

文章编号: 1002-0446(2002)01-0016-04

多模型自适应控制在机器人手臂控制当中应用

李晓理 王书宁

(清华大学自动化系系统工程所 北京 100084)

摘要: 本文以斯坦福机械手臂为研究对象,对被控对象建立离散时间模型,并建立自适应控制器.考虑斯坦福机械手自适应控制当中,参数突变经常会破坏总体系统的稳定性的问题,针对被控对象模型建立多个模型,覆盖被控对象的参数不确定性,构成多模型自适应控制器,同时引入“局部化”技术,可保证在不失去多模型自适应控制精度的同时,减少计算时间.

关键词: 斯坦福机械手臂;多模型;自适应;局部化

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

APPLICATION OF MULTIMODEL ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM IN ROBOTIC MANIPULATOR CONTROL

LI Xiao-li WANG Shu-ning

(System Engineering Institute, Automation Department, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: In this paper, the dynamic characteristics of Stanford arm manipulator is described by a discrete time model, and the adaptive control of Stanford arm is studied in this paper. In the adaptive control of industrial manipulator, there always exists the problem that the great change in parameters always leads the global system unstable. To solve this kind of problem, multiple models are used to cover the uncertainties of system parameters, and a multi-model adaptive controller is set up based on these models. At the same time, “localization” method is introduced to reduce computing time, and the accuracy of multi-model adaptive control algorithm is not lost.

Keywords: Stanford arm, multiple model, adaptive control, localization

1 引言(Introduction)

众所周知,常规的自适应控制对于时不变或慢时变被控对象都能取得很好的控制效果,但当被控对象模型参数发生突变时(如工作环境突变,元件发生损坏等),自适应控制器的参数需要很长的时间才能收敛,造成过渡过程很差,甚至被控对象输出失控.对被控对象建立多个模型,覆盖其参数不确定性,从而构成多模型自适应控制器是解决此类问题的有效方法之一^[1].近几年来,基于指标切换函数的间接多模型自适应控制在机器人手臂的自适应控制当中得到了广泛的应用^[2~4].机器人手臂的自适应控制是一个比较复杂的过程^[5,6],当开动学习过程时机械手的性能基本上依赖于辨识模型参数初始化

的精度.这个精度决定在工作起动时“不规则”运动的程度.另外,机器人手臂控制问题还与参数估计的收敛有关.在运动发生的有限时间内可能得不到参数估计的收敛,尤其是当参数突然改变时(例如,当抓一个质量大的工件时)总体系统的稳定性可能破坏.

正是由于机器人手臂控制的复杂性,采用多模型自适应控制会取得很好的控制效果,文[2~4]基于连续时间模型建立多模型自适应控制器,本文将推广到离散时间系统模型,同时本文采用“局部化”技术^[7],在保证计算精度的同时,减少了计算时间.

2 斯坦福机械手臂及其模型描述 (Stanford arm and its model description)

如图 1 的斯坦福机械手臂, 其有 5 个旋转连接和 1 个平移连接, 每一个连接都由永磁铁电机驱动, 电机轴部被分别连接到解码器/电位计用来感受位置、连接到转速计用来测量速度. 斯坦福机械手的数学模型可以由如下的微分方程来描述

$$D(\theta)\dot{\theta} = Q(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + Fu(t) \quad (1)$$

其中 $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ 为 6 维向量, 分别代表连接的位置、速度、加速度. $D(\theta)$ 为一个与关节加速度和连杆惯性有关的 6×6 维对称矩阵, $Q(\theta, \dot{\theta})$ 为与哥氏力和离心力转矩有关的 6 维向量, $G(\theta)$ 为与重力转矩有关的 6 维向量, 6 维向量 $u(t)$ 代表系统输入, F 为一个对角标量矩阵.

采用欧拉方法离散化被控对象(1), 获得被控对象的离散时间模型

$$y(t) = A(q^{-1})y(t) + B(q^{-1})u(t-1) + h + e(t) \quad (2)$$

其中 $u(t), y(t)$ 为输入和输出.

$$A(q^{-1}) = A_1q^{-1} + \dots + A_nq^{-n}$$

$$B(q^{-1}) = B_0 + B_1q^{-1} + \dots + B_{n-1}q^{-n+1}$$

为多项式矩阵, q^{-1} 为后移算子, 即 $q^{-1}y(t) = y(t-1)$, h 为一个与重力有关的常数向量, 为 $e(\cdot)$ 白噪声序列.

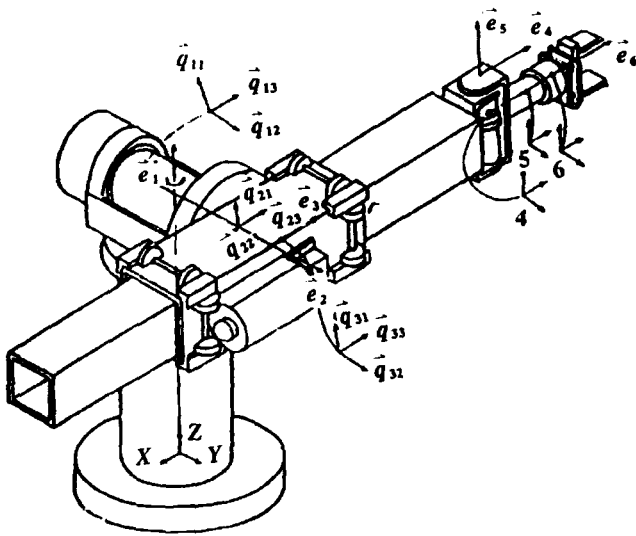


图 1 斯坦福机械手
Fig1. Stanford arm

3 机械手臂的自适应控制 (Adaptive control of mechanical arm)

机械手臂的自适应控制, 主要是对每一个连接设计自适应控制器, 使连接按照一定的离散角度轨迹运动, 在下面问题分析中主要考虑以下情况, 即各个关节连接之间的运动耦合很小, (2) 中的自回归模型当中的耦合项很小, 每一个连接都是被独立控制的. 则由 (2) 可得各个连接的运动方程^[8,9]

$$y_i(t) = \sum_{l=1}^n [a_{i,l}y_i(t-l) + b_{i,l-1}u_i(t-l)] + g_i + e_i(t) \quad (3)$$

$i=1, 2, \dots, 6$ 代表不同的关节连接. $e_i(t)$ 为忽略各连杆自重和各关节耦合引起的误差项, g_i 为常数项. 以下分析将省去下标 i , 即如下差分方程代表了不同连接的运动方程

$$y(t) = \sum_{l=1}^n [a_l y(t-l) + b_{l-1} u(t-l)] + g + e(t) \quad (4)$$

由(4)可得

$$y(t) = \theta^T \varphi(t-1) + e(t) \quad (5)$$

其中

$$\theta = [a_1, \dots, a_n; b_0, \dots, b_{n-1}; g]^T$$

$$\varphi(t-1) = [y(t-1), \dots, y(t-n);$$

$$u(t-1), \dots, u(t-n), 1]^T$$

假设 1: 被控对象(4)误差项有界, 且其上界已知, 即 $\|e_i(\cdot)\| \leq M, M$ 为一给定正数.

假设 2: 被控对象(5)参数 θ 在一个给定闭区域 Ω 中变化.

使用如下带死区参数辨识算法辨识被控对象参数

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{\lambda(t)P(t-2)\varphi(t-1)\varepsilon(t)}{1 + \varphi(t-1)^T p(t-2)\varphi(t-1)} \quad (6)$$

$$\varepsilon(t) = y(t) - \varphi(t-1)^T \hat{\theta}(t-1) \quad (7)$$

$$p(t) = p(t-1) - \frac{\lambda(t+1)p(t-1)\varphi(t)\varphi(t)^T p(t-1)}{1 + \varphi(t)^T p(t-1)\varphi(t)} \quad (8)$$

$$\lambda(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } |\varepsilon(t)| < 2M \\ v & \text{other } (v \in [w, 3(1-w)/4], (9) \\ & 0 < w < 3/7) \end{cases}$$

由辨识参数设计自适应最小方差控制器, 最小化如下指标函数

$$J(u) = E\{\|\hat{y}(t+1) - y^d(t+1)\|^2 / \varphi(t-1)\},$$

$$\hat{y}(t) = \theta^T \varphi(t-1)$$

对控制量 $u(t)$ 极小化指标函数, 有

$$u(t) = \frac{-1}{b_1} \left\{ \left(\sum_{l=1}^n \hat{a}_l(t) y(t-l+1) \right) + \left(\sum_{l=1}^{n-1} \hat{b}_l(t) u(t-l) \right) + \hat{g}(t) - y^d(t+1) \right\} \quad (10)$$

4 机械手臂的多模型自适应控制 (Multiple model adaptive control of mechanical arm)

基于“局部化”技术对被控对象(4)建立多模型自适应控制器^[7], 将被控对象不确定参数范围划分不同的子区域的合集

C1: $\Omega_i \subset \Omega, \Omega_i \neq \{\}, i=1, \dots, L;$

C2: $\bigcup_{i=1}^L \Omega_i = \Omega;$

C3: 对每一个 $i=1, \dots, L$, 令 θ_i 和 $r_i > 0$ 代表子区域 Ω_i 的“圆心”和“半径”, 即 $\theta_i \in \Omega_i$, 且满足对所有 $\theta \in \Omega_i$ 有 $\|\theta - \theta_i\| \leq r_i$ 对被控对象建立多个固定模型^[2,3], 其模型参数如 C3, 由各个子区域的圆心构成, 即

$$\theta_j = [a_j^1, \dots, a_j^n; b_j^1, \dots, b_j^{n-1}; g^j]^T \quad j = 1, \dots, L$$

同时对被控对象建立两个自适应模型, 其辨识参数如下

$$\begin{aligned} \theta_{A_j}(t) &= \theta_{A_j}(t-1) + \frac{\lambda_{A_j}(t) P_{A_j}(t-2) \varphi(t-1) \varepsilon_{A_j}(t)}{1 + \varphi(t-1)^T P_{A_j}(t-2) \varphi(t-1)} \\ \varepsilon_{A_j}(t) &= y(t) - \varphi(t-1)^T \theta_{A_j}(t-1) \\ p_{A_j}(t) &= p_{A_j}(t-1) - \frac{\lambda_{A_j}(t+1) p_{A_j}(t-1) \varphi(t) \varphi(t)^T p_{A_j}(t-1)}{1 + \varphi(t)^T p_{A_j}(t-1) \varphi(t)} \\ \lambda_{A_j}(t) &= \begin{cases} 0 & \text{of } |\varepsilon_{A_j}(t)| < 2M \\ v & \text{other } (v \in [w, 3(1-w)/4], \\ & 0 < w < 3/7) \end{cases} \\ & \quad j \in \{1, 2\} \end{aligned}$$

自适应模型 1 如常规自适应模型, 含有参数 θ_{A_1} ; 自适应模型 2 用来改善被控对象的瞬态响应, 其辨识参数初值不断更新为与被控对象最接近的固定模型的参数。

为获得多模型自适应控制器, 首先给出如下两个定义

定义 1 固定模型的输出误差和开关系数

$$\varepsilon_j(t) = y(t) - \varphi(t-1)^T \theta_j,$$

$$\lambda_j(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } |\varepsilon_j(t)| < 2M \\ v & \text{otherwise } (v \in [3, (1-w)/4]) \\ & 0 < w < 3/7 \\ & j \in \{1, \dots, L\} \end{cases}$$

定义 2 切换函数

$$J_i(t, t_0) = e_i^2(t) + \sum_{j=t_0}^{t-1} \beta^{-i} e_i^2(j) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} e_i^2(t) &= \frac{\lambda_i(t) \varepsilon_i^2(t)}{1 + \varphi(t-1)^T P_{A_i}(t-2) \varphi(t-1)} \\ & \quad i \in \{1, \dots, L, A_1, A_2\} \\ & \quad 0 < \beta < 1 \end{aligned} \quad (12)$$

由定义 1, 2, 可得如下多模型自适应控制器。

$t=t_0$, 令 $I(t_0) = I_0 = \{1, 2, \dots, L\}$ 并给定一个任意小的正数 $\varepsilon, t > t_0$ 定义

$$\begin{aligned} \hat{I}(t) &= \{j: |\varphi(t-1)^T \theta_j - y(t)| \\ & \leq r_j \|\varphi(t-1)\| + M \\ & \quad j \in I(t-1)\} \\ I(t) &= I(t-1) \cap \hat{I}(t) \end{aligned}$$

计算

$$\begin{aligned} i(t) &= \arg \min_{i \in I(t)} J_i(t, t_0) \\ j(t) &= \arg \min_{i \in \{A_1, A_2\}} J_i(t, t_0) \end{aligned}$$

如果 $J_{j(t)}(t, t_0) > \varepsilon$ 则

{若 $J_{j(t)}(t, t_0) \leq J_{i(t)}(t, t_0)$, 令 $\hat{\theta}(t) = \theta_{j(t)}$, 如(10)计算控制输入, 并令 $\theta_{A_2} = \theta_{j(t)}, t=t+1$, 返回 2)。

否则, 令 $\hat{\theta}(t) = \theta_{i(t)}$, 如(10)计算控制输入, 并令 $\theta_{A_2} = \theta_{j(t)}, t=t+1$, 返回 2)。

若 $J_{A_1}(t, t_0) \leq \varepsilon$,

令 $\hat{\theta}(t) = \theta_i(t)$, 如(10)计算控制输入, 并令 $\theta_{A_2} = \theta_{j(t)}, t=t+1$, 返回 2)。

若 $J_{A_1}(t, t_0) \leq \varepsilon$,

令 $\hat{\theta}(t) = \theta_{A_1}(t)$, 如(10)计算机控制输入, $t=t+1$, 返回 2)。

引理 1^[10] 对于线性时不变系统, 参数估计算法(6)–(9)有如下性质。

- 1) $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\lambda(t) \varepsilon^2(t)}{\mu + \varphi(t-1)^T p(t-2) \varphi(t-1)} = 0$
- 2) $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\theta(t) - \theta(t-1)\| = 0$

定理 1 对时不变系统进行多模型自适应控制, 存在一个有限的时间 t_1 , 当 $t > t_1$, 控制器切换将停止在一个自适应模型上。

证明 由引理 1 之 1), (11), (12) 可知

$$\lim_{t \rightarrow \infty} J_{A_1}(t, t_0) = 0$$

因此, 存在一个有限的时间 t_1 , 满足当 $t > t_1$ 时, 有

$$J_{A_1}(t, t_0) < \epsilon$$

由多模型自适应控制器的构成可知,多模型切换最终将停止在自适应模型上,即最终的控制输入将为一个常规自适应控制器.

由定理 1,线性时不变系统的多模型自适应控制器最将一个常规的自适应控制器,因此常规自适应控制器的一切性质如稳定性、收敛性都将被保留,但由于多固定模型和多自适应模型的存在,瞬态响应被极大地改善.

同样的原因,当相邻两次参数跳变时间间隔足够长时,多模型自适应控制将对含跳变参数的被控系统得到很好的控制品质.

5 仿真实例 (Simulation)

考虑文献[9]中的斯坦福机械手连接 4 的速度控制问题,当负载突然发生变化时,被控对象将为如下含跳变参数的离散时间系统.

$$y(t) = a_2(t)y(t-2) + b_0(t)u(t-1) +$$

$$b_1(t)u(t-2) + g(t) + e(t) \quad (13)$$

$$a_2(t) = \begin{cases} -0.9 & t \leq 50 \\ -0.75 & 50 < t \leq 100 \\ -0.9 & 100 < t \leq 150 \\ -0.8 & 150 < t \leq 200 \end{cases}$$

$$b_0(t) = \begin{cases} -0.4 & t \leq 50 \\ -0.35 & 50 < t \leq 100 \\ -0.4 & 100 < t \leq 150 \\ -0.3 & 150 < t \leq 200 \end{cases}$$

$$b_1(t) = 0.2, g(t) = 0.25 \quad (14)$$

其中 $y(t)$ 为连接的速度, $u(t)$ 输入到连接 4 电机的电压值. $e(t)$ 为满足 $|e(t)| \leq 0.01$ 随机噪声. 模型参数如(14), 输出设定值为 2rad/s. 分别采用单自适应控制器和多模型自适应控制器进行控制,其中多模型控制器采用 231 个固定模型,2 个自适应模型, $\beta=0.3$. 从图 2 与图 3 可以看出,当参数发生跳变时,多模型自适应控制的控制效果要好于单自适应模型控制器,瞬态响应得到很大的改善.

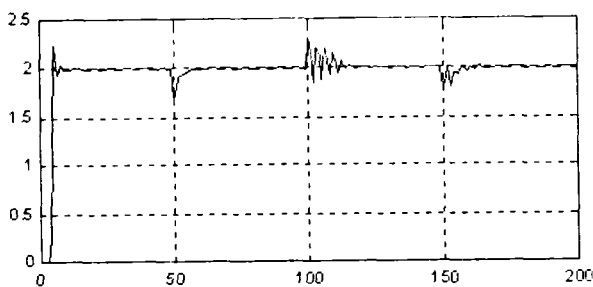


图 2 常规单自适应控制器,被控对象输出
Fig. 2 Single adaptive controller, the output of system

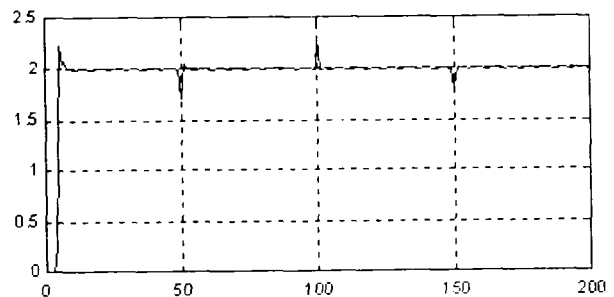


图 3 多模型自适应控制器,被控对象输出
Fig. 3 Multiple model adaptive control, the output of system

从图 2 与图 3 可以看出,当参数发生跳变时,多模型自适应控制的控制效果要好于单自适应模型控制器,瞬态响应得到很大的改善.

6 结论 (Conclusion)

本文针对机械手臂的自适应控制存在的问题进行了分析,针对常规自适应控制对机械手臂,参数发生跳变时,控制效果不好等问题,对被控对象建立多个模型,覆盖其参数不确定性,构成多模型自适应控制,改善瞬态响应.同时,针对离散时间系统的多模型自适应控制,引进“局部化”技术,在不损失计算精度的同时,减少了计算时间.本文只考虑了最小相位系统的最小方差控制,采用广义最小方差控制可

以将结果推广到非最小相位系统.

参考文献 (References)

- 1 李晓理,王伟,孙维. 多模型自适应控制. 控制与决策, 2000, 15 (4): 390-394
- 2 Narendra K S, J Balakrishnan and M K Ciliz. Adaptation and learning using multiple models, switching and tuning. IEEE Contr System Mag, 1995; 37-51
- 3 M K Ciliz, K S Narendra. Multiple model based adaptive control of robotic manipulators. Proceeding of 33rd Conference on Decision and Control. Lake Buena Vista, FL, 1994; 1305-1310
- 4 P J Zufiria, J Fraile-Ardanuy, R Riaza and J I Alonso Neural adaptive control of non-linear plants via a multiple ipverse model approach. Int J Adapt Control Signal Process. 1999, 13; 219-239