

柔性臂机器人控制算法综述

戴学丰, 孙立宁, 刘品宽, 蔡鹤皋

(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 柔性臂具有质量轻、惯性小和能耗低等优点, 是替代笨重刚性机械臂的理想选择。由于柔性臂在运动时要产生振动, 因此对其控制算法的研究显得十分重要。本文以多连杆柔性臂为主, 对柔性臂机械手关节控制的各种方法进行了系统地综述, 内容涉及由经典PID算法到无模型智能控制的控制理论的各个分支; 并介绍了如何在关节控制的同时减小振动的措施。

关键词: 机器人; 柔性臂机器人; 轨迹控制; 振动控制; 建模

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1007-449X(2002)02-0158-04

A survey of control algorithms for flexible link manipulators

DAI Xue-feng, SUN Li-ning, LIU Pin-kuan, CAI He-gao

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China)

Abstract: Being lightweighted, less inertia and energy efficient, flexible link manipulators were preferred to substitute bulky rigid ones. Since the vibration induced by joint motion, the controls to realize desired performance meanwhile to suppress flexure's side effects take a critical role in the closed-loop system. Based on multi-link flexible manipulator, a variety of control algorithms for flexible link manipulators were summarized. The survey progressed from the simplest PID to the most advanced intelligent approach and covered almost each branch of control theory. In addition, the means dealing with chattering when conducting joint control is discussed too.

Key words: robots; flexible link manipulators; trajectory control; vibration control; modeling

1 引言

由于制造业对高速机器人的需求和航天领域为节省能源对机械手质量的控制, 近年来对轻质柔性臂机器人的研究成为热点。相对于刚性机械臂而言, 柔性机械臂虽然没有了高速运动时产生的巨大惯性力, 但是在执行动作过程中产生的振动使它的建模与控制要比刚性臂复杂得多, 因为在实现常规控制功能(如轨迹跟踪、位置/力控制)的同时还要补偿重力造成的机械手末端位置偏差和减小振动的幅

值和持续时间, 对于多柔性臂还要考虑各柔性臂间的耦合。

在柔性臂建模方面, 目前应用较多的是 Lagrange 假设模态法^[1], 其次是 Newton-Euler 法^[2], 以及有限元法^[3] 神经网络法^[4-5] 和虚拟刚性臂^[6] 等方法。柔性臂的振动控制分为主动控制和被动控制, 被动控制是通过系统自身的结构来减弱和吸收振动, 如通过优化控制指令减小关节控制产生的振动^[7], 或通过优化系统结构减小振动^[8-9]。主动控制是通过向系统施加外力抵消系统中的振动, 柔性臂的主动振动控制

收稿日期: 2001-09-26; 修回日期: 2002-03-19

基金项目: 高等学校博士点科研基金资助项目(2000021323); 高等学校骨干教师资助计划(No.1043)

作者简介: 戴学丰(1962-), 男, 副教授, 博士后, 研究方向为机器人控制、离散事件系统;

孙立宁(1964-), 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为机器人学、微驱动机器人控制;

刘品宽(1969-), 男, 博士研究生, 学术方向为: 微小型机器人理论建模与计算。

蔡鹤皋(1934-), 男, 博士生导师, 中国工程院院士, 研究方向为机器人学、机电一体化等。

算法通常是和柔性臂的轨迹控制算法结合在一起的。目前这方面的成果不断涌现,主要包括PID控制算法^[10, 11]、逆系统法^[2, 12]、滑模控制法^[9, 13~15]、奇异摄动法^[16]、智能控制算法^[5]等。下面按控制方法分类进行综述。

2 控制算法综述

2.1 经典控制算法

主要有PID控制算法和逆系统方法。文[11]的研究表明双连杆柔性臂的振动模态与柔性臂关节和末端质量分布有关,当满足一定条件时,通过基于关节角速度误差的PID控制律与文中提出的时变驱动力整形技术(Impulse shaping technique)相结合,即可达到了机械臂在运动过程中同时抑振的目的。文献[10]的对象为一双连杆3自由度柔性臂机器人系统,其控制策略是忽略柔性臂间的耦合,然后对三个关节分别设计PD控制律,并对关节摩擦及稳态误差进行了补偿。当期望关节角轨迹由5阶多项式表示时,从实验结果可以看出系统能很好地实现关节跟踪。但是该算法只由关节角构成控制律,所以不能很好地抑制振动。文[11]的研究还表明,对一类双连杆柔性臂采用PD加前馈的控制律,能够实现期望轨迹跟踪,并且系统是Lyapunov意义下稳定的。采用PD算法的还有文献[5]等。

逆系统方法又分为逆动力学法和逆运动学法。文[2]基于柔性臂的Newton-Euler模型,给出了计算柔性臂机器人关节转角控制力矩的递推算法。逆运动学是指在给定机械手末端位型的前提下,通过Jacobian阵得到各机械臂的期望转角和弹性偏移量,文[12]对一两连杆柔性臂系统,采用对刚性臂算法进行两项校正的方法得到了柔性臂的结果。类似的结果还包括文[17]等。值得注意的是柔性臂对象为非最小相位系统^[29]。

2.2 基于线性状态方程的控制算法

柔性臂的振动具有无穷多个模态,而且在该系统中存在多种耦合,柔性臂机器人的数学模型是非线性方程,但是将其模型线性化后,常规的基于状态反馈实现极点配置方法、奇异摄动法、Kalman滤波算法等现代控制理论内容均可在机器人系统中得到应用。柔性臂系统的运动可分解为等效刚体的运动和振动两部分,它们的区别是前者运动频率低而后者运动频率高,因此文[16]基于奇异摄动法将柔性臂系统的数学模型分为快、慢两个子系统,然后对它们分别设计参考模型跟踪和极点配置控制律,用于实现轨迹跟踪和抑振,总的控制律是两个子系统控制

律的叠加,从对单柔性臂对象的仿真结果看系统具有满意的性能。这种方法的优点是简化了系统的模型,使控制律的设计更方便。该方面的应用还包括非最小相位系统奇异控制^[18]及基于奇异摄动模型的柔性臂结构参数优化^[19]等。

文献[19]建立了弹性臂/关节机器人与刚性壁接触的分布参数模型,并提出了一种多阶段解耦控制概念,其控制由给定值、关节角的PD项和机械手末端轨迹误差的比例项组成。控制参数通过使闭环线性系统的特征根极小化得到,仿真和实验效果良好。

柔性臂的摆动是通过安装在关节上的伺服电机驱动的,柔性臂的摆角及角速度等通过安装在伺服电机轴上的光电编码器测量^[19],但是这些测量数据常常含有噪声,因此文[20]提出了利用安装在柔性臂转动轴上光电码盘提供的测量数据通过Kalman滤波算法估算角速度和角加速度的方法。文[31]利用扩展Kalman滤波算法根据机器人关节和末端执行器的实时测量信息估算末端执行器的位置。

此外,建立在状态方程上的结果还包括二次型最优控制^[21, 9],其中文[21]通过加入耦合项将单柔性臂模型扩展为双柔性臂模型^[22],并在此基础上开发了线性二次型最优控制和计算力矩控制,仿真结果表明前者在性能上优于后者。文[9]的控制律分为两部分,当机械手的位置到达目标状态的某个邻域时,切换为线性二次型最优控制律,该控制律通过求解连续形式的Riccati方程得到。

2.3 鲁棒和自适应算法

目前这方面的研究比较多的是滑模(变结构)控制算法,而滑模控制算法中,更多的结果是基于线性集中参数模型^[13]的。考虑到柔性臂的弹性变形是分布在整个柔性臂上,因此分布参数模型可更准确地描述柔性臂系统的动态行为。随着对控制品质的提高,最近出现了基于分布参数模型的滑模控制^[14]。文[13]基于滑模控制原理设计了实现关节角轨迹跟踪的控制算法,并用中心流形理论证明了闭环系统的稳定性;基于极点配置法设计振动控制器,通过一控制逻辑实现两个控制律之间的切换。仿真结果表明当存在负载不确定性时该算法仍能实现准确的关节跟踪和抑振。文[9]通过基于线性模型的滑模控制率 and 最优控制律分别实现机械臂轨迹跟踪和抑振。文[23]用滑模控制实现宏-微操作手系统中微操作手的轨迹控制。鲁棒控制的主要设计方法 H_∞ 控制在柔性臂系统中的应用见文[18]。

滑模控制中重要的是滑模切换面的选取,在柔性臂控制中切换面的选取可以分为三类:(1)基于

线性状态方程设计时选为状态的线性函数^[9]; (2) 采用分布参数模型时选为 $S = \dot{W} + kW$ 的形式^[14], 式中 W 为关节角和弹性变形量之和; (3) 基于非线性模型时选为 $S = \ddot{\theta} + 2\zeta_c\omega_{nc}\dot{\theta} + \omega_{nc}^2 z_s$, 式中 θ 为误差向量, z_s 为 θ 的积分^[13, 23]。由所列的文献可以看出, 滑模控制主要是用于关节角的轨迹控制, 由于滑模控制律的切换会激起柔性臂的振动, 所以在抑振时都是根据目标轨迹的某一邻域构成的条件将控制律切换为连续形式, 如实现极点配置的状态反馈形式等^[13]。

柔性臂的控制算法通常都由计算机实现, 因此根据柔性臂系统的输入输出数据辨识其数学模型可以有效的节省建模费用, 文[4] 基于这一思想, 对一个由两个伺服电机驱动、可在水平和垂直两个平面内运动的单柔性臂系统, 通过最小二乘算法辨识其 4 阶 ARX 模型参数, 并设计了极点配置算法, 仿真和实验证明了该方法的有效性。

2.4 基于优化算法的控制

由于系统的结构和控制效果密切相关, 文[9] 提出了结构-参数一体化设计方法, 首先建立柔性臂系统的有限元模型, 将控制器参数和柔性臂结构参数组成一向量, 然后利用遗传算法对其进行优化的方法, 仿真结果表明经过优化的系统可达到比采用优化控制和均匀梁结构的系统有更快的调节时间和更轻的机械臂质量。文[7] 选取振动模态的二次型函数为性能指标, 对表示给定速度波形的函数参数进行优化, 结果表明优化后的系统产生的振动最小, 该文还对两柔性臂不同动作顺序产生的振动幅度进行了对比分析。

相关的工作还包括文[19] 提出的利用优化算法确定控制律等。

2.5 智能及其它控制算法

在柔性臂中还包括路径规划、基于神经网络的建模与控制算法等内容。文[17] 首先介绍了适宜于表达柔性臂机器人运动学关系的旋转代数, 然后提出了利用旋转代数的柔性臂机器人连续路径规划算法, 最后在一两连杆系统上进行了验证。采用该文算法可有效提高控制精度, 该方法实际上是一种建立在线性化模型上的逆运动学法。模态法和有限元法^[9]是当前两种有效的建模方法, 但是若要准确地表述系统的行为, 这两种方法均需要大量的模态信息。基于有限模态的 Lagrange 法和 Newton-Euler 法, 由于模态截断误差、粘滞误差和死区的出现常使模型不够准确。神经网络在柔性臂建模方面表现出巨大的潜力, 文[5] 提出了一种并行神经网络结构用于柔性臂建模。文[4] 用神经网络实现双连杆柔性臂机器

人的辨识, 提出了一种自适应神经网络结构, 然后通过计算机仿真证明该结构可在没有系统非线性特性任何先验知识的条件下成功地实现辨识, 而且不需要额外的离线训练。基于神经网络的柔性臂控制见文[24] 等。

另外, 文[23] 利用预测控制实现宏-微操作手中柔性臂的控制。除此之外, 还有利用柔性臂系统本身的冗余度抵消振动^[25, 26] 等方法。

3 结论与展望

从以上综述可以看出, 在基于模型的柔性臂控制中所采用的模型多以线性模型为主, 只有少数的几篇文献采用了非线性模型[13, 23], 而且这些研究成果多数是给出了数字仿真算例, 只有少数是在实验对象上验证的。

其次, 研究者在开发具体系统的控制算法时往往是采用了不止一种控制器设计概念, 如文[24]、[5] 都是结合了自适应思想和神经网络技术得到的结果, 因此也很难准确地将某一控制算法进行归类。

最后, 作者认为未来的研究应朝着解决各种控制算法中存在的问题这方面发展。概括地说就是缺乏具有强鲁棒性的算法, 具体问题包括控制器的阶数会随着所考虑的模态数目的增加而增加, 忽略高频特性可能会导致控制与观测的溢出, 从工程的角度看有些控制器是很难实现的, 因为它们常常需要全状态反馈。

本文主要是从关节控制的角度出发对柔性臂机器人控制算法进行了综述, 而对于更详细的采用在机械臂上布置压电陶瓷等智能材料构成传感器/驱动器对的方法实现振动主动控制的内容可参见文[27]、[28] 等。

参考文献:

- [1] BOOK W J. Recursive lagrange dynamics of flexible manipulator arms [J]. *Int J Robotics Research*, 1984, 3: 87-100.
- [2] BOYER F, KHALIL W. An efficient calculation of flexible manipulator inverse dynamics [J]. *Int J Robotics Research*, 1998, 17(3): 282-293.
- [3] JONKER B. A finite element dynamic analysis of flexible manipulators [J]. *Int J Robotics Research*, 1990, 9(4): 59-74.
- [4] YAZDIZADEH A, KHORASANI K, PATEL R V. Identification of a two-link flexible manipulator using adaptive time delay neural networks [J]. *IEEE Trans Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 2000, 30 (1): 165-172.

- [5] TALEBI H A, PATEL R V, ASMER H. Neural network based dynamic modeling of flexible-link manipulators with application to the SSRMS [J]. *J Robotic Systems*, 2000, 17(7): 385-401.
- [6] YASHIKAWA T, HOSODA K. Modeling of flexible manipulators using virtual rigid links and passive joints [J]. *Int J Robotics Research*, 1996, 15(3): 290-299.
- [7] LIU K, KUJATH M R. Trajectory optimization for a two-link flexible manipulator [J]. *Int J Robotics and Automation*, 1996, 11(2): 56-71.
- [8] MOALLEM M, KHORASANI K, PATEL R V. Optimum structure design for improving the dynamics of flexible-link manipulators [J]. *Int J Robotics and Automation*, 1998, 13(4): 125-131.
- [9] ZHU Y, QIU J, TANI J. Simultaneous optimization of a two-link flexible robot arm [J]. *J Robotic Systems*, 2001, 18(1): 17-27.
- [10] ZAKI A S, MIR H, ELMARAGHY W H. Design, testing and simulation of a flexible robot for the study of dynamics and control [J]. *Int J Robotics and Automation*, 1998, 13(1): 24-29.
- [11] DAMAREN C J. Modal properties and control system design for two-link flexible manipulators [J]. *Int J Robotics Research*, 1998, 17(6): 669-678.
- [12] SICILIANO B. Closed-loop inverse kinematics algorithm for constrained flexible manipulators under gravity [J]. *J Robotic Systems*, 1999, 16(3): 353-362.
- [13] NATHAN P J, SINGH S N. Sliding mode control and elastic mode stabilization of a robotic arm with flexible links [J]. *ASME J Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1991, 113: 669-676.
- [14] GE S S, LEE T H, ZHU G, et al. Variable structure control of a distributed-parameter flexible beam [J]. *J Robotic Systems*, 2001, 18(1): 17-27.
- [15] 刘广瑞, 刘又午, 刘敏. 柔性机械臂末端位置的变结构模型参考自适应控制 [J]. *机器人*, 1998, 20(4): 292-296.
- [16] SICILIANO B, BOOK W J. A singular perturbation approach to control of lightweight flexible manipulators [J]. *Int J Robotics Research*, 1988, 7(4): 79-90.
- [17] XI F, FENTON R G. Continuous path planning for flexible link manipulators using the algebra of rotations [J]. *Int J Robotics and Automation*, 1997, 12(4): 117-123.
- [18] YAZDIZADEH A, KHORASANI K, PATEL R V. Uncertainty compensation for a flexible-link manipulator using nonlinear h-infinity control [J]. *Int J Control*, 1998, 69(6): 753-771.
- [19] FIGUEIREDO J, da COSTA J M G. Elastic-link manipulators: modelling, simulation and experiments [J]. *Int J Robotics and Automation*, 1996, 11(1): 13-21.
- [20] BELANGER P R, DOBROVOLNY P, HELMY A, et al. Estimation of angular velocity and acceleration from shaft-encoder measurements [J]. *Int J Robotics Research*, 1998, 17(11): 1 225-1 233.
- [21] MORRIS A S, MADANI A. Quadratic optimal control of a two-flexible-link robot manipulator [J]. *Robotica*, 1998, 16: 97-108.
- [22] MORRIS A S, MADANI A. Static and dynamic modeling of a two-flexible-link robot manipulator [J]. *Robotica*, 1996, 14: 280-300.
- [23] YIM W, SINGH S N. Trajectory control of flexible manipulator using rigid micro-manipulator system [J]. *Int J Robotics and Automation*, 1997, 12(3): 93-99.
- [24] KATIC D, VUKOBRATIC M. Adaptive nonlearning and learning connectionist control of manipulation robots with flexible links [J]. *Int J Robotics and Automation*, 1997, 12(4): 135-145.
- [25] KIM S J, PARK Y S. Self-motion utilization for reducing vibration of a structurally flexible redundant manipulator system [J]. *Robotica*, 1998, 16: 669-677.
- [26] 边宇枢, 陆震. 柔性冗余度机器人残余振动的抑制研究 [J]. *机器人*, 1998, 20(4): 247-252.
- [27] 郭吉丰, 陈维新, 陈永校. 柔性机械臂用压电驱动器实现精密定位控制的研究—解析模型、作业空间和可操作性分析 [J]. *机器人*, 1998, 20(3): 192-197.
- [28] HALIM D, MOHEIMANI S O R. Spatial resonant control of flexible structures-application to a piezoelectric laminate beam [J]. *IEEE Trans Control Systems Technology*, 2001, 9(1): 37-53.
- [29] ZAAD K H, KHORASANI K. Control of non-minimum phase singularly perturbed systems with application to flexible link manipulators [J]. *Int J Control*, 1996, 63(4): 679-701.
- [30] GOH S P, PLUMMER A R, BROWN M D. Digital control of a flexible manipulator [A]. *Proceedings of the American Control Conference* [C], Chicago, Illinois: AACC, 2000. 2 205-2209.
- [31] LERTPIRIYASUWAT V, BERG M C, BUFFINTON K W. Extended Kalman filtering applied to a two-axis robotic arm with flexible links [J]. *Int J Robotics Research*, 2000, 19(3): 254-270.
- [32] 李海斌, 毕世华, 方远翹, 等. 振动主动控制技术现状及发展 [J]. *振动与冲击*, 1998, 17(3): 38-42.
- [33] CHO J K, PARK Y S. Experimental evaluation of time-varying impulse shaping with a two-link flexible manipulator [J]. *Robotica*, 1996, 14: 339-345.

(编辑: 王长风)