented algorithm (ICTJ) is based on CTJ control algorithm proposed by Deluca et al.. The convergence of algorithm has been proved. The simulation results have demonstrated that the ICTJ algorithm is better than CTJ algorithm in tracking accuracy.

Key words: flexible robot; trajectory tracking; computed torque

本文作者简介

徐建闽 见本刊1998年第1期151页.

朱蓓蓓 女. 1972年生. 1994年于华南理工大学自动控制工程系获学士学位, 现为华南理工大学自动控制工程系硕士研究生. 主要研究方向为柔性机器人控制.

周其节 见本刊1998年第1期第38页.