

柔性机器人的动力学建模及其控制*

樊晓平 徐建闽 周其节 梁天培
(华南理工大学自动控制工程系·广州, 510641) (香港理工大学·香港)

摘要: 本文首先综述了近年来在柔性机器人动力学建模方面所取得的进展, 着重介绍了目前较常用的几种建模方法和模型, 同时对柔性机器人的控制问题进行了评述, 指出了今后研究的方向。

关键词: 柔性机器人; 动力学建模; 控制; Lagrange 方程; Hamilton 原理; 有限元法; 奇异摄动; 反馈线性化; 模糊控制

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应用研究已受到广泛的关注。然而, 由于柔性机器人中包含有一些柔性单元(如柔性关节、柔性连杆等), 其在运行过程中会产生扭曲、弹性、剪切等变形, 从而给这类柔性机器人的控制(如轨道跟踪控制、力/位置控制等)带来许多困难。

另一方面, 从系统控制的角度来看, 其大致可分为两类: 一类是基于模型的控制(如大多数常规控制方法), 一类是基于知识的控制(如专家控制、模糊控制等)。对于前者, 必须首先建立系统的数学模型, 再据此设计控制器。因而控制的精度和效果都强烈地依赖于所建立的数学模型对实际系统的刻画程度。对于后者, 则是根据专家对系统及其环境所掌握和具备的经验和知识进行控制, 避免了因数学模型不准确而引起的固有控制误差, 且可通过学习不断改善控制。但是, 这类控制方法还处在发展阶段, 远未臻完善, 尚有许多理论问题没有解决。因而, 目前在实际应用中仍以基于模型的控制占据主导地位。

从本质上来说, 柔性机器人(尤其是柔性连杆机器人)必须用无穷维分布参数模型来描述, 而实际上对分布参数系统的控制又往往只能基于有限维模型进行设计, 这就存在一个模型复杂性与系统控制性能之间进行折衷考虑的问题。因此, 如何建立恰当的、行之有效的动力学模型, 并据此设计高性能控制器以有效地控制所论柔性机器人的行为, 乃是广大从事机器人研究和应用的专家、学者必须面对和解决的问题之一。近年来, 国内外许多学者对柔性机器人的建模和控制问题展开了讨论, 取得了不少成果^[1~4]。本文拟从其动力学建模和控制两方面对已有成果进行综述, 并给出今后研究的方向。

2 柔性机器人的动力学建模

柔性机器人的柔性主要表现为关节的柔性和连杆的柔性。关节柔性是指机器人传动机构和关节转轴的扭曲变形, 通常用集中参数模型描述; 连杆柔性则指机器人连杆的弹性变形、剪切变形等, 通常须用偏微分方程所代表的分布参数模型加以描述。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。因此, 本文将把讨论的重点放在柔性连杆机器人的建模和控制上。而关于柔性关节与柔性连杆之间的耦合作用, 可参见文献[5]。

* 国家自然科学基金、广东省自然科学基金和香港理工大学研究基金资助项目。

本文于 1995 年 10 月 10 日收到, 1996 年 9 月 25 日收到修改稿。

2.1 基于 Lagrange 方程的动力学建模

前已述及, 柔性连杆机器人因连杆柔性会在运行过程中产生挠曲变形、轴向变形和剪切变形, 因而从动力学角度看, 每根柔性连杆都可视为一段 Timoshenko 梁. 考虑到机器人连杆的长度总比其截面线径大得多, 运行过程中所产生的轴向变形和剪切变形相对于挠曲变形而言非常小, 因而在动力学建模过程中常常可忽略二者的影响, 将每根柔性连杆简化为 Euler - Bernoulli 梁处理^[6,7]. 为了建立柔性连杆机器人的动力学模型, 一种最普遍且行之有效的方法就是利用 Lagrange 方程. 基于 Lagrange 方程的动力学建模过程大致可概括为^[8]:

① 选定广义坐标, 建立有限维模型. 一般选择关节变量和柔性连杆的模式坐标作为广义坐标;

② 建立动能、势能和虚功表达式;

③ 对 Lagrange 方程进行必要的推导和整理.

遵循以上步骤, Low 和 Vidyasagar 建立了由柔性前臂和刚性后臂组合成的双连杆柔性机器人的动力学模型^[9], 得到一组非线性积分-微分方程. Siciliano 等对多连杆柔性机器人应用上述建模步骤, 得到如下封闭形式的运动方程^[8]:

$$M(q, d) \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1(q, \dot{q}) \\ f_2(q, \dot{q}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1(q, \dot{q}, d, \dot{d}) \\ g_2(q, \dot{q}, d, \dot{d}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ Kd \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中 $q = (q_1, \dots, q_n)^T$ 是关节变量向量, n 是连杆数, M 是惯性矩阵, f_1 和 f_2 是包含重力、哥氏力和离心力项向量, g_1 和 g_2 是考虑关节变量及其速度和挠度变量及其速度之间交叉作用的向量, $K = \text{diag}(k_{11}, \dots, k_{1, m_1}, \dots, k_{n, m_1}, \dots, k_{n, m_n})$ 是定常挠曲刚度系数正定对角矩阵, $u = (u_1, \dots, u_n)^T$ 是作用在 n 个关节上的输入力矩向量, $d = (d_{11}, \dots, d_{1, m_1}, \dots, d_{n, m_1}, \dots, d_{n, m_n})$ 是挠度变量向量, 其中 $m_i (i = 1, \dots, n)$ 是第 i 根连杆的假想振型数(假设变形很小而在 m_i 处截尾).

通过引入新变量(弹性力)

$$z = Kd = \frac{1}{\mu} \tilde{K}d, \quad (2)$$

系统(1)变为如下双时标形式:

$$\begin{aligned} \ddot{q} &= -H_{11}f_1 - H_{12}f_2 - H_{11}g_1 - H_{12}g_2 - H_{12}z + H_{11}u, \\ \mu \ddot{z} &= -H'_{21}f_1 - H'_{22}f_2 - H'_{21}g_1 - H'_{22}g_2 - H'_{22}z + H'_{21}u. \end{aligned} \quad (3)$$

式中

$$H = M^{-1} = \begin{bmatrix} H_{11[n \times n]} & H_{12[n \times m]} \\ H_{21[m \times n]} & H_{22[m \times m]} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

而 $m = m_1 + \dots + m_n$ 是总的振型数, 上标撇表示对应各项已经左乘了 $\tilde{K}$.

建立这种双时标动力学模型的一大优点是可以利用奇异摄动法(singular perturbation)建立双时标控制器对柔性机器人的连杆位置进行控制, 但这种模型不能反映终端执行器运动受限的情况.

最近, Matsuno 等基于 Lagrange 方程, 并应用扩充 Hamilton 原理讨论了终端受限时平面二连杆柔性机器人的建模与混合位/力控制问题^[10]. 假设机器人终端执行器要求只能在约束表面

$$\Phi(X, Y) = 0 \quad (5)$$

上无摩擦滑动,其中 (X, Y) 表示惯性笛卡尔坐标变量.为推导动力学方程,先作如下假设:

假设 1 两根柔性连杆的弹性变形 $w_1(x, t)$ 和 $w_2(x, t)$ 相对于连杆长度 L_1 和 L_2 很小,其中 x 表示空间变量;

假设 2 连杆单位长度质量密度 ρ_1, ρ_2 和终端执行器等效集中质量 m_2 很小(静态假设);

假设 3 w_{1E} 相对于 θ_2 而言可以忽略,其中 $w_{1E} = w_1(L_1, t)$ 表示连杆 1 末端弹性变形,上标撇表示关于空间变量 x 的一阶微商, θ_2 是连杆 2 的关节变量.

于是,通过繁琐的推导和化简过程,最终可得描述该柔性机器人系统的拟静态(quasi-static)动力学方程为:

$$E_2 I_2 w''''_2(0, t) = -\lambda \frac{\partial \Phi}{\partial w_{2E}}, \quad (6)$$

$$Q_2(t) w_2(L_2, t) = -\lambda \frac{\partial \Phi}{\partial w_{2E}} L_2 + E_2 I_2 w''_2(0, t), \quad (7)$$

$$E_1 I_1 w''''_1(L_1, t) + Q_1(t) w'_1(L_1, t) = -\lambda \frac{\partial \Phi}{\partial w_{1E}}, \quad (8)$$

$$Q_1(t) w_1(L_1, t) = -\lambda \frac{\partial \Phi}{\partial w_{1E}} L_1 - \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial w'_{1E}} + \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \theta_2} + \tau_2 + E_1 I_1 w''_1(0, t), \quad (9)$$

$$J_1 \ddot{\theta}_1 = \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \theta_1} + \tau_1, \quad (10)$$

$$J_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) = \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \theta_2} + \tau_2. \quad (11)$$

式中 $E_i I_i$ 是均匀挠曲刚度($i=1, 2$), τ_i 是驱动马达 i 所产生的驱动力矩; $Q_i(t)$ 是连杆 i 的轴向压力; λ 是与约束(5)相应的 Lagrange 乘子;上标撇代表对空间变量的微商; J_i 是驱动马达 i 的转子惯性矩.

基于上述模型即可设计出相应的混合位/力控制器.

迄今为止, Lagrange 方程结合(扩充) Hamilton 原理, 乃是建立柔性连杆机器人动力学模型的主要方法. 所得模型往往都是一些偏微分方程组, 且相应的边界条件大多取决于接触力、输入力矩等边界输入, 因而求解非常困难. 一般的处理方法, 或者是将弹性变形 $w_i(x, t)$ 作变量分离展开并作截尾近似, 采用 B 样条函数(B-spline function)^[11] 或其他振型函数(mode shapes)^[12] 和广义坐标的组合来达到模型简化的目的, 或者是直接利用模型简化方法如均衡法(balancing techniques)^[13] 等使柔性机器人系统的动力学模型更易于求解.

2.2 基于 Hamilton 原理建模

建立柔性机器人系统运动方程最常用的方法之一是利用 Lagrange 动力学. 然而, 要将实际无穷维系统简化为有限自由度系统, 却可有多种不同的实现方法. 途径之一是将普通连杆视为具有有限自由度的系统然后再利用上一小节述及的 Lagrange 方程写出其动力学方程. 另一种可能是将连杆视为一连续体, 写出其对应的 Hamilton 原理形式, 导出相应的数学方程和边界条件, 再利用试函数(trial function)的适当组合来逼近系统方程的解.

Benati 和 Morro 遵循上述第二条途径, 利用 Hamilton 原理讨论了 N 根柔性连杆组成的柔性机器人运动方程的建立问题^[14]. 其建模思想为: 首先将柔性连杆视为由连杆两端直接连接起来的虚拟刚性连杆, 利用刚性机器人的建模方法(如齐次变换法等)得到相应的虚拟运动方程, 然后再考虑相对于每一虚拟刚性连杆而产生的弹性变形.

最近, Choi 等利用 Hamilton 原理建立了一个由两根刚性连杆和一根柔性前臂构成的三连

杆柔性机器人的数学模型^[15],其中考虑了终端执行器受约束的情况.利用辛流形(symplectic manifold)的概念和 Poisson 括号矩阵,文[15]给出了与约束方程相应的 Lagrange 乘子向量 λ 的计算方法,并设计出对应的非线性力控制器和位置控制器.

基于扩充 Hamilton 原理,Krishnamurthy 和 Yang 讨论了两台相互独立但协调工作的柔性机器人系统的动力学建模与仿真问题^[16].从建模思想看,多机器人协调系统与单台柔性机器人并无本质区别,所不同的仅仅是在描述柔性连杆振动作用的微分方程中包含有多台机器人关节变量和位移变量之间的耦合项,因而使得系统的动力学模型更为复杂.

2.3 有限元法建模

有限元法是振动分析中一种应用广泛又行之有效的数值分析方法,它将一个复杂结构抽象成为由有限个单元在有限个结点处对接而成的组合结构,其中每一个单元都是一个弹性体,单元的位移用结点位移的插值函数表示^[6].

柔性连杆机器人系统是典型的复杂结构,柔性连杆的弹性振动也可以利用有限元法来分析.Chang 和 Hamilton 曾利用有限元法结合 Lagrange 方程建立了柔性连杆机器人的动力学模型^[17].该模型是基于等效刚性连杆系(ERLS)的概念得出的.所谓等效刚性连杆系,顾名思义,其基本思想就是将整个柔性连杆系的运动分解成为大、小运动两部分,大运动用 ERLS 表示,小运动则相对于 ERLS 而动.ERLS 的运动学等效于实际刚性连杆系的运动学,小运动则是关于 ERLS 的偏差.

利用有限元法建立柔性机器人的动力学模型,首先须对每根柔性连杆进行单元划分,然后再对每个单元的两个结点选定结点位移.一般情况下,常选择结点的挠度(弹性位移)和转角作为结点的广义坐标(称为结点位移).因而在三维空间上,每一柔性连杆结点上的位移向量将包括六个分量,其中三个为 x, y, z 方向的线位移(挠度),另三个为关于 x, y, z 方向的角位移(转角)^[17].

2.4 旋转代数法

旋转代数(the algebra of rotation)是一种新的运动学标记方法,采用不变量和向量形式来描述刚体的转动.将旋转代数用于机器人运动学,具有三个基本特征:描述刚性连杆转动的唯一性、描述一组刚性连杆运动的一致性以及描述刚性连杆机器人末端运动的简洁性^[18].因此,利用旋转代数法来研究柔性机器人的动力学建模问题不啻为一种切实可行的方法.

Xi 和 Fenton 首先引入所谓的旋转算子(rotational operator)^[18]:

$$(\theta z) \otimes r = \cos \theta r + [(1 - \cos \theta)(z \cdot r)]z + \sin \theta (z \times r). \quad (12)$$

式中 z 是关节转轴单位向量, θ 是绕 z 轴的转角, r 是空间任何一点到刚性连杆上一点的向量.于是,柔性连杆机器人的方位,可以用两个向量来表示:一个向量代表机器人末端的转动,另一个代表位移.这两个向量本身又可进一步分解为刚性部分和柔性部分,从而最终得到描述对应刚性机器人方位的位移方程和柔性连杆机器人相对于其刚性模拟机器人的末端偏移方程.

利用旋转代数法可以导出柔性机器人末端与关节变量和连杆挠度之间映射关系的 Jacobi 矩阵,因而更容易分析柔性机器人系统的运动学和动力学特征,便于施行必要的控制策略.

可以看到,旋转代数法与在刚性机器人建模过程中获得广泛应用的齐次变换法或 H-变换法(homogeneous transformations)^[19]非常相似.因此,如果我们将柔性连杆的运动(平移或旋转)也分解成刚性运动和围绕刚性运动所作的相对弹性运动两部分,那么同样有可能应用齐次变换的方法来建立柔性连杆机器人的动力学模型,不过这其中还有许多理论问题有待于进一步研究和解决.

2.5 其他建模方法

柔性连杆机器人是典型的动力学系统,因而首先应满足 Lagrange 方程^[7].当机器人终端执行器运动受限时,为了考虑约束表面方程的影响,则须应用 Hamilton 原理.迄今为止,对柔性连杆机器人的动力学建模,绝大多数都是从 Lagrange 方程和/或 Hamilton 原理出发,所得到的模型往往是一组高度非线性的积分-微分方程,求解起来十分困难.为此,便有了各种简化、处理和求解上述复杂模型的方法与算法,如假想振型法(assumed-mode method)^[20]、拟静态处理法(quasi-static task)^[10]、连续积分法(sequential integration method)^[21]、线性化法(linearization)^[12,22],以及前面介绍的有限元法(finite-element method)和旋转代数法(rotational algebra)等等.另一方面,完全抛开经典分析力学的思想,利用人工神经网络来模拟柔性臂的运动特征,从而得到柔性机器人的动力学模型^[23],也是近年来致力于研究的方向之一.但是,由于人工神经网络本身仍然处于发展阶段,所以利用神经网络来建立柔性机器人的动力学模型也将还有一段很长的路要走.

3 柔性机器人的控制

设计和制造柔性机器人的主要目的之一,就是期望获得较高的运动速度和高精度的控制性能,这就对机器人的控制器提出了较高的要求.但是,如上所述,柔性机器人的结构柔性会给系统的建模带来一定的困难;而机器人面临的不同任务,又决定了控制器的控制策略和控制行为的差异.因此,如何根据既定任务和预期性能恰当地选择和最优地设计相应的控制器,从而抑制和/或减少柔性臂的振动,无疑是机器人控制的关键之一.近年来,柔性机器人的控制问题已吸引了众多专家学者的关注,发表了大量文章.从总体发展和学科分类的角度看,大致可从以下几个方面简而述之.

3.1 轨道跟踪控制

使机器人终端执行器按照预先设定的轨道运行,乃是机器人控制的基本任务之一.对刚性机器人的轨道跟踪控制研究已经取得了比较满意的结果,且已广泛用于工业机器人的生产实际.然而,对于柔性机器人的轨道跟踪控制问题,却还仍处在发展阶段,原因之一是由于连杆柔性所产生的弹性变形将引起机器人终端执行器轨迹偏差增大并产生末端高频振动.为了抑制甚至消除柔性臂的末端振动,人们提出了各种控制方案,取得了一定的成效.

Yigit 曾经对柔性机器人系统的独立关节 PD 控制问题展开了研究,论证了系统的稳定鲁棒性,因而可以保证系统在受到有限摄动时仍然能够稳定工作^[24].

假设被控对象是由一刚一柔两根连杆组成的机器人,如图 1 所示,其中第二根柔性连杆假设可以用 Euler-Bernoulli 梁理论进行描述.于是,由扩充 Hamilton 原理,经整理可得如下运动方程及其边界条件^[24]:

$$\begin{aligned}
 & I_{1R}\ddot{\theta}_1 + I_k\ddot{\theta} + m_h l_1^2 \ddot{\theta}_1 + \int_0^{l_2} \rho \{ (a+x)^2 \ddot{\theta} + \ddot{w}(a+x) + l_1^2 \ddot{\theta}_1 + 2w\dot{w}\ddot{\theta} + w^2 \ddot{\theta} \\
 & + 2l_1(a+x)\dot{\theta}_1 \cos\theta_2 + l_1 \ddot{w} \cos\theta_2 - 2l_1(a+x)\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin\theta_2 - 2l_1 \dot{\theta}_1 w \sin\theta_2 \\
 & - l_1(a+x)\dot{\theta}_2^2 \sin\theta_2 - 2l_1 \dot{w} \dot{\theta}_2 \sin\theta_2 - 2l_1 w \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos\theta_2 - l_1 \dot{\theta}_2 w \cos\theta_2 \\
 & - \frac{1}{2}(l_2^2 - x^2 + 2al_2 - 2ax)w'^2 \ddot{\theta} - (l_2^2 - x^2 + 2al_2 - 2ax)w'\ddot{w}\ddot{\theta} \} dx = \tau_1, \quad (13) \\
 & I_k\ddot{\theta} + \int_0^{l_2} \rho \{ (a+x)^2 \ddot{\theta} + \ddot{w}(a+x) + 2w\dot{w}\ddot{\theta} + w^2 \ddot{\theta} + l_1(a+x)\dot{\theta}_1 \cos\theta_2 \\
 & - l_1 \dot{\theta}_1 w \sin\theta_2 + l_1 \dot{\theta}_1^2 (a+x) \sin\theta_2 + l_1 \dot{\theta}_1^2 w \cos\theta_2 - \frac{1}{2}(l_2^2 - x^2 + 2al_2
 \end{aligned}$$

$$-2ax)w'^2\dot{\theta} - (l_2^2 - x^2 + 2al_2 - 2ax)w'\dot{w}'\dot{\theta}|dx = \tau_2, \quad (14)$$

$$\rho(a+x)\ddot{\theta} + \rho\ddot{w} + \rho l_1\ddot{\theta}\cos\theta_2 - \rho w\dot{\theta}^2 + \rho l_1\dot{\theta}^2\sin\theta_2 + EIw'''' \quad (15)$$

$$- [\frac{1}{2}\rho\dot{\theta}^2(l_2^2 - x^2) + \rho\dot{\theta}^2a(l_2 - x)]w'' + \rho\dot{\theta}^2(x+a)w' = 0, \quad (15)$$

$$w(0, t) = 0; \quad w'(0, t) = 0; \quad w''(l_2, t) = 0; \quad w'''(l_2, t) = 0. \quad (16)$$

式中 $\theta = \theta_1 + \theta_2$.

独立关节 PD 控制选为

$$\begin{cases} \tau_1 = -K_p(\theta_1 - \theta_1^d) - K_D\dot{\theta}_1, \\ \tau_2 = -G_p(\theta_2 - \theta_2^d) - G_D\dot{\theta}_2. \end{cases} \quad (17)$$

式中 θ_1^d, θ_2^d 分别为 θ_1, θ_2 的期望终值, 增益值 K_p, K_D 和 G_p, G_D 均为正. 按(17)式所设计的 PD 控制规律将保证(13)~(16)所示系统稳定^[24].

作为 PD 控制器的推广, Paden 等提出一种 PR 控制器以控制柔性机器人的输出轨道. 现场试验结果表明这类 PR 控制器能够以一定精度跟踪预定轨道^[25].

最近, Yim 利用振型函数表达弹性连杆的挠度, 并利用状态空间表示形式得到一台由两根刚性连杆和一根柔性连杆组成的三连杆柔性机器人动力学模型为如下仿射非线性形式:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u. \quad (18)$$

式中 x 为状态向量, u 为关节力矩向量.

于是, 借助于微分几何中李代数的概念, Yim 给出了所论柔性机器人的逆 Cartesian 轨道跟踪控制策略并讨论了镇定器的设计问题^[26].

此外, Lucibello 和 Benedetto 等也讨论了柔性机器人的轨道跟踪控制问题^[27].

从振动抑制的效果来看, 上述控制方法都在一定程度上改善了一般柔性连杆机器人因连杆柔性所引起的连杆末端的振动作用. 为了进一步减少和抑制柔性机器人系统中连杆末端的高频振动, Cho 和 Park 以前馈方式引入一种输入整形方法, 通过恰当选择一组时变脉冲序列, 从而达到抑制振动模态的作用^[28].

3.2 反馈线性化

反馈线性化是非线性系统理论中一种受到广泛关注和高度重视的控制方法. 所谓“反馈线性化”, 就是研究通过非线性反馈或动态补偿的方法将非线性系统变换为线性系统, 然后再按线性系统理论完成系统的各种控制目标的一种理论与方法.

众所周知, 柔性机器人系统是一类高度非线性的系统, 其动力学模型往往是一组非线性积分-微分方程. 对柔性机器人进行反馈线性化控制, 一般可遵循以下步骤:

1) 将柔性机器人动力学模型通过适当方法简化成反馈线性化中最常用的仿射非线性模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i, \\ y = h(x). \end{cases} \quad (19)$$

式中 x 是状态向量, $u_i (i = 1, \dots, m)$ 是输入, y 是输出.

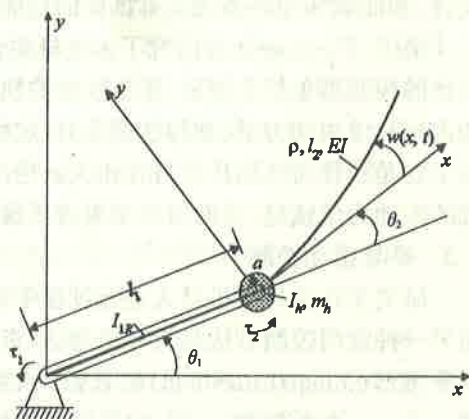


图 1 柔性机器人结构

2)寻找使系统(19)能够进行输入-状态或输入-输出反馈线性化的充分和必要条件,并判别之.

3)若满足可反馈线性化条件,则设计相应的动态反馈和控制器,实现对柔性机器人的反馈线性化控制.

Wang 和 Vidyasagar 曾讨论了含一根柔性连杆的多连杆机器人的反馈线性化问题^[29,30],论证了系统可输入-状态反馈线性化的充要条件.结果表明,对于所研究的一类柔性机器人,不能实现输入-状态反馈线性化,但可以实现输入-输出反馈线性化控制.

为了提高系统的控制性能和对参数变化的鲁棒性,Khorrami 和 Jain 提出了一种两阶段双环控制设计方法.第一阶段采用独立关节 PD 控制和非线性 0(1)反馈线性化控制律作为内环控制,第二阶段再以终端执行器的加速度作为输出反馈构成外环控制.外环控制器采用 LQR 设计,从而确保闭环系统具有良好的性能及其对参数变化的鲁棒性^[31].

最近,Vandegrift 等研究了多连杆柔性机器人连杆位置与速度的非线性跟踪控制问题,所设计的控制器包括三部分:基于模型的轨道发生器(trjectory generator),基于 i/o 反馈线性化的内环和使内动力学(如弹性振型)镇定的外环^[33].与以往同类研究相比,文[33]的主要贡献,在于它是选择与实际控制目标相关的输出而不是某个毫无物理意义的输出作为跟踪输出使系统的零动力学镇定,从而可以采用边界层校正使系统的内动力学镇定.

3.3 奇异摄动控制^[8,22,33~36]

研究柔性连杆在机器人运行过程中所产生的弹性变形对整个柔性机器人系统性能的影响的另一种常用控制方法是奇异摄动法.奇异摄动法用于柔性机器人控制时的思路之一是利用积分流形(integral manifold)的思想^[34],将系统的非线性偏积分-微分方程模型中包含挠度变量 $w(x, t)$ 和控制量 u 或 τ 的各项展成参数 ϵ 的幂级数并忽略所有 ϵ^2 以上各项(ϵ 充分小),从而得到真实流形的一个精确逼近,再据此设计慢控制策略和快控制策略.另一思路是直接利用奇异摄动法给出一种复合控制方式,其中的慢子系统等效于刚性连杆机器人系统,因而可以采用成熟的计算力矩法(computed torque method)进行控制,快子系统则由相应的快控制器进行镇定^[35,36].这种控制方法较之反馈线性化控制而言,其优越之处在于算法简单、思路清晰,可以大大减少考虑弹性结构时的计算工作量,且能获得较好的控制效果.

3.4 非线性补偿控制^[12,25,37~40]

近年来,机器人系统中的结构柔性已受到人们的广泛关注,尤其是对于高速运动的长连杆轻质机器人手臂的精确定位和跟踪,不仅要求控制各关节转角,而且必须设计适当的阻尼器以抑制柔性连杆的弹性振动.非线性补偿控制在其中起着十分重要的作用.

Castelazo 和 Lee 曾利用非线性反馈来控制柔性机器人的终端位置,在阶跃响应的起始段用状态反馈构造一个小阻尼系统,而当接近稳态位置时则设计为一个大阻尼系统,并按启发式方法调整相应的非线性反馈增益^[39],所得到的非线性补偿控制器可以获得比 LQG 方法设计的线性补偿控制器更快的响应速度.

然而,业已证明^[30]柔性机器人的动力学方程是不可输入-状态反馈线性化的,而且即使存在 i/o 反馈线性化,通过反馈所得到的柔性动力学也不是渐近稳定的.为此,有人提出采用状态观测器构成状态反馈来控制柔性机器人的输出行为,取得了较好的效果,系统最终可达到指数稳定^[30].

当考虑柔性机器人的重力及其影响时,由于柔性机器人动力学模型中所包含的重力项很难确定,因而给其调节与控制问题带来极大的不便.最近,Luca 和 Panzieri 提出了一种学习重

力补偿的迭代方法^[37]. 这种方法首先对关节水平的误差进行 PD 控制, 然后再迭代修改另一附加前馈项, 直至获得满意的调节效果为止. 在适当假设前提下, 该迭代算法是全局收敛的.

关于平移式 Cartesian 柔性机器人的控制问题, 国内外研究都相对较少. 最近, 宋谦等运用抽象 Hilbert 空间非线性算子半群理论研究了平移式 Cartesian 柔性机器人臂的非线性动态反馈控制问题^[38], 并证明了整个闭环系统的强渐近稳定性和指数稳定性.

3.5 自适应控制、鲁棒控制和变结构控制^[32, 36, 41~45]

以上介绍的各种控制方法, 都属于基于模型的方法. 当动力学模型中包含有结构或参数不确定性或外部扰动时, 控制效果将会受到不同程度的影响, 甚至导致系统不稳定. 为了处理这些不确定性或外部扰动, 人们自然会联想到采用自适应控制、变结构控制等鲁棒控制方法.

Lucibello 和 bellezza 曾提出一种间接自适应控制策略对双连杆柔性机器人臂进行非线性自适应控制. 由于研究对象属于非最小相位系统(其零动力学不稳定)且是高度非线性的(不可反馈线性化), 因而所得到的结果只是局部的^[41]. 最近, Khorrami 等考虑了多连杆柔性机器人的自适应输入预补偿与非线性控制问题, 提出了频域时变传递函数估计式(TTFE)和传递函数经验估计式(EFTE)两种系统辨识算法^[32]. 与以往大多数自校正控制算法中估计与控制分开进行不同, 这里所提出的包含输入预整形器(input preshaper)和非线性控制器的频域自校正控制算法可以同时进行估计和控制. 田彦涛等从另一个角度研究了柔性机械臂运动轨迹的鲁棒自适应控制策略, 采用极限控制和鲁棒自适应控制切换的方式来改善系统的性能, 但因仅选择一阶模态来考虑连杆的弹性变形, 控制精度自然要受到影响^[42].

在柔性机器人变结构控制方面, Madhavan 和 Singh 提出了一种控制双连杆柔性机器人终端执行器轨道的变结构系统算法, 对不确定性输出荷载具有较好的鲁棒性, 但未讨论如何消除或抑制变结构系统中常见的抖振现象^[43]. Aoustin 等对柔性机器人进行滑动模控制, 不仅给出了相应的变结构控制策略, 而且还讨论了抖振的抑制问题^[36]. 最近, 胡跃明、周其节和徐建闽针对柔性机器人手臂滑动模控制器设计中的鲁棒极点配置问题展开研究, 提出了非匹配条件下不确定参数变化时的鲁棒极点配置方法^[44], 通过恰当配置系统的极点达到改善控制、抑制振动、减少抖振的目的.

对比五种常用控制律在柔性机器人控制中的性能和效果, 可以得到表 1 所示结果^[36].

表 1 五种控制律性能比较

控 制 律	矩阵求逆	扰动的灵敏度	调节复杂性	柔性阻尼作用
PD 控制	NO	YES	*	YES
反馈线性化	YES	NO	*	NO
LQR + 扰动极小化	YES	NO	* * *	YES
奇异摄动	NO	—	* *	YES
滑动模控制	NO	NO	*	YES

3.6 模糊控制、神经控制和智能控制^[46~48]

迄今为止, 对柔性机器人的控制, 大多数都是采用传统的常规控制方法, 对智能控制方法的研究相对较少. 近年来, 模糊逻辑、神经网络和递阶结构等已经被用来研究柔性机器人的运动学和动力学, 以消除和减弱因动力学建模不准确所带来的固有控制误差. Kubica 和 Wang 曾

提出一种模糊控制策略,采用 PD 型推理规则和全状态反馈来控制单连杆柔性机器人臂的刚体运动和一阶挠曲振型^[46]. Moudgal 等则另辟蹊径,采取直接模糊控制和基于规则的专家控制构成双层递阶结构对双连杆柔性机器人进行控制,获得了很好的控制效果^[47].

在利用人工神经网络方法对柔性机器人手臂进行轨道跟踪控制方面, Yesildirek 等作了有益的尝试^[48]. 如文[33]所示,当选择某个有实际物理意义的输出信号作为跟踪信号时可以使系统内动力学镇定. 在此基础上,文[48]结合奇异摄动法和神经网络反馈线性化内环设计了一个柔性机器人手臂的跟踪控制器. 与其他神经网络控制器相比,其特点在于所采用的三层非线性网络结构能保证跟踪误差和控制信号有界,而不需离线学习和训练.

由于柔性机器人系统本身属于无穷维非线性分布参数系统,建模误差、参数不确定性和外部扰动等都将使其轨道跟踪、位置/力控制等控制行为受到影响. 为此,本文作者结合模糊逻辑控制和自适应控制方法对多连杆柔性机器人系统的位置/力控制问题进行了研究,取得了较好的控制效果^[49,50].

4 结束语

本文对柔性机器人动力学建模与控制领域的最新进展进行了综述与评价.

柔性机器人的动力学建模与控制问题是当前控制界研究的热点课题之一,近年来受到广泛关注. 我国《‘863’高技术发展纲要》“自动化”主题中,也明确规定机器人技术为我国优先发展的两大高技术之一. 然而,由于问题本身的复杂性和人们认识的局限性,对柔性机器人的研究还远未臻完善,尚有许多理论和应用方面的问题需要解决. 作者们认为,至少在以下两个方面还有待于进一步开展研究:

1) 柔性连杆机器人无穷维分布参数模型描述及其简化. 柔性连杆机器人是典型的非线性分布参数系统,因而可以采用非线性算子半群理论、微分几何理论、分析力学、偏微分方程等理论与方法建立柔性连杆机器人的无穷维分布参数模型,并利用有限维逼近理论和方法等得到相应的有限维集中参数模型,研究逼近模型和实际系统的逼近误差及其影响. 在这一方面,目前的研究成果还不多见.

2) 柔性机器人的智能控制. 由于柔性机器人的动力学模型非常复杂,基于模型的控制方法常常因建模不准(如未建模动力学、零动力学、结构和参数的不确定性等)而无法获得预期的控制效果. 因此,应大力开展基于知识的智能控制方法和结构的研究. 将模糊控制、神经网络、自适应控制、变结构控制以及遗传算法等理论与方法融合,利用神经网络对模糊规则的结构与参数同时进行学习与训练,同时在学习与训练过程中引入遗传算法进行优化,再对模糊控制器的结构进行重设计,以使柔性机器人的终端输出具有很好的鲁棒性、收敛性和稳定性等,正是作者们下一步努力的方向.

参 考 文 献

- 1 Abou-Hanna, J.J.. Dynamics and control of flexible manipulators. Ph.D. Dissertation, The Univ. of Alabama, 1986
- 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 Book, W.J.. Modeling, design, and control of flexible manipulator arms: a tutorial review. Proc. of 29th Conf. on Decision and Control, Honolulu, 1990, 500-506
- 5 Xi, F. and Fenton, R.G.. Coupling effect of a flexible link and a flexible joint. Int. J. of Robotics Research, 1994, 13(5):

443-453

- 6 吴祺泰. 振动力学. 杭州: 浙江大学出版社, 1989
- 7 洪善桃. 高等动力学. 上海: 同济大学出版社, 1990
- 8 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
- 9 Low, K. H. and Vidyasagar, M.. A Lagrangian formulation of the dynamic model for flexible manipulator systems. *ASME J. Dynam. Syst. Meas. and Contr.*, 1988, 110(2): 175-181
- 10 Matsuno, F., Asano, T. and Sakawa, Y.. Modeling and quasi-static hybrid position/force control of constrained planar two-link flexible manipulators. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 1994, 10(3):287-297
- 11 Matsuno, F. and Yamamoto, K.. Dynamic hybrid position/force control of a two degree-of-freedom flexible manipulator. *J. of Robotic Systems*, 1994, 11(5):355-366
- 12 Choi B. O. and Krishnamurthy, K.. Unconstrained and constrained motion control of a planar two-link structurally flexible robotic manipulator. *J. Robotic Systems*, 1994, 11(6):557-571
- 13 Yang, J., Xu, Y. and Chen, C. S.. Model reduction of flexible manipulators. *Int. J. of Robotics and Automation*, 1994, 9(4):199-204
- 14 Benati, M. and Morro, R.. Formulation of equations of motion for a chain of flexible links using Hamilton's principle. *ASME J. Dynam. Syst. Meas. and Contr.*, 1994, 116(1):81-88
- 15 Choi, S. B., Lee, H. B. and Cheong, C. C.. Compliant control of joint constrained flexible manipulators. *Proc. of ACC*, 1995
- 16 Krishnamurthy, K. and Yang, L.. Dynamic modeling and simulation of two cooperating structurally-flexible robotic manipulators. *Robotica*, 1995, 13:375-384
- 17 Chang, L. W. and Hamilton, J. F.. Dynamics of robotic manipulators with flexible links. *ASME J. Dynam. Syst. Meas. and Contr.*, 1991, 113(1):54-59
- 18 Xi, F. and Fenton, R. G.. On flexible link manipulators: modeling and analysis using the algebra of rotations. *Robotica*, 1994, 12(4):371-381
- 19 Paul, R. P.. Robot manipulators: mathematics, programming, and control. Cambridge: The MIT Press, 1981
- 20 Lin, J. and Lewis, F. L.. A symbolic formulation of dynamic equations for a manipulator with rigid and flexible links. *Int. J. Robotics Research*, 1994, 13(5):454-466
- 21 Xi, F. and Fenton, R. G.. A sequential integration method for inverse dynamic analysis of flexible link manipulators. *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Autom.*, 1993, 743-748
- 22 Lewis, F. L. and Vandegrift, M.. Flexible robot arm control by a feedback linearization/singular perturbation approach. *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Autom.*, 1993, 729-736
- 23 Eskandarian, A., Bedewi, N. E. and Kramer, B. M.. Dynamic modeling of robotic manipulators using an artificial neural network. *J. Robotic Systems*, 1994, 11(1):41-56
- 24 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
- 25 Paden, B. et al. Exponentially stable tracking control for multijoint flexible-link manipulators. *ibid*, 1993, 115(1):53-59
- 26 Yim, W.. Inverse Cartesian trajectory control and stabilization of a three-axis flexible manipulator. *J. of Robotic Systems*, 1994, 11(4):311-326
- 27 Lucibello, P. and Benedetto, M. D. D.. Output tracking for a nonlinear flexible arm. *ibid*, 1993, 115(1):78-85
- 28 Cho, J. K. and Park, Y. S.. Vibration reduction in flexible systems using a time-varying impulse sequence. *Robotica*, 1995, 13:305-313
- 29 Wang, D. and Vidyasagar, M.. Feedback linearizability of multi-link manipulators with one flexible link. *Proc. of 28th Conf. on DC*, Tampa, Florida, 1989, 2072-2077
- 30 Wang, D. and Vidyasagar, M.. Control of a class of manipulators with a single flexible link. Part I: Feedback Linearization, Part II: Observer-Controller. *ASME J. Dynam. Syst. Meas. and Contr.*, 1991, 113(4):655-668
- 31 Khorrami, F. and Jain, S.. Nonlinear control with end-point acceleration feedback for a two-link flexible manipulator:

- experimental results. *J. Robotic Systems*, 1993, 10(4):505-530
- 32 Khorrami, F., Jain, S. and Tzes, A.. Experimental results on adaptive nonlinear control and input preshaping for multi-link flexible manipulators. *Automatica*, 1995, 31(1):83-97
 - 33 Vandegrift, M. W., Lewis, F. L. and Zhu, S. Q.. Flexible-link robot arm control by a feedback linearization/singular perturbation approach. *J. of Robotic Systems*, 1994, 11(7):591-603
 - 34 Schoenwald, D. A. and Ozguner, U.. On combining slewing and vibration control in flexible manipulators via singular perturbations. *Proc. of 29th Conf. on DC*, Honolulu, 1990, 533-538
 - 35 Aoustin, Y. and Chevallereau, C.. The singular perturbation control of a two-flexible-link robot. *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, 1993, 737-742
 - 36 Aoustin, Y., Chevallereau, C., Glumineau, A. and Moog, C. H.. Experimental results for the end-effector control of a single flexible robotic arm. *IEEE Trans. Contr. Syst. Techn.*, 1994, 2(4):371-381
 - 37 Luca, A. D. and Panzieri, S.. An iterative scheme for learning gravity compensation in flexible robot arms. *Automatica*, 1994, 30(6):993-1002
 - 38 宋谦, 郭宝珠. 负载 Cartesian 柔性臂非线性反馈控制. *控制理论与应用*, 1995, 12(6):673-680
 - 39 Castelazo, I. A. and Lee, H.. Nonlinear compensation for flexible manipulators. *ASME J. Dynam. Syst. Meas. and Contr.*, 1990, 112(1):62-68
 - 40 Gogate, S. and Lin, Y. J.. Formulation and control of robots with link and joint flexibility. *Robotica*, 1993, 11:273-282
 - 41 Lucibello, P. and Bellezza, F.. Nonlinear adaptive control of a two link flexible robot arm. *Proc. of 29th Conf. on DC*, 1990, 2545-2550
 - 42 田彦涛, 尹朝万, 王殿方, 王大龙. 柔性机械臂运动轨迹的鲁棒自适应控制. *机器人*, 1995, 17(5):263-268
 - 43 Madhavan, S. K. and Singh, S. N.. Variable structure trajectory control of an elastic arm. *J. of Robotic Systems*, 1993, 10(1):23-44
 - 44 胡跃明, 周其节, 徐建闽. 柔性臂滑动模控制器设计中的鲁棒极点配置. *中国控制会议论文集*, 黄山, 1995, 1290-1296
 - 45 Korbllov, V. V.. Robust control of a flexible manipulator arm. Ph.D. Dissertation, Syracuse Univ., 1987
 - 46 Kubica, E. and Wang D.. A fuzzy control strategy for a flexible single link robot. *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, 1993, 237-241
 - 47 Moudgal, V. G et al. Rule-based control for a flexible-link robot. *IEEE Trans. on Contr. Syst. Techn.*, 1994, 2(4):392-405
 - 48 Yesildirek, A., Vandegrift, M. W. and Lewis, F. L.. A neural network controller for flexible-link robots. 1994 IEEE Int. Symp. on Intelligent Control, Columbus, Ohio, 1994, 63-68
 - 49 Fan, X. P., et al. Adaptive fuzzy control of constrained flexible-link manipulators. Submitted to "Control Theory and Applications".
 - 50 Fan, X. P., et al.. A new adaptive fuzzy control scheme with application to the position/force control of constrained flexible-link manipulators. in *Proc. of 1997 IEEE Conf. on Robotics and Automation*, New Mexico, April 22-24, 1997

Dynamic Modeling and Control of Flexible Robotic Manipulators

FAN Xiaoping, XU Jianmin and ZHOU Qijie

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

T. P. LEUNG

(The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, HK)

Abstract: In this paper, the recent advances in dynamic modeling of flexible-link robotic manipulators are surveyed, and several generally-used modeling techniques and dynamic models are discussed. Meanwhile, the control strategies and methods of flexible robotic manipulators with flexible links are evaluated, and development trends in

the study of dynamic modeling and control of flexible robots are finally pointed out.

Key words: flexible-link robotic manipulators; dynamic modeling; control; Lagrange equation; Hamilton's principle; finite-element method; singular perturbation; feedback linearization; fuzzy control

本文作者简介

樊晓平 1961年生.1982年1月、1984年9月分别在江西工学院电机工程系和长沙铁道学院电子工程系获工学学士、硕士学位.1995年12月至1996年12月在香港理工大学机械工程学系作访问研究.现为长沙铁道学院电子工程系副教授,华南理工大学自动控制工程系博士研究生,美国SIAM会员.目前的研究领域为自适应控制,鲁棒控制,智能控制,柔性机器人建模和运动控制等.

徐建闽 1960年生.1982年1月在江西工学院电机工程系获工学学士学位,1988年和1994年分别在华南理工大学自动化系获工学硕士和博士学位.现任华南理工大学交通学院副院长,教授.主要研究领域为自适应控制,鲁棒控制,智能控制,现代交通工程,CIMS,机器人控制等.

周其节 1930年.1955年哈尔滨工业大学研究生毕业.现为华南理工大学自动控制工程系教授,博士生导师.主要研究领域为非线性系统理论,自适应控制,变结构控制,小波分析,机器人控制等.

梁天培 1946年生.1967年毕业于香港大学机械工程系,此后分获香港大学硕士,伦敦大学哲学博士和清华大学工学博士学位.现任香港理工大学副校长,教授,香港工程师学会会长.主要研究兴趣为自动控制,CAD/CAM,专家系统,机器人及其控制等.