

文章编号: 1002-0446(1999)06-0455-10

平面双连杆受限柔性机器人臂的 自适应模糊力/位置控制

樊晓平¹ 徐建闽² 毛宗源² 周其节²

(1. 长沙铁道学院信息与控制工程研究所 长沙 410075;

2. 华南理工大学自动控制工程系 广州 510641)

摘要: 本文对一类平面双连杆受限柔性机器人的力/位置控制问题进行研究, 提出了一种新的自适应模糊控制方案. 利用结构分解技术对模糊推理系统进行简化, 用梯度法对参数进行自适应调整, 从而实现对受限柔性机器人系统末端的混合力/位置控制. 计算机仿真结果表明, 本文提出的控制方案是合理、有效的.

关键词: 柔性机器人; 受限运动; 自适应; 模糊控制; 力/位置控制

中图分类号: TP24 文献标识码: B

1 引言

近年来, 由于柔性连杆机器人的振动抑制和控制问题在机器高速定位、轻质空间飞行器设计与控制等应用中占有举足轻重的地位, 因而受到广泛的关注^[1-3]. 虽然已有许多处理此类问题的结果, 但其中的控制算法往往比较复杂, 且强烈地依赖于对实际物理系统的精确数学描述. 而实际上, 在大多数应用领域, 机器人一般都要求在环境扰动和可变荷载下运行, 这些不确定性因素势必使所对应的柔性连杆机器人控制器设计与综合问题变得更加复杂. 因此, 人们希望找到这样一种控制算法, 它即不需要对受控柔性机器人的精确的数学描述, 又能自动修正以适应环境的变化并处理相关的不确定性^[4-8].

基于以上分析, 本文提出一种新的模糊自适应控制方案, 并用于一台平面双连杆受限柔性机器人臂的混合力/位置控制, 同时利用计算机进行仿真实验, 以验证所提出的模糊自适应控制方案的有效性.

2 受限柔性机器人臂动力学模型

考察图 1 所示由两台电机驱动的平面双连杆受限柔性机器人系统, 其中约束面由下式描述:

$$\Phi(X, Y) = 0 \quad (1)$$

式中 (X, Y) 是惯性笛卡尔坐标变量. 图 1 中, θ_1 和 θ_2 分别是电机 1 和电机 2 的转角; $w(x_2, t)$ 为连杆 2 在时刻 t 和空间点 $x_2(0 < x_2 < L_2)$ 处的横向位移, 可用如下截断模态方程描述:

$$w(x_2, t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \sin \frac{i\pi x_2}{L_2} \quad (2)$$

基金项目: 国家自然科学基金和湖南省自然科学基金资助项目

收稿日期: 1998-05-05

式中 $q_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 是相应的广义坐标; n 是截断项数. L_1 和 L_2 分别是连杆 1 和连杆 2 的杆长.

由参考文献[9]和[10]的分析与推导知, 描述该类平面双连杆受限柔性机器人运动性态的动力学方程和柔性连杆的振动方程分别为:

$$\dot{x} = f_1(x, q, \dot{q}) + G_1(x, q, \dot{q})\tau \quad (3)$$

$$\ddot{x} = f_2(x, q, \dot{q}, \lambda) + G_2(x, q, \dot{q})\tau \quad (4)$$

$$\ddot{q} = -M_{22}^{-1}(M_{21}\ddot{\theta} + D_{21}\dot{\theta} + g_2) \quad (5)$$

式中 Lagrange 算子 λ 可通过机器人终端执行器上的力传感器测出轴向力 $Q(t)$ 而由下式求出:

$$\lambda = - \frac{Q(t)}{\left[\frac{\partial \Phi}{\partial X_t} \cos \theta_2 + \frac{\partial \Phi}{\partial Y_t} \sin \theta_2 \right]} \quad (6)$$

其它参数定义见文[9][10]各式, 而状态向量则定义为 $x = [\theta_1 \ \dot{\theta}_1]^T$.

显然, 在该刚性-柔性机器人系统中, 关节转角 θ_1 和 θ_2 是系统输出, 电机驱动力矩 τ 和 τ_2 是控制信号, 广义坐标 $q_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 则越小越好(振动抑制).

令 θ_1^d 和 θ_2^d 分别为转角 θ_1 和 θ_2 的期望值. 可以看到, 由约束方程(1), 受限柔性机器人系统的动力学模型(3)和(4)式中的关节转角 θ_1 和 θ_2 之间满足以下隐函数关系:

$$\theta_2 = \Omega(\theta_1) \quad (7)$$

这就意味着两者之间仅有一个变量是独立的. 因此, 就位置变量而言, 该受限柔性连杆机器人臂可简单地描述为一个单输出非线性系统.

尽管我们在建模过程中对该模型考虑的因素比较齐全, 模型精度也比较高, 但中间难免仍会存在一些不确定性因素. 换句话说, 在动力学模型(3)~(5)中, 函数向量 $f_1(x, q, \dot{q})$, $f_2(x, q, \dot{q})$ 和函数矩阵 $G_1(x, q, \dot{q})$, $G_2(x, q, \dot{q})$ 等并不能精确确定. 在这种情况下, 为了使得本文所讨论的一类平面双连杆受限柔性机器人系统的终端执行器具有较好的运动性态(位置跟踪和接触力控制), 我们必须设计一个新的鲁棒控制器, 以补偿系统中可能存在的这些不确定性影响.

3 受限柔性机器人模糊自适应控制器

图 2 是本文提出的新的模糊自适应控制器的系统结构图. 整个控制结构由一个性能量测块、模糊自适应控制器三步曲(模糊化、规则库、解模糊)和一个明晰控制器所组成. 正如我们在上一节所指出的, 被控对象(受限柔性机器人系统)终端执行器的位置可以仅用第一根连杆的关节转角 θ_1 来确定. 与此同时, 机器人终端执行器与接触面之间的接触力要求不能超过某一设定值. 因此, 在对该系统进行模糊自适应控制时, 必须同时考虑关节转角和接触力两方面的约束. 在图 2 中, 我们分别设定 θ_1^d 和 λ^d 作为系统的参考输入, 希冀通过自适应模糊逻辑控制作用后实现对柔性机器人系统的混合位置/力控制. 为此, 选取位置误差 e 、位置误差变化量 Δe 和等效接触力误差 de 作为整个控制系统的基本输入, 其中

$$e = \theta_1^d - \theta_1, \Delta e = \dot{\theta}_1^d - \dot{\theta}_1, de = \lambda^d - \lambda \quad (8)$$

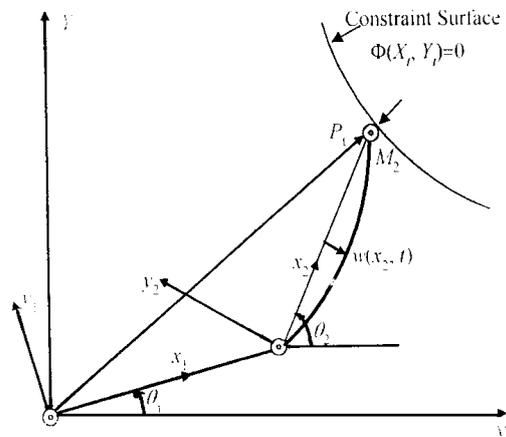


图 1 平面双自由度柔性机器人结构

式中 θ_1 是第一根连杆的关节转角, θ_1^d 是 θ_1 的期望值, 是相应于约束方程的 Lagrange 乘子, λ^d 是 λ 的期望值. 该闭环系统各环节的功能和设计步骤将在以下各小节结合图 2 详加说明和阐述.

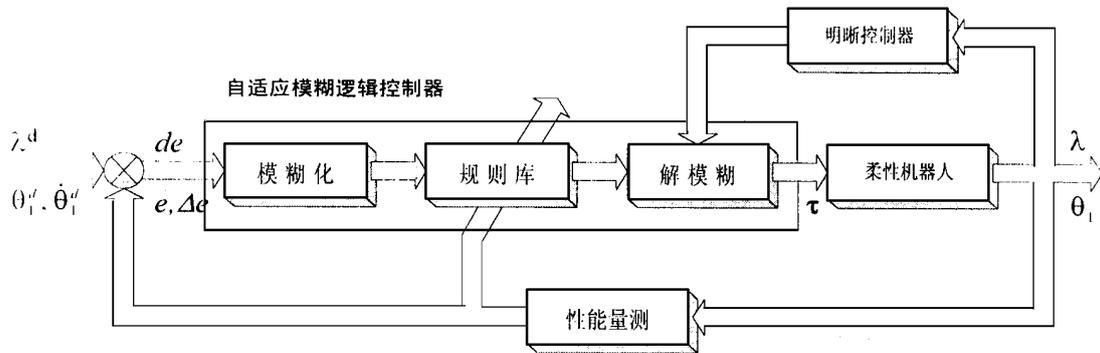


图 2 柔性机器人闭环自适应模糊控制系统

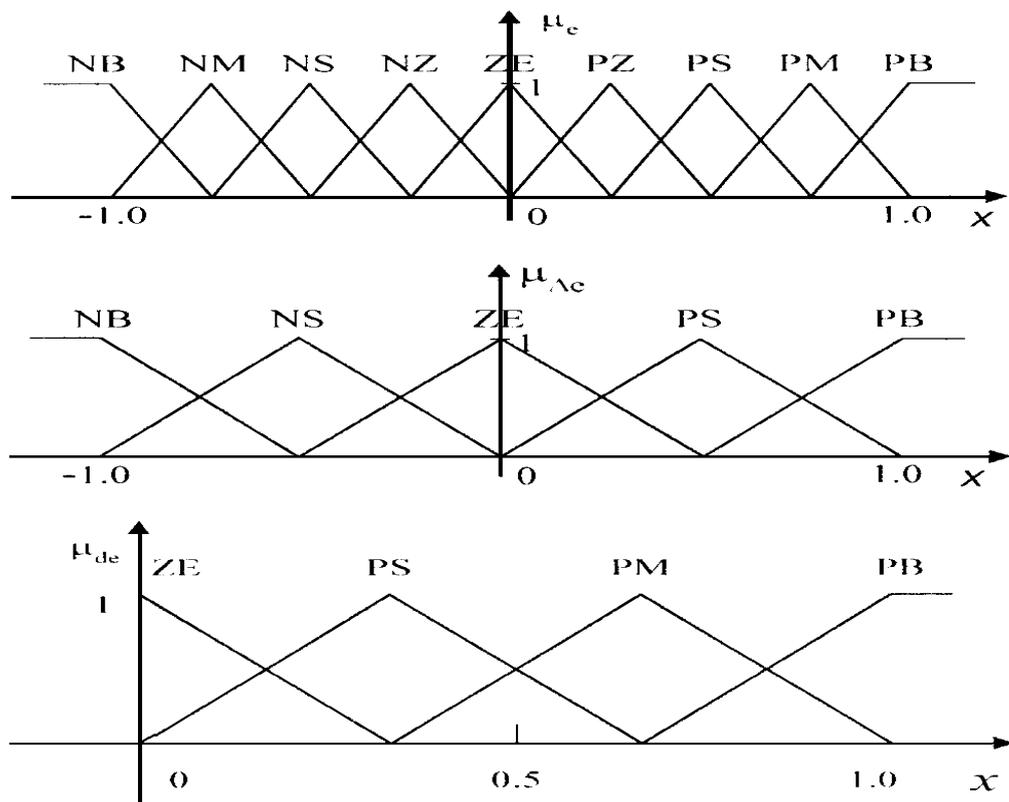


图 3 各输入子集 $e, \Delta e$ 和 de 的模糊隶属函数

3.1 模糊化

在模糊控制应用中, 模糊化主要处理以自然语言表达专家经验时所出现的含糊现象和不精确性, 这在处理客观或主观不确定性信息时具有十分重要的作用. 一般而言, 模糊系统往往由一组基于先验知识的语句描述. 这些语言术语总是以条件语句“IF- THEN”的形式表达, 其

意义则由模糊集或模糊子集所框定. 因此, 输入空间必须模糊化为一些语言组(称为论域内模糊子集). 这项工作可由模糊化器来完成, 它要求给每一语言组设定一个隶属函数并对某一特定的输入值进行评价.

为进行模糊化, 必须确定各模糊子集的隶属函数. 因为三角形的隶属函数形状简单、易于计算, 且与其它较复杂的隶属函数得出的控制结果差别甚小, 故被广泛应用^[11]. 为此, 我们也将各输入子集设定为三角形隶属函数, 如图3所示. 因此, 对于输入变量 e 和 Δe , 其对应的语言术语集定义为:

$$T_E(e) = \{NB, NM, NS, NZ, ZE, PZ, PS, PM, PB\} \quad (9)$$

$$T_{\Delta E}(\Delta e) = \{NB, NS, ZE, PS, PB\} \quad (10)$$

而接触力误差信号 de 对应的语言术语集则定义为:

$$T_{DE}(de) = \{ZE, PS, PM, PB\} \quad (11)$$

式中 $T_E(\cdot)$ 、 $T_{\Delta E}(\cdot)$ 和 $T_{DE}(\cdot)$ 分别记为 e 、 Δe 和 de 的术语集, 自变量的取值则覆盖规则适用的范围. 一般情况下, 常常须预先进行标么化处理, 即各乘上一个比例因子, 变为在 $[-1, 1]$ 或 $[0, 1]$ 范围内取值, 如图3所示. 为标记简单, 我们仍用原变量表示标么化值. 由于接触力控制一般都要求其不超过某一预先指定的值, 否则可能导致工件或设备等的损坏, 所以, 根据 de 的定义, 我们将其术语集限定在正值范围以内.

模糊控制器的各输出子集亦采用三角形隶属函数, 其术语集则定义为

$$T_{U_1}(\tau_1) = T_{U_2}(\tau_2) = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\} \quad (12)$$

即各包含7个元素. 输出子集也可利用量程转换作标么化处理.

3.2 规则库

如前所述, 先验知识通常都可以用“IF-THEN”规则形式表示, 这在模糊逻辑中很容易用模糊条件语句来实现. 所有以模糊条件语句形式表达的模糊控制规则的全体就构成模糊逻辑控制器的规则库或规则集.

从本质上说, 模糊逻辑为处理基于规则系统中的不确定性提供了一门测度理论^[2, 12]. 因此, 解析性的和启发式的专家知识可以利用如下模糊乘积规则嵌入到相应的模糊系统中:

$$\text{Rule } R^i: \text{ IF } e \text{ is } A_{i1} \text{ and } \Delta e \text{ is } A_{i2} \text{ and } de \text{ is } A_{i3} \text{ THEN } \tau_1 \text{ is } U_{i1} \text{ and } \tau_2 \text{ is } U_{i2} \quad (13)$$

或以模糊关系表示为

$$R = \bigcup_{i=1}^N [(A_{i1} \times A_{i2} \times A_{i3}) \rightarrow (U_{i1} \times U_{i2})] \quad (14)$$

式中 $i=1, 2, \dots, N$, N 是模糊规则数; e , Δe , de , τ_1 和 τ_2 分别是定义在论域 E , ΔE , DE , U_1 和 U_2 上的语言变量; A_{i1} , A_{i2} 和 A_{i3} 分别是语言术语集 $T_E(\cdot)$ 、 $T_{\Delta E}(\cdot)$ 和 $T_{DE}(\cdot)$ 的元素(即 PB , PS , 等); U_{i1} 和 U_{i2} 分别是控制信号 τ_1 和 τ_2 的语言变量.

由(13)式可以看到, 该模糊逻辑系统是一个多输入多输出(MIMO)系统. 由于直接建立多变量模糊控制器的控制规则非常困难, 且模糊控制规则的维数会很高, 必须采用降维处理, 进行结构分解. 取图4所示的结构分解形式^[13, 14], 则(14)式的模糊控制关系可以表示为

$$U_j = \bigcap_{k=1}^3 U_{kj}, \quad j = 1, 2 \quad (15)$$

$$U_{kj} = A_k R_{kj}, \quad k = 1, 2, 3; \quad j = 1, 2 \quad (16)$$

式中 $A_k(k=1, 2, 3)$ 是某时刻的输入信号(分别对应于 e , Δe 和 de), 而

$$R_{kj} = \bigcup_{i=1}^N (A_{ki} \rightarrow U_{ji}),$$

$$k = 1, 2, 3; j = 1, 2$$

是分解后的二维模糊关系。

上述结构分解后的形式也可以写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}^T = [A_1 \ A_2 \ A_3] * \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \\ R_{31} & R_{32} \end{bmatrix}$$

式中“*”代表“ $\cap - \circ$ ”运算。

可以看到, 原来 5 维的元素个数为 $(9 \times 5 \times 4 \times 7 \times 7 = 8820)$ 的模糊关系 R , 分解后包括 6 个二维的分模糊关系 $R_{kj}(k=1, 2, 3; j=1, 2)$, 其总的元素个数只有 $(9+5+4) \times (7+7) = 252$, 即原来非常庞大的规则库经过结构分解后被大大简化了。这样, 对于每一条模糊规则, 在模糊集 U_1 内的输出 τ_1 的隶属值可以利用“和-积”关系进行计算, 其集合论形式为:

$$\mu_{U_1}^i(\tau_1) = \frac{\mu_E^i(e) \times \mu_{\Delta E}^i(\Delta e) \times \mu_{DE}^i(de)}{\sum_{j=1}^M \mu_E^j(e) \times \mu_{\Delta E}^j(\Delta e) \times \mu_{DE}^j(de)} \quad (19)$$

式中 $i=1, 2, \dots, M$, M 是通过结构分解后的总规则数; $\mu_E^i(e)$, $\mu_{\Delta E}^i(\Delta e)$ 和 $\mu_{DE}^i(de)$ 分别是对应于第 k 条规则在输入集 $E, \Delta E$ 和 DE 中的输入变量 $e, \Delta e$ 和 de 的隶属度。对于模糊集 U_2 内的输出 τ_2 的隶属值可以类似得到。

由于“和-积”关系是系统参数隶属值的函数, 且隶属函数本身是连续的, 因而其关于系统参数是连续的。因此, 如果系统参数随时间平滑变化, 则该模糊自适应控制器的控制输出也是关于时间连续的。

3.3 解模糊

解模糊是模糊化的逆过程, 它将模糊推理得到的控制作用的模糊集转化为执行机构所能接受的明晰值或精确量。由于在对系统进行在线控制时, 只有确定性信号或称明晰信号(crisp signals)才能直接施加到控制对象上, 所以解模糊在进行模糊逻辑控制时是十分必要的。此时, 必须根据规则库或知识库确定相应的确定性控制信号。为了将自适应性嵌入到解模糊过程中, 我们在闭环系统中增加了一个“明晰控制器”, 如图 2 所示。假设明晰输出是子控制器输出和规则真值 p_i (亦称适用度或置信度) 的函数。显然, 这些真值是系统参数的函数。

为了得到明晰控制信号, 采用重心法进行解模糊:

$$\tau_i = \frac{\sum_{i=1}^M \rho_i u_i}{\sum_{i=1}^M \rho_i} \quad (20)$$

式中 M 是简化后总的规则数, ρ_i 是输入对应于第 i 条规则的真值, 由下式给出:

$$\rho_i = \mu_E^i(e) \times \mu_{\Delta E}^i(\Delta e) \times \mu_{de}^i(de) \quad (21)$$

其中 $\mu_E^i(\cdot)$, $\mu_{\Delta E}^i(\cdot)$ 和 $\mu_{DE}^i(\cdot)$ 分别是集合 $E, \Delta E$ 和 DE 中输入变量 $e, \Delta e$ 和 de 的隶属值, τ_i 则是控制信号 τ_i (语言变量) 的明晰值。

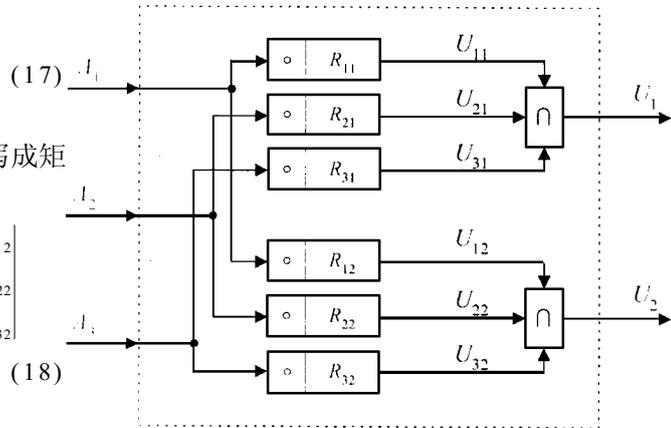


图 4 多变量模糊逻辑控制器的结构分解示意图

定义 1 定义系统的模糊基函数为

$$\zeta_i = \frac{\rho_i}{\sum_{j=1}^M \rho_j} = \frac{\mu_{\dot{e}}^i(e) \times \mu_{\Delta e}^i(\Delta e) \times \mu_{de}^i(de)}{\sum_{j=1}^M \mu_{\dot{e}}^j(e) \times \mu_{\Delta e}^j(\Delta e) \times \mu_{de}^j(de)} \quad (22)$$

可以看到, 模糊基函数实际上就是该模糊逻辑系统输出信号相应于第 i 条规则的隶属函数. 于是, 利用模糊基函数的概念, (20) 式又可以写成

$$\tau_i = \sum_{j=1}^N \zeta_j u_j = \zeta^T u \quad (23)$$

式中 $\zeta = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_N]^T$ 称为回归向量或基向量, $u = [u_1, u_2, \dots, u_M]^T$ 是明晰控制器输出向量.

如前所述, 由于在规则库中采用了“和-积”关系, 由重心法进行解模糊所产生的输出也将是该模糊控制器各输入变量的连续函数.

3.4 明晰控制器

为简化设计过程, 我们选择明晰控制器的输出为

$$u_i = \alpha_i e + \beta_i \Delta e + \gamma_i de + v_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (24)$$

式中 α_i, β_i 和 $\gamma_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 是待定常数, v_i 的取值与机器人末端执行器的位置有关.

令 i 分别取 $1, 2, \dots, N$, 则 (24) 式可以写成如下紧凑形式:

$$u = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_N & \beta_N & \gamma_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \Delta e \\ de \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix} = \Psi \bar{e} + v \quad (25)$$

式中: $\bar{e} = [e \ \Delta e \ de]^T$ 是系统的广义误差向量; $v = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_N]^T$ 是与机器人末端期望位置有关的参数向量, 可按后面介绍的方法确定; Ψ 是待定系数矩阵, 其定义为:

$$\Psi = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_N & \beta_N & \gamma_N \end{bmatrix} \quad (26)$$

将(25)式代入(23)式, 有

$$\tau_i = \zeta^T u = \zeta^T (\Psi \bar{e} + v) \quad (27)$$

通过化简, 上式又可进一步写成

$$\tau_i = \zeta^T \alpha e + \zeta^T \beta \Delta e + \zeta^T \gamma de + \zeta^T v \quad (28)$$

式中各参数向量分别定义为:

$$\alpha = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_N]^T \quad (29)$$

$$\beta = [\beta_1 \ \beta_2 \ \dots \ \beta_N]^T \quad (30)$$

$$\gamma = [\gamma_1 \ \gamma_2 \ \dots \ \gamma_N]^T \quad (31)$$

可以看到, 当所有误差都趋于零, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta e(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} de(t) = 0$, 时, 我们有 $\tau_i = \zeta^T v = \tau_i^d$, 式中 τ_i^d 是对应于理想输出位置和理想接触力时电机 1 的控制力矩. 由此便可确定参数向量 v .

为了确定上述其它各参数向量, 定义系统的综合误差为

$$\hat{e} = k_1 e^2 + k_2 (de)^2 \quad (32)$$

式中 $k_1 > 0, k_2 > 0$ 是误差权系数, 其作用有二: 一是将位置误差和力误差统一用一个加权误差指标来综合; 二是进行无量纲处理. 于是, 以上各参数向量可以按梯度下降法进行自适应调整:

$$\alpha(t+1) = \alpha(t) - \Gamma \left. \frac{\partial \hat{e}}{\partial \alpha} \right|_{\alpha = \alpha(t)} \quad (33)$$

$$\beta(t+1) = \beta(t) - \Gamma \left. \frac{\partial \hat{e}}{\partial \beta} \right|_{\beta = \beta(t)} \quad (34)$$

$$\gamma(t+1) = \gamma(t) - \Gamma \left. \frac{\partial \hat{e}}{\partial \gamma} \right|_{\gamma = \gamma(t)} \quad (35)$$

式中 t 为迭代修正序号, Γ 为控制调整速度的参数. 各参数迭代初值的选取应格外小心, 因为梯度下降法对初值的关联性很强.

3.5 性能量测

所谓性能量测, 一般包含两方面的内容: 一是利用一组传感器(如应变片等)对被控对象的输出进行测量并对所测得的数据进行滤波和处理, 或者在无法进行直接测量时, 借助于状态观测器或输出观测器来估计系统的输出^[15]; 二是确定系统的性能指标并(在线)计算之. 就本文所建立的自适应模糊控制器而言, 性能量测块的主要工作是测量机器人的末端位置及其速度和末端与约束面之间的接触力, 并计算出相应的误差(广义误差和综合误差). 利用得到的误差信号, 通过恰当地选择参数初值, 可计算出各规则的适用度及其参数调整因子, 从而实现上述自适应模糊逻辑控制方案.

3.6 附注

从整个模糊控制系统的结构上看, 本文提出的自适应模糊逻辑控制器在一定程度上类似于高木-菅野(Takagi-Sugeno)模糊系统. 由于高木-菅野模糊系统的输出是数据信息, 且为各输入变量的函数形式, 因而可以表达更精致的系统特性^[24]. 与此相比, 这里提出的自适应模糊逻辑系统由于引入了新的明晰控制器, 且与系统规则的真值(适应度)和模糊系统的输入建立了直接的联系, 使得模糊控制器的输出不但能够反映模糊控制规则的影响, 而且能够反映整个闭环控制系统的输出对规则库的修正作用, 因而具有更强的鲁棒性和自适应性. 众所周知, 任何控制系统要能正常工作, 必须首先确保系统的稳定性. 在系统结构或参数变化较大或外部扰动信号较强的情况下, 还要保证系统的鲁棒稳定性(Stability Robustness). 为此, 我们也有必要分析上述自适应模糊逻辑系统的稳定性. 由于在整个控制过程中, 控制规则是朝着减少系统误差的方向调节, 而引入明晰控制器的目的是在解模糊时充分利用输出误差信号及其变化量的信息来调整控制器参数, 使得整个闭环系统的综合误差逐步减小直至收敛到零. 因此, 从上述定性分析看, 该闭环系统是渐近稳定的. 而更详细的定量分析, 则留待进一步研究.

4 计算机仿真

为检验上述模糊自适应控制结构的可行性, 我们对一台平面双连杆柔性机器人进行计算机仿真计算. 要求该机器人的终端执行器在约束表面上以希望速度沿预定轨道运行, 且沿约束表面法线方向的接触力保持为希望值. 为此目的而设定的机器人参数如表 1 所示.

设约束面为一条直线 $Y = AX + B$, 式中 A 和 B 是给定常数. 如此选定的约束方程可以避免出现奇异结构. 在实际仿真中, 我们取 $A = -1, B = 3$. 于是, 对应于式(1)的约束条件变为

$$\begin{aligned} \Phi(\theta_1, \theta_2) &= L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 - 3 \\ &= 1.2(\sin \theta_1 + \cos \theta_1) + 2.0(\sin \theta_2 + \cos \theta_2) - 3 = 0 \end{aligned} \quad (36)$$

因而容易得到(42)式所对应的隐函数为:

$$\theta_2 = \Omega(\theta_1) = \sin^{-1} \left| \frac{3 - 1.2(\sin\theta_1 + \cos\theta_1)}{2} \right| - \frac{\pi}{4} \quad (37)$$

或

$$\theta_2 = \Omega(\theta_1) = \frac{3\pi}{4} - \sin^{-1} \left| \frac{3 - 1.2(\sin\theta_1 + \cos\theta_1)}{2} \right| \quad (38)$$

式中 $\theta_1 \in (-0.684, 2.255)$. 显然, 以上两式总是成立的, 即不可能出现奇异现象.

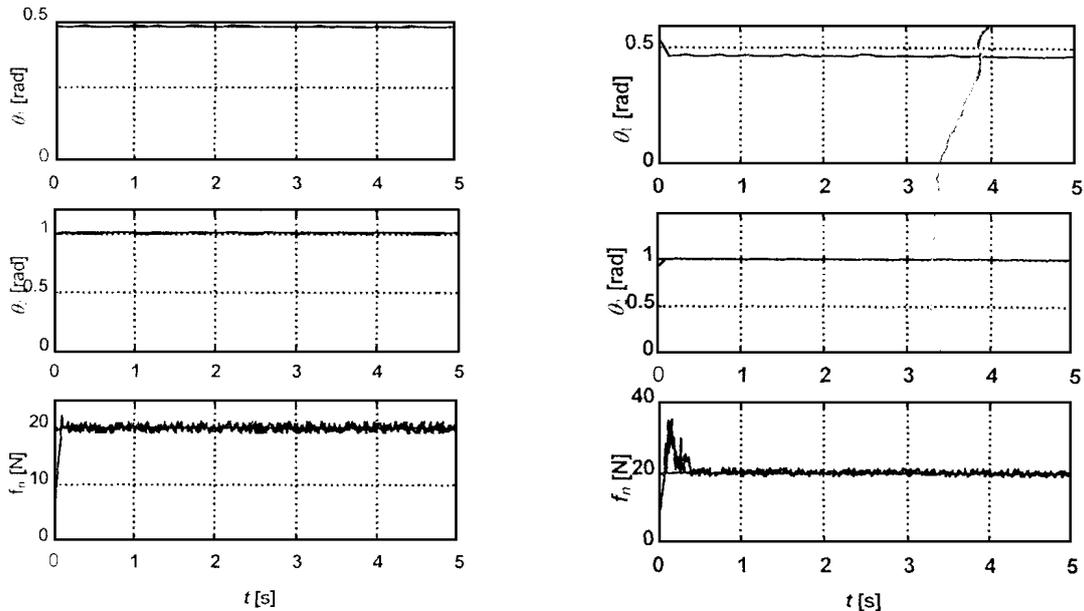
表 1 平面双连杆柔性机器人参数

参 数	连 杆 1	连 杆 2
杆 长	$L_1 = 1.2\text{m}$	$L_2 = 2.0\text{m}$
转动惯量	$J_1 = 1.0\text{kgm}^2$	$J_2 = 0.1\text{kgm}^2$
质量密度	$\rho_1 = 2.0\text{kg/m}$	$\rho_2 = 1.0\text{kg/m}$
连杆刚度		$E_I = 200\text{kgm}^2$
集中质量		$M_2 = 0.5\text{kg}$

从(6)式, 可求得系统的 Lagrange 算子为

$$\lambda = - \frac{Q(t)}{\cos\theta_2 + \sin\theta_2} \quad (39)$$

为了对状态 e , Δe 和 de 进行模糊化处理, 我们将论域 E , ΔE 和 DE 分别取为 $e \in E = [-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}]$, $\Delta e \in \Delta E = [-5, 5]$, $de \in DE = [0, 20]$.



(a) 无初始位置误差

(b) 有初始位置误差

图 5 希望速度为零时的瞬态响应

模糊逻辑控制系统中明晰控制器各参数的初值分别选为:

$$\alpha(0) = [1.5 \quad 1.5 \quad \dots \quad 1.5]^T, \beta(0) = [3.5 \quad 3.5 \quad \dots \quad 3.5]^T, \gamma(0) = [1.8 \quad 1.8 \quad \dots \quad 1.8]^T$$

经过结构分解后, 系统的模糊规则总数调整为 120 条. 相对来说, 这仍然是一个比较庞大的规则库.

图 5 给出了希望速度为零时的仿真结果. 图 5(a) 是无初始位置误差的反馈系统在机器人末端固定、预期接触力为 $f_{nd} = 20(N)$ 时 $\theta_1(t)$, $\theta_2(t)$ 和 $f_n(t)$ 的瞬态响应曲线. 显然, 接触力的控制精度很高. 图 5(b) 则给出了机器人终端执行器与约束表面之间存在初始位置误差(4cm)时反馈系统的瞬态响应结果.

图 6 分别是在希望末端速度为 $2.1(\text{cm/s})$ 、预期接触力为 $f_{nd} = 20(N)$ 时无初始跟踪误差和有初始位置误差(4cm)情况下 $\theta_1(t)$, $\theta_2(t)$ 和 $f_n(t)$ 的瞬态响应结果.

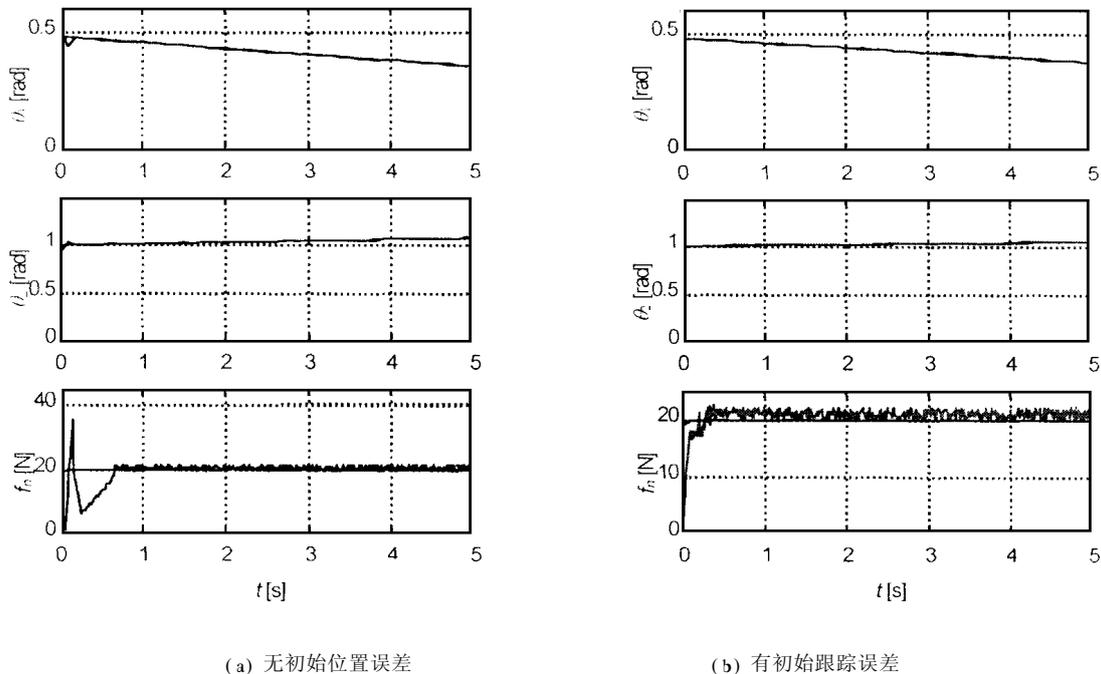


图 6 希望速度为 2.1 cm/s 时的瞬态响应.

从仿真结果看, 虽然计算工作量较大, 但所得到的控制效果很好. 而且系统在存在较大初始误差时, 系统仍然具有很好的控制精度, 表明系统具有很高的鲁棒性.

5 结论

本文提出一种用于受限柔性机器人末端位置/力控制的新的模糊自适应控制结构. 该控制系统由性能量测块、自适应模糊控制器三步曲和明晰控制器等所组成. 采用三角形模糊隶属函数和重心法分别进行模糊化和解模糊, 然后对该自适应模糊控制器进行了详细设计. 为了简化模糊推理系统, 在模糊规则库的设计过程中引入了结构分解技术. 同时, 在整个闭环系统中首次加入了比例-微分(PD)型的明晰控制器, 并对控制器参数进行了自适应调整. 整个自适应模糊逻辑控制系统具有类似于高木-菅野(Takagi-Sugeno)的模糊系统结构, 因而也能够表达精致的系统特性. 由于受限柔性机器人的混合位置/力控制问题本身的极端复杂性, 利用本文设

计的自适应模糊逻辑控制系统,虽然计算工作量比较大,但能够很好地实现机器人终端执行器的混合力/位置控制.另外,由于模糊控制对受控对象的动力学模型要求不高,所以该控制方案还具有很好的鲁棒性和较高的智能.数值仿真结果表明,本文新提出的自适应模糊控制方法具有良好的性能和效果.

参 考 文 献

- 1 Book W J. Modeling, Design and Control of Flexible Manipulator Arms: A Tutorial Review. Proc. 29th IEEE Conf. on Decision and Control. Honolulu, HI., 1990, 500- 506
- 2 樊晓平,徐建闽,周其节,梁天培. 柔性机器人的动力学建模及其控制. 控制理论与应用, 1997, 14(3): 318- 329
- 3 Fraser A R, Daniel R W. Perturbation Techniques for Flexible Manipulators. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991
- 4 Lucibello P, Bellezza F. Nonlinear Adaptive Control of a Two Link Flexible Robot Arm. Proc. 29th Conf on Decision and Control. Honolulu, HI., 1990, 2545- 2550
- 5 Khorram i F, Jain S, Tzes A. Experimental Results on Adaptive Nonlinear Control and Input Preshaping for Multi- link Flexible Manipulators. Automatica, 1995, 31(1): 83- 97
- 6 Archiniegas J I, Eltim sahy A H, Cios K J. Fuzzy Inference and the Control of Flexible Robotic Manipulators. Proc. 1993 Inter. Sym p. on Intelligent Control, Chicago, IL., 1993, 250- 25
- 7 Kubica E, Wang D. A Fuzzy Control Strategy for a Flexible Single Link Robot. Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation, Atlanta, 1993, 2: 234- 241
- 8 Lee C C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-part I & Part II. IEEE Trans. Automat. Contr., 1990, 20(2): 404- 418 & 419- 433
- 9 樊晓平,颜全胜,徐建闽等. 平面双连杆受限柔性机器人臂的动力学建模. 控制理论与应用, 1998, 15(6): 933- 938
- 10 樊晓平,徐建闽,毛宗源,周其节. 平面双连杆受限柔性机器人臂的模型简化及其控制. 高技术通讯, 1998, 8(10): 15- 20
- 11 赵振宇,徐用懋. 模糊理论和神经网络的基础与应用. 北京:清华大学出版社 & 广西科学技术出版社, 1996
- 12 Zadeh L A, Kacprzyk J. Fuzzy Logic for the Management of Uncertainty. New York: Wiley-Interscience, 1992
- 13 张曾科. 模糊数学在自动化技术中的应用. 北京:清华大学出版社, 1997
- 14 Gupta M M, Kiszka J B, Trojan G M. Multivariable Structure of Fuzzy Control System. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics. 1986, 17(5)
- 15 Wang D, Vidyasagar M. Control of a Class of Manipulators with a Single Flexible Link. Part II: Observer-Controller. ASME J. Dynam. Syst. Meas. and Control. 1991, 113(4): 662- 668
- 16 张昊. 电力调度自动化系统及电力负荷智能化预测方法的研究. 博士学位论文. 广州:华南理工大学, 1997

ADAPTIVE FUZZY POSITION/FORCE CONTROL FOR A PLANAR TWO-LINK CONSTRAINED FLEXIBLE MANIPULATOR

FAN Xiao-ping¹ XU Jian-min² MAO Zong-yuan² ZHOU Qi-jie²

(1. Institute of Information and Control Engineering, Changsha Railway University 410075;

2. Dept. of Automatic Control Eng., South China Univ. of Tech., Guangzhou 510641)

Abstract: In this paper, a class of planar two-link constrained flexible manipulators is discussed and a new adaptive fuzzy logic control scheme is presented to control the tip position and the contact force of the manip-

ulators. Structural decomposition technique is utilized to simplify the MIMO fuzzy inference system, and gradient descent method is adopted to adjust the system parameters adaptively. Computer simulation results demonstrate that this new control scheme is reasonable and effective.

Keywords: Flexible-link manipulators; constrained motion; adaptive control; fuzzy logic; position/force control.

作者简介:

樊晓平 (1961-), 男, 博士. 研究领域: 自适应控制、鲁棒控制、柔性机器人建模与控制、智能控制、CIMS 等.

徐建闽 (1960-), 男. 研究领域: 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.

毛宗源 (1936-), 男, 教授、博士生导师. 研究领域: 工业自动化、模糊控制、神经网络、智能控制等.

(上接第 441 页)

planning. This technique overcomes the defects of potential field methods (as well as early virtual force field methods), i. e., the loss of some valuable information of the distribution of obstacles caused by the fact that all information was compressed into a single resultant force. This method improved the reliability of local trajectory planning of an autonomous land vehicle.

Keywords: Autonomous land vehicles; local trajectories planning; discrete event system; multiagents

作者简介:

刘传才 (1964-), 博士. 研究领域: 基于传感器的机器人控制、模式识别、过程控制和智能计算.

杨静宇 (1943-), 教授. 研究领域: 智能机器人、模式识别、信息融合.