

T-S 模糊模型变结构的机器臂轨迹跟踪控制^①

王宪, 盛巍, 宋书林, 平雪良

(江南大学, 轻工过程先进控制教育部重点实验室无锡, 214122)

摘要: 针对不确定性的机械臂轨迹跟踪问题, 结合滑模变结构和 T-S 模糊模型的优点, 给出一种基于 T-S 模糊模型的变结构轨迹跟踪的方法。首先采用 T-S 模型建模, 得到机械臂的模糊模型; 然后设计出保证机械臂全局渐近稳定的滑模控制器。仿真结果表明, 所设计的模糊变结构控制器与普通变结构控制器相比, 可使机械臂无论在计算时间、误差上都具有更大的优势和更强的鲁棒性。

关键词: 非线性系统; 模糊控制; 滑模控制;

T-S Fuzzy Model Variable Structure Tracking Control of Robot

WANG Xian, SHENG Wei, SONG Shu Lin, PING Xue Liang

(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry Ministry of Education (Jiangnan University), Wuxi, 214122, China)

Abstract: Uncertainty of the robot arm for the trajectory tracking problem, combined with sliding mode and TS fuzzy model has the advantage, given TS fuzzy model based on variable structure tracking methods. First, the use of TS modeling, to be arm's fuzzy model; and then design a robot arm to ensure global asymptotic stability of sliding mode controller. Simulation results show that the design of the fuzzy variable structure controller with an ordinary variable structure controllers, enable robotic arm in terms of computing time, the error on has a greater advantage and more robust.

Key words: Nonlinear systems; fuzzy control; sliding mode control

1 引言

机器人轨迹跟踪控制的主要目的是通过给定各关节的驱动力矩, 使得机器人的位置、速度等状态变量跟踪给定的理想轨迹[13]。传统控制方法大都在被控对象数学模型确定、定量化的前提下, 却难以对复杂的、非线性的不确定系统进行有效而又精确的控制。智能控制的出现为解决此类问题提供了新的思路。文献[1]提出了针对非线性系统的模糊自适应控制理论, 为不确定性系统的控制提供一种可行的控制策略; 文献[2-5, 11-13]等都 对文献[1]方案进一步改进, 取得了多方面进展, 但是这些方法都存在一定的问题, 如: 传统的滑模控制(SMC)^[5-6]因其在滑动模态对系统干扰和扰动具有鲁棒性而得到重视, 但高频抖动的问题,

以及输出力矩和跟踪误差精度上也有待提高; 文献[11]在文献[12]的基础上将滑模控制与饱和函数有机结合, 但是在追踪时间和误差上都有待商榷。据此分析, 为了避免传统非线性控制器设计方法中迭代计算中近似值以及计算负担增加的问题, 提高伺服控制器对于追踪误差和输出力矩上的控制精度, 同时针对所需求的精确性使用适当选取的 T-S 模糊模型来近似原始非线性模型时, 产生一些额外的系统不确定性(uncertainty)。本文提出一种结合 T-S 模糊模型与变结构控制的控制器设计方法, 这种控制器容易实现且不需要去解 Jacobi 方程式或不等式, 同时运用 T-S 模糊模型的优点(计算快速)来减轻计算上的负担; 通过仿真并利用两轴机器臂的模拟来验证算法的正确性。

① 收稿时间:2011-05-26;收到修改稿时间:2011-07-02

2 机器人动力学模型

2.1 动力学模型分析

自由度机器人的动力学方程由下式给出:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(q) + \hat{d} = \tau \quad (2.1)$$

式中 $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 为位移、速度和加速度矢量, $M(q) \in R^{n \times n}$ 为对称正定的惯性矩, $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 为离心和 Coriolis 力矩矩阵, $G(q) \in R^n$ 为重力矢量, $F(q) \in R^n$ 为摩擦向量, \hat{d} 为外部未知有界干扰, τ 为控制输入力矩矢量。其中 $F(q)$ 和 \hat{d} 为可能的不确定项, $F(q)$ 是由各种参数误差、降阶处理, 以及建模时动态特性所带的模型误差; \hat{d} 主要指不确定的外部干扰。

机器人动力学方程 (2.1) 具有如下性质:

性质 1: $M(q)$ 是对称正定矩阵, 满足:

$M_m \leq \|M(q)\| \leq M_M, M_m, M_M > 0$ 分别是常数。其中 M_m 为惯性矩的最小值, M_M 为最大值。

性质 2:

$$X^T \left[M(q) - 2C(q, \dot{q}) \right] X = 0, \forall X \in R^n.$$

假设 2.1: 离心和 Coriolis 项 $C(q, \dot{q})$ 是有界的。

假设 2.2: 机械臂期望轨迹 q_d, \dot{q}_d 和 \ddot{q}_d 是有界的。

可知当系统的参数精确已知、且结构确定的情况下, 控制律能保证闭环系统的全局稳定; 但当系统存在结构参数误差、摩擦及干扰等不确定因素时, 控制律就不能保证系统具有良好的动态性和稳定性; 同时选择 T-S 模型来近似非线性模型、简化计算时, 也会带不确定性因素。为了消除不确定性的影响, 保证系统的渐近收敛, 必须设计控制律来弥补 T-S 模糊模型来近似非线性模型所带来的不确定性。(其中这里的不确定性主要来自模型误差即) $F(q)$ 。

2.2 问题描述

本文以一个二阶非线性系统为例, 二阶非线性系统微分方程如下:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = f(x) + G(x)(u + d) \quad (2.2)$$

其中 $x_1 \in R^n, x_2 \in R^n, x = (x_1^T, x_2^T)^T$ 代表系统状态, $\mu \in R^n$ 为控制输入, $d \in R^n$ 代表可能的系统的不确定项以及外部干扰即 $d = \hat{d} + F(q), f(x) \in R^n$ 以及 $G(x) \in R^{n \times n}$ 为平滑函数, $(\cdot)^T$ 代表矩阵或向量的转置。

综上所述, 本文的研究问题为设计一个控制律使得系统能在面对外在干扰与系统不确定项时达到追踪的任务, 即: 当 $t \rightarrow \infty$ 时 $q_1(t) \rightarrow q_d(t), q_d(t)$ 为追踪的目标。

3 模糊变结构控制器的设计

3.1 T-S 模糊建模

T-S 模糊模型是由一组“if-then”模糊规则来描述非线性系统(2.2) 的行为, 每一个规则代表一个子系统, 整个模糊系统即为各子系统的线性组合。第 i 条模糊规则对应的模糊状态方程为:

$$R^i: \text{if } x_1(t) \text{ is } M_1^i(t) \text{ and } \dots \text{ and } x_n(t) \text{ is } M_n^i,$$

$$\text{then } \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), i = 1, 2, \dots, l \quad (3.1)$$

其中: $M_j^i(t)$ ($j = 1, 2, \dots, n$) 是模糊子集, l 是规则个数; A_i, B_i 是第 i 个子系统相应维数的矩阵。对系统(3.1)进行单点模糊化, 乘积推理以及加权平均解模糊方法得系统的全局模糊状态方程。

一个非线性系统可以由 p 个线性模型做权重的相加而以 T-S 模型做近似, p 个线性模型如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= A_i(x)x + B_i(x)u \quad i = 1, \dots, p \end{aligned} \quad (3.2)$$

利用(3.2)式可将原始非线性系统改写成 T-S 模型:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \sum_{i=1}^p \alpha_i(x) A_i(x)x + \Delta f + \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right) (I + \Delta G)(u + d) \end{aligned} \quad (3.3)$$

其中 $\alpha_i(x)$ 为权重, 满足 $\alpha_i(x) > 0, i = 1, \dots, p,$

$$\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) = 1 \text{ 其中 } \Delta f = f(x) - \sum_{i=1}^p \alpha_i(x) A_i(x)x,$$

$$\Delta \bar{G} = G(x) - \sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x)$$

3.2 控制器的设计

利用(3.3)式可改写以下型式:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \sum_{i=1}^p \alpha_i(x) A_i(x)x + \Delta f + \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right) (I + \Delta G)(u + d) \end{aligned} \quad (3.4)$$

其中 $\Delta G = \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right)^{-1} \square \Delta \bar{G}$ 。本文中，针对 $\left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right)^{-1}$ 的存在性提出一项假设。

假设 3.1: 对所有的状态而言, $\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x)$ 为非奇异矩阵。

模糊变结构控制器的设计

首先选定一个适当的顺滑平面。先假设 $e = x_1 - x_d$, 并且选定顺滑平面为:

$$s = e + Ke = 0 \quad (3.5)$$

其中, $K = \text{diag}\{k_1, k_2, \dots, k_n\} > 0$ 显而易见, 如果状态持续保持在顺滑平面上即可达成我们的目标, 也就是 $e \rightarrow 0$ 。

第二个步骤为设计一个控制律, 使得系统状态在有限时间内会到达顺滑平面而且会持续待在顺滑平面上。从(3.4) (3.5)可得:

$$\begin{aligned} s &= e + Ke \\ &= x_1 - x_d + Ke \\ &= -x_d + Ke + \sum_{i=1}^p \alpha_i(x) A_i(x)x + \Delta f + \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right) (I + \Delta G)(u + d) \end{aligned} \quad (3.6)$$

根据变结构控制的设计程序^[9,10], 采用

$$\begin{aligned} u &= u^{eq} + u^{re} \\ u^{eq} &= \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right)^{-1} \cdot \left[-\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) A_i(x)x + \dot{x}_d - Ke \right] \end{aligned} \quad (3.7)$$

将(3.7), (3.8)代入(3.6)中, 可将(3.6)改写成

$$s = \Delta f + \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right) (I + \Delta G)(u^{re} + d) + \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right) \Delta G \cdot u^{eq} \quad (3.9)$$

3.3 方法的敛散性

为了让系统状态在有限时间内到达顺滑平面, 我们提出以下假设:

假设 3.2: 存在非负函数 $\rho(x, t)$ 以及 $\sigma(x, t)$, 使得以下两式成立

$$\left\| \Delta f + \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right) \left[(I + \Delta G)d + \Delta G \cdot u^{eq} \right] \right\| \leq \rho(x, t) \quad (3.10)$$

$$\sqrt{n} \left\| \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right) \Delta G \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right)^{-1} \right\| \leq \sigma(x, t) < 1 \quad (3.11)$$

值得注意的一点, 尽管在不等式(3.10)中需要 u^{eq} 的信息, 但是因为与的最大值可以事先被计算出来, 所以只要 u^{eq} 计算出来之后就可以很容易地算出 $\rho(x, t)$ 。透过假设 3.2 的帮助, 所以我们设计 u^{eq} 如下:

$$u^{re} = -\frac{\rho(x, t) + \eta}{1 - \sigma(x, t)} \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right)^{-1} \cdot \text{sgn}(s) \quad (3.12)$$

其中为正的常数。因为 $\|\text{sgn}(s)\| \leq \sqrt{n}$, 所以从(3.9),(3.12)以及假设 3.2 可得

$$\begin{aligned} s^T \dot{s} &\leq \rho(x, t) \|s\| + s^T \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right) (I + \Delta G) u^{re} \\ &\leq \rho(x, t) \|s\| - \frac{\rho(x, t) + \eta}{1 - \sigma(x, t)} \cdot s^T \cdot \left[I + \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right) \Delta G \left(\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i(x) \right)^{-1} \right] \text{sgn}(s) \\ &\leq \rho(x, t) \|s\| - \frac{\rho(x, t) + \eta}{1 - \sigma(x, t)} \left(\sum_{i=1}^p |s_i| - \sigma(x, t) \|s\| \right) \\ &\leq \rho(x, t) \|s\| - \frac{\rho(x, t) + \eta}{1 - \sigma(x, t)} (\|s\| - \sigma(x, t) \|s\|) \\ &\leq -\eta \cdot \|s\| \end{aligned} \quad (3.13)$$

也就是系统状态在有限时间内会到达顺滑平面。由以上的讨论我们会有以下的结果:

定理 3.1: 令假设 3.1 与假设 3.2 同时成立, 则采用控制律(3.7), (3.8)以及(3.12)时, 此系统(2.2)会达到追踪的性能表现。

综上所述, 以 T-S Fuzzy model 为基础的控制 器有一项重要的特性。这种方法不需要计算 $f(x)$ 中的非线性项与 $G(x)$ 的反转换, 而这两个计算是典型的变结构控制^[9]无法避免的。取而代之地, 系统参数 $A_i(x)$, $B_i(x)$ 与假设 3.2 中提到的 $\|\Delta f\|$, $\|\Delta G\|$ 以及 $\sigma(x, t)$ 的最大值可以事先被计算并透过查表的方式适时地将这些参数代入系统。因此这种以 T-S Fuzzy model 为基础的方法可以减轻一些在计算控制器方面的负担并且提升控制器实现的可行性, 尤其是当系统动态较为复杂的时候。

4 实验与仿真

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) = \tau + d \quad (4.1)$$

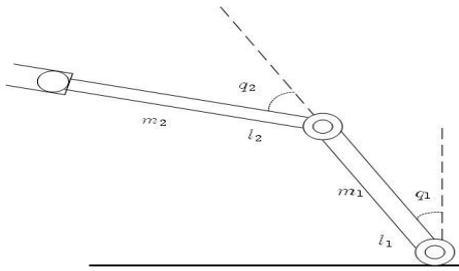


图 4.1 两轴机械手臂示意图

其中 $q = (q_1, q_2)^T \in R^2$, $\tau = (\tau_1, \tau_2)^T \in R^2$, $d \in R^2$ 分别代表位移、控制力矩以及可能的外来干扰, $M(q) \in R^{2 \times 2}$ 为对称正定的惯性矩, $C(q, \dot{q}) \in R^{2 \times 2}$ 为离心和 Coriolis 力矩矩阵, $g(q) \in R^2$ 为重力矢量。

$$M(q) = \begin{pmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 & m_2 l_1 l_2 (c_1 c_2 + s_1 s_2) \\ m_2 l_1 l_2 (c_1 c_2 + s_1 s_2) & m_2 l_2^2 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

$$C(q, \dot{q}) = m_2 l_1 l_2 (c_1 s_2 - s_1 c_2) \begin{pmatrix} 0 & -\dot{q}_2 \\ -\dot{q}_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

$$g(q) = \begin{pmatrix} -(m_1 + m_2)l_1 g s_1 \\ -m_2 l_2 g s_2 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

其中 $m_1, m_2 (kg)$ 为两轴机械臂的重量, $l_1, l_2 (m)$ 为两轴机械臂的长度, $g = 9.8 (m/sec^2)$ 为重力加速度 $c_1 = \cos(q_1), c_2 = \cos(q_2), s_1 = \sin(q_1), s_2 = \sin(q_2)$ 。
 $x_1 = (x_1, x_2)^T = (q_1, q_2)^T$ $x_2 = (x_3, x_4)^T = (\dot{q}_1, \dot{q}_2)^T$ 以及 $u = \tau$ 。

将 (2.2) 变成状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + G(x)(u + d) \end{cases} \quad (4.5)$$

其中

$$f(x) = \begin{pmatrix} m_2 l_1 l_2 a_3 x_3^2 - m_2 l_2^2 a_4 x_4^2 + (m_2 + m_1) g s_1 / (l_1 a_2) - m_2 g a_3 s_2 / (l_1 a_2) \\ m_2 l_1 l_2 a_3 x_4^2 + (m_2 + m_1) (l_1^2 a_1 x_3^2 - g a_3 s_1 / (l_2 a_2) + g s_2 / (l_2 a_2)) \end{pmatrix}$$

$$G(x) = \begin{pmatrix} 1/(l_1^2 a_2) & -a_3/(l_1 l_2 a_2) \\ -a_3/(l_1 l_2 a_2) & (m_2 + m_1)/(m_2 l_2^2 a_2) \end{pmatrix}$$

$$a_1 = (s_1 c_2 - c_1 s_2) / a_2, a_2 = m_1 + m_2 - m_2 a_3^2,$$

$$a_3 = c_1 c_2 + s_1 s_2,$$

因为 $|a_3| = |c_1 c_2 + s_1 s_2| = |\cos(x_1 - x_2)| \leq 1$, 所以

$$a_2 > m_1 > 0,$$

$$\text{trace}(G(x)) = \frac{1}{l_1^2 a_2} + \frac{m_1 + m_2}{m_2 l_2^2 a_2} > 0$$

因为 $a_2 > 0$, 所以

$$\det(G(x)) = \frac{m_1 - m_2 - m_2 a_3^2}{m_2 l_1^2 l_2^2 a_2^2} = \frac{1}{m_2 l_1^2 l_2^2 a_2} > 0$$

对所有的 x 来说, $G(x)$ 会是一个正定且非奇异矩阵。而由 $G(x)$ 所得到的 B_i 也会是正定矩阵, 因此 $\sum_{i=1}^p \alpha_i(x) B_i$ 也会是正定矩阵。

系统状态的初始值 $x_0 = (0.8, -0.4, 1, 1)^T$, 期望角度和角速度为 $x_d = (0.1, -0.7, 0, 0)^T$, 三个系统 ($n_1 = n_2 = 5$ 简称 TS55、 $n_1 = n_2 = 9$ 简称 TS99、经典变结构控制) 的控制参数设置相同, 即 $K = 5I, \eta = 1$, 将符号函数 (sgn(s)) 改成饱和函数 (sat(s/ε), ε = 0.005), 干扰 $d = 0.1 \sin(t)$ 。

为了找出适当的 T-S 模糊系统来近似原始非线性系统, 选择了一组操作点来建构出相关的线性模型。这些操作点的选择是根据工作空间范围来选定的, 如此机器臂的动作就可以由相关的线性模型以及权重组合的方式来做适当地近似。在模拟中, 假设参数 $m_1 = m_2 = 1, l_1 = l_2 = 1$ 而且角度的位置限制在 $-\frac{\pi}{2} \leq x_i \leq \frac{\pi}{2}, i = 1, 2$ 。

操作点的选定规则如下:

$$\left\{ x_{ij} = (x_{1,i}, x_{2,j}, 0, 0)^T \mid i = 1, \dots, n_1 \text{ and } j = 1, \dots, n_2 \right\}$$

其中 $\{x_{1,1}, \dots, x_{1,n_1}\}$ 与 $\{x_{2,1}, \dots, x_{2,n_2}\}$ 为 $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ 之间

所选定的两个区间, n_1, n_2 分别为 x_1, x_2 所选取操作点的个数。在这个例子中, 我们针对 x_1, x_2 均采用三角形的归属函数。因为本文的 T-S 模糊控制器只使用两个前部变数 x_1, x_2 , 所以在每个时刻只会触动四个法则, 也就是四个相关的线性模型, 其中 $D_{ij} = \{x \mid x_{1,i} \leq x_1 \leq x_{2,i+1}, x_{2,j} \leq x_2 \leq x_{2,j+1}\}$

因此, 如果适当地选取 x_1, x_2 的区间, 这种方式并不会造成即时运算的负担。然而, 针对一个函数在较小的子区间内取最大值会比在整个操作区间内所取的最大值来得小, 所以只要适当地选取 x_1, x_2 的区间就会使得 $\rho(x, t)$ 与 $\sigma(x, t)$ 的值变小。因此控制力矩就会比较小以致于在实际操作应用上会比较容易实现。

到达时间 t_{reach} 方面,

$(Speed)_{classic} \leq (Speed)_{TS99} \leq (Speed)_{TS55}$, 这是因为 T-S 方法需要额外的控制能量来消除系统的不确定项而这些不确定项是来自于典型非线性模型与 T-S 模糊模型之间的差距。然而, 如同之前所提到的, 经由 T-S 模糊模型的变结构控制理论所设计出的控制律大小与 $\rho(x,t)$ 、 $\sigma(x,t)$ 有关, 而 $\rho(x,t)$ 、 $\sigma(x,t)$ 的大小则取决于操作区间划分的大小。

由实验结果可知

$(\|\mu\|_{\infty})_{classic} = 31.1355 < (\|\mu\|_{\infty})_{TS99} = 40.3763 < (\|\mu\|_{\infty})_{TS55} = 60.9290$ 很明显地, 当操作区间划分的越小, 所需要的控制能量也会越小。

另一方面虽然 T-S 变结构控制律会比典型非线性变结构控制律需要较多的控制能量, 可是在整个过程当中 T-S 变结构控制律所消耗的总能量有可能会比典型非线性变结构控制律来得少且过程中的总误差值也比较小。这可能是因为 T-S 变结构控制律一开始所需的能量较大, 一开始能量较大使得系统状态能快速地接近目标; 而典型非线性变结构控制律一开始所需的能量较小, 在过程中随着状态越来越靠近目标且越来越靠近顺滑平面其所需的能量也一直在变小, 所以到达目标的时间会比较长。就总能量说, T-S 变结构控制律一开始所需的能量较大, 但是随着状态快速地到达目标而变小; 反观典型非线性变结构控制律一开始所需的能量虽然比较小, 但是接近目标的速度较慢, 所以过程中典型非线性变结构控制律所消耗的总能量有可能会比较多。从控制律入能量图(图 4.3)中可以观察到会有两个跳跃现象(Jump), 这是因为系统状态到达顺滑平面的缘故。同时这种情形也可以分别从图 4.2 观察到。在计算时间方面, 我们将 T-S 变结构控制律与典型非线性变结构控制律各计算了 106 次之后发现

$(CPU)_{TS55} \approx 4.766 \text{sec} < (CPU)_{Classic} \approx 7.625 \text{sec}$ 。由此可以知道 T-S 变结构控制律可以节省计算时间。

表 4.1 各项性能指标

	到达时间	能量消耗 $\int u^T u$	误差 $\int e^T e$
经典滑模控制	2.83S	820.9646	0.8128
TS55	1.3S	805.9872	0.2133
TS99	1.72S	731.3603	0.3980

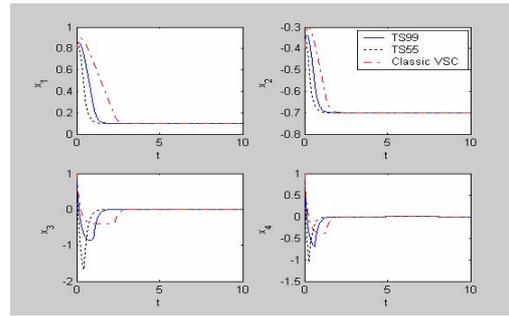


图 4.1 状态量的比较图

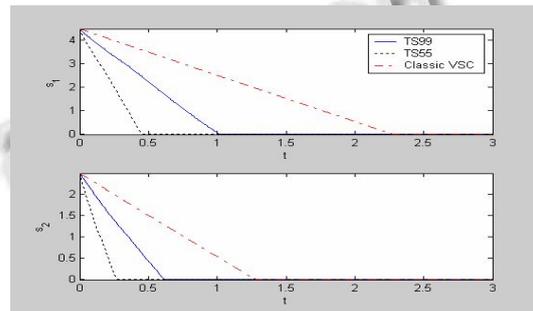


图 4.2 顺滑函数的比较图

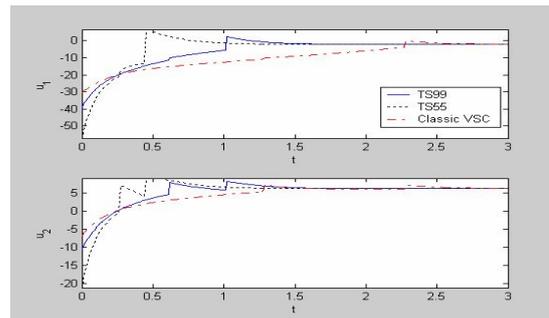


图 4.3 控制输入的比较图

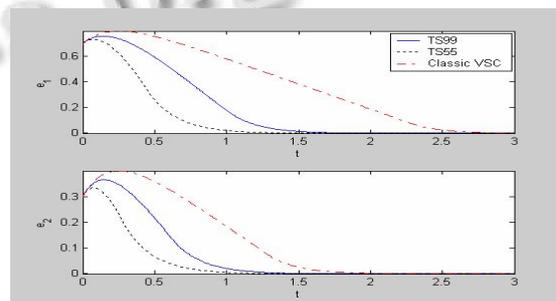


图 4.4 误差的比较图

5 小结

本文结合了 T-S 模糊模型与变结构控制理论并且应用在两轴机器手臂系统上。这种方法可以大量地减轻即时计算的负担, 具有响应快速以及强健的特性。最后, 增加模糊法则的数量可以降低控制输入的大小, 也就是将系统操作区间划分

多一点会使得控制输入变小以至于在实际应用上有控制输入大小限制时能够轻易地实现。同时,增加模糊法则地数量并不会造成额外的计算负担。由模拟的结果显示,这种结合 T-S 模糊模型与变结构控制的方法同样可以完成任务,而且在使用的能量、时间、追踪误差上比典型变结构控制方法来得少。

参考文献

- 1 Liang YW, Xu SD, Chu TC. and C. Cheng C, Reliable output tracking control for a class of nonlinear systems," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, omunication, and Computer Sciences, vol. E87-A, no. 9, 2314-2321, 2004.
- 2 . W. Liang, D. C. Liaw, and T. C. Lee, "Reliable control of nonlinear systems," IEEE Trans. Autom. onrol, vol. 45, no. 4, 706-710, 2000.
- 3 J. Jiang and Q. Zhao, "Design of reliable control systems possessing actuator redundancies," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol.23, no. 4, 706-710,2000.
- 4 F. Liao, J. L. Wang, and G. H. Yang, "Reliable robust flight tracking control: an LMI approach," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 10, no. 1, 76-89,2002.
- 5 G. Bajpai, B. C. Chang, and A. Lau "Reconfiguration of flight control systems for actuators failures," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 16, no. 9, pp.29-33, 2001.
- 6 师五喜. 自适应律修改的间接自适应模糊控制[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(10): 1788—1790.
- 7 J. D. Boskovic, and R. K. Mehra, "A decentralized scheme for accommodation of multiple simultaneous actuator failures," in Proc. Amer. Contr. Conf., pp. 5098-5103,2002.
- 8 G. H. Yang, J. L. Wang, and Y. C. Soh, "Reliable guaranteed cost control for uncertain nonlinear systems," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 45, no. 11, pp.2188-2192, 2000.
- 9 Y. W. Liang , S. D. Xu, and C. L. Tsai, "Study of VSC reliable designs with application to spacecraft attitude stabilization," IEEE Trans. Control Systems Technology, vol. 15,no. 2, pp. 332-338, 2007.
- 10 Y. W. Liang , and S. D. Xu, "Reliable control of nonlinear systems via variable structure scheme," IEEE Trans. Automatic Control, vol. 51, no. 10, pp 1721-1725, 2006
- 11 林雷, 王洪瑞, 胡雅楠 基于双重饱和函数的不确定机器人分散控制[J] 控制工程 2008 15 213-216
- 12 陈启军, 王月娟, 陈辉堂. 基于 PD 控制的机器人轨迹跟踪性能研究与比较[J]. 控制与决策, 2003, 18(i): 53—57.
- 13 王耀南, 孙炜 机器人鲁棒轨迹跟踪控制系统[J] 动力学与控制学报 2004, 75-81.

(上接第 88 页)

据带宽。VRML 和设备无关,它是作为一种描述虚拟境界的语言独立存在。以 VRML 与 3D MAX 为基础可以建立不同档次的系统实现,这一特点也是 VRML 与 3D MAX 得以迅速发展的根本动力之一。在游戏,工程和科学可视化,教育和建筑方面,也具有较高的实现效率和广阔前景。

参考文献

- 1 曾润国,聂志锋,卢建刚.数码校园 GIS 中的三维建模.工程勘察,2002,6(3):46—47.
- 2 余莉,王乘.基于虚拟现实技术的数字校园三维仿真系统.计算机仿真,2004,(4):100—103.
- 3 高尚宇.基于的“数字校园”信息系统的设计与实现.济南山东科技大学,2005.5—6.
- 4 张青峰,吴发启,周淑琴.校园虚拟漫游设计初探.测绘科学,2005,30(6):124—126.
- 5 Hu WH, Ke CY, Wang GR. Research of Virtual Campus Environment Study Using VR-ML. Lecture Notes in Computer Science, 2006,3942:581—584.
- 6 徐诚.虚拟校园漫游系统的研究.华中师范大学,2006.
- 7 陆丽芳.基于 3DSmax 的小区模型制作方法.计算机时代,2007,11:67—68.
- 8 刘海飞,臧德彦,车建仁.三维可视化小区图的制作.软件时空,2006,22(2—3).
- 9 张立亭,周世健.基于 3DSMAX 的城市小区 3 维图的制作.测绘学院学报,2004,21(2):124—127.
- 10 赖承,王毅刚.虚拟校园漫游.杭州电子工业学院学报, 2003,23(4):48—51.
- 11 徐柏涛.3dsmax7 中文版基础教程.北京:清华大学出版社,2006.
- 12 高志清.3DS MAX 精品电脑建筑效果图.北京:中国水利水电出版社,2002.