第17卷 第5期
1991 年 9 月

自 动 化 学 报
ACTA AUTOMATICA SINICA

Vol. 17, No. 5
Sept., 1991

机械手的自适应前馈补偿变结构控制及其微机实现

梁 天 培
(香港理工学院机械与轮机工程系)

周 其 节　　苏 春 翌
(华南理工大学自动化系,广州)

摘　　要

为了实现高速、高精度的机械手的控制，本文将自适应前馈补偿控制与变结构理论相结合,给出了一种新的鲁棒性控制方法. 通过对机械手的实时控制,证明了该方法是可行的.

关键词: 机械手,变结构控制,前馈补偿,应用.

一、引　　言

高性能的工业机械手都要求其具有准确、快速跟踪连续轨迹的能力. 由于机械手的变结构控制不需要精确的数学模型，且在滑动状态下具有很强的鲁棒性[1]， 因此较为实用[2-3]. 但现有的变结构控制规律是由一组很复杂的代数不等式所限定,并且由于系统参数的变化,其范围的确定导致大的跳变力矩. 文献 [4—5] 通过引入前馈补偿器，近似地消除了关联项的影响,给出了小的跳变控制力矩. 这是实际控制所期望的. 但因对象参数的不确定,这种补偿是很近似的,而且有的甚至需要计算惯性矩阵的逆.

本文从不同角度提出了一种新的变结构综合方法. 它将前馈补偿器表示为已知结构矩阵与未知参数向量的乘积形式,通过在线计算未知参数，实现了较为精确的前馈补偿. 然后用滑动模控制来消除残差项的影响，从而保证了鲁棒性轨迹跟踪. 实验结果证明了本文方法的可行性.

二、自适应前馈补偿变结构控制器

具有 n 个关节的刚性机械手的动力学方程可以写成

$$M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + B(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + G(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{u}(t), \tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{q}\in R^n$ 为关节角位置向量； $M(\boldsymbol{q})\in R^{n\times n}$ 为正定惯性矩阵； $B(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}\in R^n$ 中含

本文于 1989 年 7 月 26 日收到.

有哥氏力,向心力及摩擦力等; $G(\boldsymbol{q})\in R^n$ 是重力作用向量; $\boldsymbol{u}\in R^n$ 是作用于每个关节的广义力矩向量.

方程(1)有二个重要特性需要注意:

1) 在 $B(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$ 的适当形式下, $\dot{M}-2B$ 为反对称矩阵[6].

2) 选定一组适当的机械手和负载参数,则系统的动态特性与这组参数可表示为线性关系[7].

综合的目的是: 给定理想的轨迹 $\boldsymbol{q}_d(t)$ 和 $\dot{\boldsymbol{q}}_d(t)$, 选定滑动流形 $\boldsymbol{s}=0$, 当机械手的一些或全部参数未知时,确定控制律,使得跟踪误差在流形 $\boldsymbol{s}=0$ 上滑动,从而保证零的跟踪误差.

取滑动流形为

$$\boldsymbol{s}=C(\boldsymbol{q}(t)-\boldsymbol{q}_d(t))+\dot{\boldsymbol{q}}(t)-\dot{\boldsymbol{q}}_d(t), \tag{2}$$

其中 $C=\mathrm{diag}(c_1\cdots c_n)$, $c_i>0$, $i=1\cdots n$.

显然,当跟踪误差 $\tilde{\boldsymbol{q}}(t)=\boldsymbol{q}(t)-\boldsymbol{q}_d(t)$ 沿 $\boldsymbol{s}=0$ 滑动时,系统进入滑动状态. 这时相应的系统方程为

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{q}}}_i(t)=-c_i\tilde{\boldsymbol{q}}_i(t),\quad i=1\cdots n. \tag{3}$$

由方程(3)可知,系统在滑动模下仅与给定的参数 c_i 有关, 而与本身的参数无关,因而保证了系统对不确定性的鲁棒性.

为了使系统进入滑动模,并且具有小的跳变控制力矩,则设控制器为

$$\boldsymbol{u}(t)=\tilde{\boldsymbol{u}}_{eq}(t)+\Delta\boldsymbol{u}(t), \tag{4}$$

其中 $\boldsymbol{u}_{eq}(t)$ 为等价控制[1],由于对象参数的不确定性,设 $\tilde{\boldsymbol{u}}_{eq}(t)$ 为其近似估计,表达式为

$$\tilde{\boldsymbol{u}}_{eq}(t)=-(\hat{M}C-\hat{B})\dot{\boldsymbol{q}}(t)+\hat{M}C\dot{\boldsymbol{q}}_d(t)+\hat{G}(\boldsymbol{q})+\hat{M}\ddot{\boldsymbol{q}}_d(t), \tag{5}$$

其中 $\hat{M}(\boldsymbol{q})$, $\hat{B}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$ 和 $\hat{G}(\boldsymbol{q})$ 分别为 $M(\boldsymbol{q})$, $B(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$ 和 $G(\boldsymbol{q})$ 的估计值; $\Delta\boldsymbol{u}(t)$为不连续控制项,其形式为

$$\Delta\boldsymbol{u}(t)=-K\mathrm{sgn}(\boldsymbol{s}), \tag{6}$$

其中未知参数 $K=\mathrm{diag}(k_1\cdots k_n)$; $\mathrm{sgn}(\boldsymbol{s})^T=(\mathrm{sgn}(s_1)\cdots\mathrm{sgn}(s_n)]$.

注意: $\boldsymbol{u}_{eq}$ 为前馈补偿项,其物理意义为使跟踪误差 $\tilde{\boldsymbol{q}}(t)$ 保持在滑动流形上所需要的力. $\Delta\boldsymbol{u}$ 的作用为克服系统的不确定性和外部干扰而使系统进入滑动模所需要的附加力.

为了使系统进入滑动模,并且能在线估计方程(4)中的参数,则取李雅普诺夫函数为

$$V=\boldsymbol{s}^TM(\boldsymbol{q})\boldsymbol{s}+\tilde{\boldsymbol{\alpha}}^T\Gamma\tilde{\boldsymbol{\alpha}}, \tag{7}$$

其中 $\boldsymbol{\alpha}\in R^m$ 为未知参数向量,它仅与机械手实体和负载、几何、物理参数有关; $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$ 为其估计向量; Γ 为正定矩阵; $\tilde{\boldsymbol{\alpha}}=\boldsymbol{\alpha}-\hat{\boldsymbol{\alpha}}$ 为估计误差向量.

对(2)式微分,可得滑动模方程

$$M\dot{\boldsymbol{s}}=\tilde{Q}\dot{\boldsymbol{q}}(t)-\tilde{M}C\boldsymbol{q}_d(t)-\tilde{G}-\tilde{M}\ddot{\boldsymbol{q}}_d(t)-K\mathrm{sgn}(\boldsymbol{s}), \tag{8}$$

其中 $\tilde{Q}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})=(M(\boldsymbol{q})C-B(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}))-(\hat{M}(\boldsymbol{q})C-\hat{B}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}))$,

$$\tilde{M}(\boldsymbol{q})=M(\boldsymbol{q})-\hat{M}(\boldsymbol{q}),\ \tilde{G}(\boldsymbol{q})=G(\boldsymbol{q})-\hat{G}(\boldsymbol{q}).$$

由于 M, B 和 G 均可表示为未知参数向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 的线性函数, 并且(8)式消去了参数已知的部分,故(8)式可写为

$$M\dot{s} = Y(q,\dot{q},\dot{q}_d,\ddot{q}_d)\tilde{a} - K\mathrm{sgn}(s), \tag{9}$$

其中 $Y(q,\dot{q},\dot{q}_d,\ddot{q}_d) \in R^{n\times m}$ 为非线性结构已知的矩阵.

由 (9) 式,则可导出控制律. 由于

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{s}^T M s + s^T \dot{M} s + s^T M \dot{s} + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma \tilde{a} + \tilde{a}^T \Gamma \dot{\tilde{a}} \\ &= 2s^T(-K\mathrm{sgn}(s) + Bs) + 2\tilde{a}(Y^T s + \Gamma\dot{\tilde{a}}),\end{aligned} \tag{10}$$

若 $\dot{V}$ 为负定,根据变结构理论[1],则误差向量可进入滑动流形,并沿其滑动. 这意味着当 $t\to\infty$时, $\tilde{q}(t)\to 0$. 为了保证 $\dot{V}$ 为负定,则设

$$|B_{ii}(q,\dot{q})| < f_{ii}(q,\dot{q}),$$

其中 $f_{ii}(q,\dot{q})$ 为已知函数. 取

$$k_i = \sum_{j=1}^{n} f_{ij}|s_j| + \delta_i,\ \delta_i > 0,\ i = 1\cdots n, \tag{11}$$

及 $\Gamma\tilde{a} + Y^T s = 0$, 由于 $\dot{\hat{a}} = \dot{\tilde{a}}$, 即

$$\dot{\hat{a}} = -\Gamma^{-1}Y^T s. \tag{12}$$

此时 (10) 式为

$$\dot{V} < 2\sum_{i=1}^{n}\delta_i|s_i| < 0. \tag{13}$$

由于 (4) 式可表达为

$$u(t) = -Y(q,\dot{q},\dot{q}_d,\ddot{q}_d)\hat{a} + W(q,\dot{q},\dot{q}_d,\ddot{q}_d) + \Delta u(t),$$

其中 $W(q,\dot{q},\dot{q}_d,\ddot{q}_d) \in R^n$ 为参数已知向量,因此,自适应前馈补偿变结构控制算法为

$$u(t) = -Y(q,\dot{q},\dot{q}_d,\ddot{q}_d)\hat{a} + W(q,\dot{q},\dot{q}_d,\ddot{q}_d) + \Delta u(t), \tag{14}$$

$$\Delta u_i(t) = -\left(\sum_{j=1}^{n} f_{ij}|s_j| + \delta_i\right)\mathrm{sgn}(s_i),\ i = 1\cdots n, \tag{15}$$

$$\dot{\hat{a}} = -\Gamma^{-1}Y^T(q,\dot{q},\dot{q}_\alpha,\ddot{q}_\alpha)s. \tag{16}$$

其控制框图如图 1 所示.

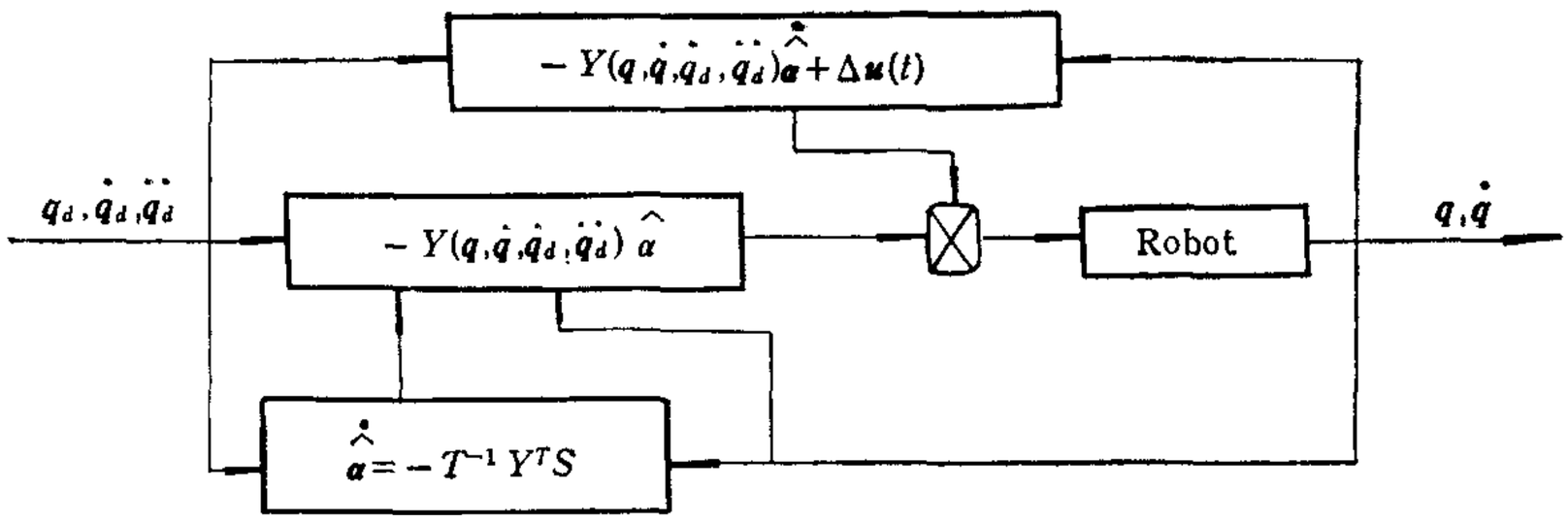

图 1　控制系统框图

三、消 除 抖 动

由控制律 (14—16) 可见,控制是不连续的，因而导致抖动. 由此可能会激发高频未建模动态特征,这是本文所不期望的. 采用文献 [2] 的方法,通过引入边界层

$$E(t)=\{\boldsymbol{q}(t),\|\boldsymbol{s}(\boldsymbol{q})\|<\phi\};$$

$\phi>0$，在边界层内，用饱和函数 $\mathrm{sat}(s/\phi)$ 代替符号函数 $\mathrm{sgn}(s)$，从而消除了抖动，但导致跟踪精度下降．所以必须在边界层厚度与所要求的跟踪精度之间折衷．此时控制算法(14—16)变为

$$\boldsymbol{u}(t)=-\mathrm{Y}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\dot{\boldsymbol{q}}_d,\ddot{\boldsymbol{q}}_d)\hat{\boldsymbol{a}}+W(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\dot{\boldsymbol{q}}_d,\ddot{\boldsymbol{q}}_d)+\Delta\boldsymbol{u}(t), \tag{17}$$

$$\Delta u_i(t)=-\left(\sum_{j=1}^{n}f_{ij}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})|s_{\Delta j}|+\delta_i\right)\mathrm{sat}(s_i/\phi_i), \tag{18}$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{a}}}=-\Gamma^{-1}\mathrm{Y}^T(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\dot{\boldsymbol{q}}_d,\ddot{\boldsymbol{q}}_d)s_\Delta, \tag{19}$$

其中 $\boldsymbol{s}_\Delta=(s_{\Delta_1}\cdots s_{\Delta_n})^T$，$s_{\Delta i}=s_i-\phi_i\mathrm{sat}(s_i/\phi_i)$，$i=1\cdots n$.

若取李雅普诺夫函数为

$$V=\boldsymbol{s}_\Delta^T M\boldsymbol{s}_\Delta+\tilde{\boldsymbol{a}}^T\Gamma\tilde{\boldsymbol{a}}, \tag{20}$$

仍可证明控制律(17—19)保证跟踪误差进入边界层，且在边界层内滑动.

由控制律(19)可见，在边界层内，不用估计参数的变化，而是自动给出了一种停止自适应律的规则．由此避免了自适应算法中所存在的参数漂移问题，这是非常可取的.

四、实时控制结果

为了说明上述算法是可行的，本节对一台具有五个半自由度的试验机械臂中的二个臂进行了实时控制，机械臂如图 2 所示．该手臂的每个关节是由一台直流电机通过(60:1)

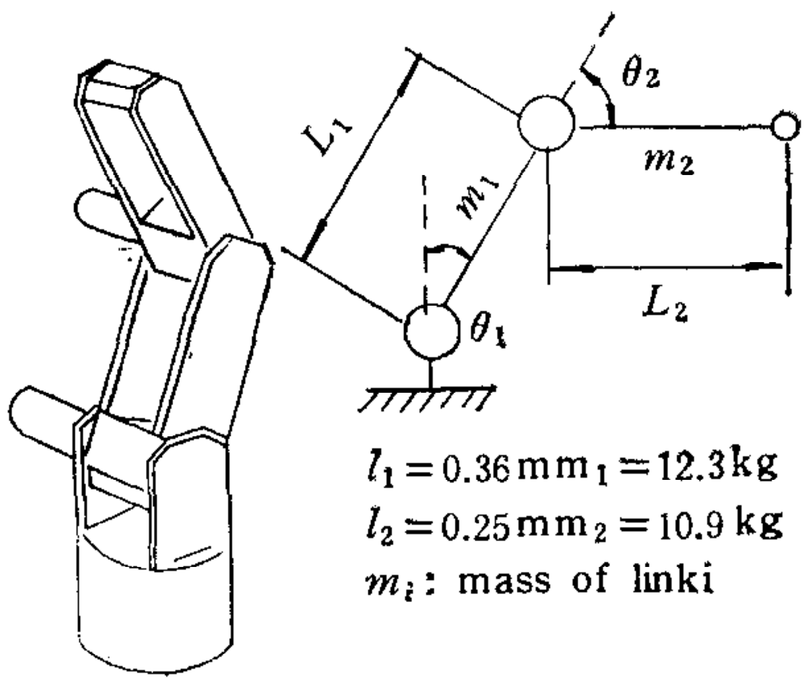

图 2 两个臂的机械手

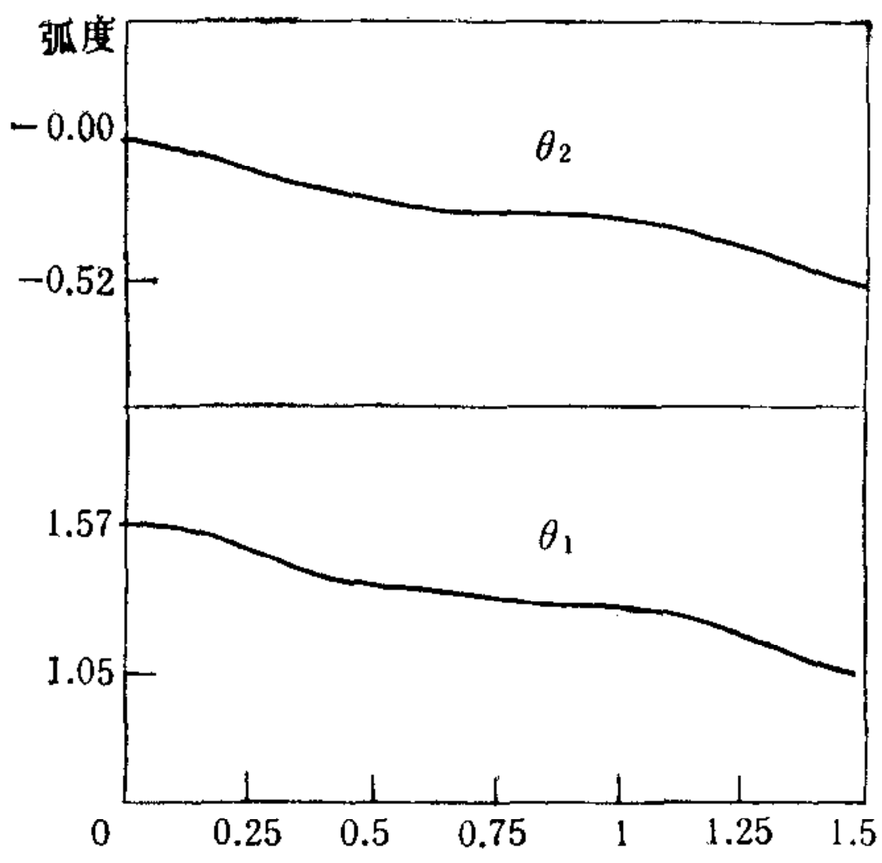

图 3 理想轨迹

的齿轮箱驱动的． 其控制电压由 $M68000$ 十六位单板机通过 12 位 D/A 转换器给出．关节的角位置是通过读安装在电机轴上的编码器而得到的． 整个系统的详细描述见文献[8]． 控制算法是由 PASCAL 语言和 $M68000$ 汇编语言来实现的． 由于单板机上无浮点处理器，故浮点运算是由软件来实现的，这样就对采样周期的选取产生限制，因此这里理想轨迹不能规划的过快.

包括执行器在内的两个臂的动力学方程为

$$\begin{vmatrix} \alpha+\beta+2\eta\cos\theta_2+I_1+h_{11}/h_{31} & \eta\cos\theta_2+\beta \\ \eta\cos\theta_2+\beta & \beta+h_{12}/h_{32} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{vmatrix}$$
$$+\begin{vmatrix} -\eta\dot{\theta}_2\sin\theta_2 & -(\dot{\theta}_1+\dot{\theta}_2)\eta\sin\theta_2 \\ \eta\dot{\theta}_1\sin\theta_2 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{vmatrix}$$
$$+\begin{vmatrix} \alpha\cos\theta_1+\eta\cos(\theta_1+\theta_2) \\ \eta\cos(\theta_1+\theta_2) \end{vmatrix} \frac{g}{l_1} = \begin{vmatrix} u_1 \\ u_2 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} h_{21}/h_{31} \\ h_{22}/h_{32} \end{vmatrix}^T \begin{vmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{vmatrix},$$

其中 $h_{ij}(i=1,2,3;j=1,2)$；I_1 和 l_1 为已知常数；g 重力加速度；α，β 和 η 为未知参数.已知参数和控制器的参数见表 1. 规划的理想轨迹见图 3. 在手臂 2 的端点，装有 2 公斤的负载. 这里取采样周期为 0.015 秒. 图 4 表示跟踪误差，图 5 表示无负载时的跟踪误差,此时未改变控制器的参数. 上述实验结果表明本文提出的控制算法是鲁棒的，具有良好的跟踪能力.

表 1　已知参数和控制器参数

h_{11}	0.042	h_{12}	0.033
h_{21}	3.5	h_{22}	3.04
h_{31}	0.027	h_{32}	0.016
l_1	0.36	I_1	−0.38
c_1	0.7	c_2	0.7
α	2.43	β	0.5
η	0.3	$\gamma(\Gamma=\gamma I)$	30
δ_1	9	δ_2	2
Φ_1	0.05	Φ_1	0.05

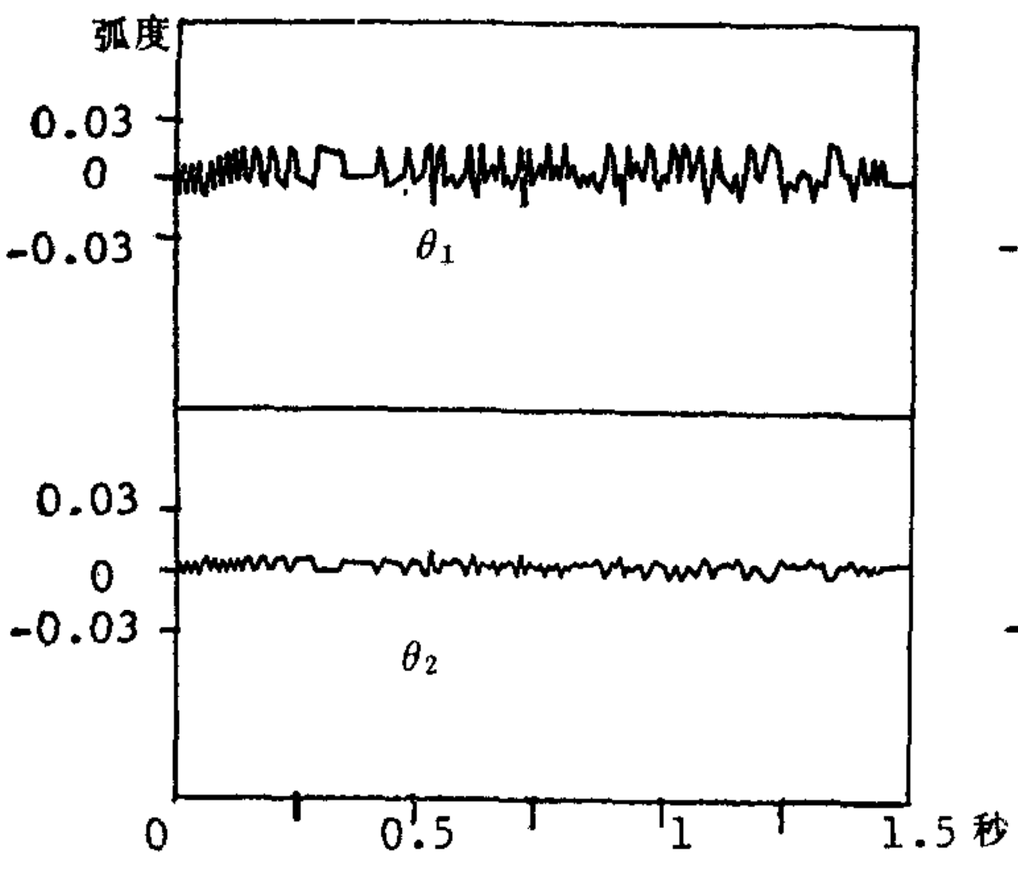

图 4　跟踪误差

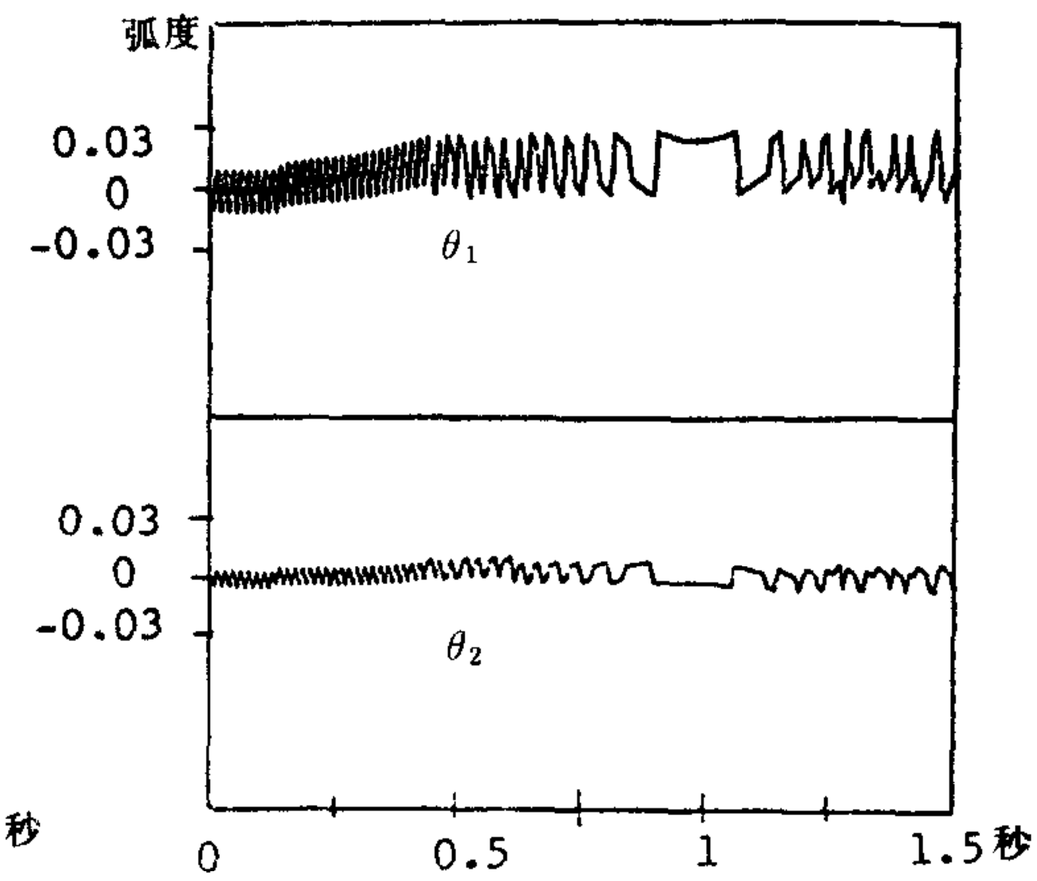

图 5　无负载时的跟踪误差

五、结 论

本文针对机器人提出了一种新的变结构控制方法。它将参数辨识与滑动模控制结合在一起，保证了系统跟踪的鲁棒性。通过对机械臂的实时控制，证明了本方法的可行性。

参 考 文 献

[1] Utkin, V. I., Discontinous Control Systems, State of Artin Theory and Application, 10th IFAC World Congress, Munich, 1987.

[2] Slotine, J. J. E. and Sastry, S. S., Tracking Control of Nonliner System Using Sliding Surface, with Applications to Robot Manipulator, *Int. J. Control*, **38**(1983), 465—492.

[3] Yeung, K. S. and Chen, Y. P., A New Controller Design for Manipulators Using the Theory of Variable Structure System, *IEEE Trans. Automa. Contr.*, **33**(1988), 200—206.

[4] Dote, Y., Shinojima, M. and Yoshimuar, H., Microprocessor-based Novel Variable Structure Control for Robot Manipulator, 10th IFAC World Congress, Munich, 1987.

[5] Hashimoto, H., Maruyama, K. and Marushima, F., Microprocessor-based Robust Control of Robot Arm Using Variable Structure Systems, *IEEE. Trans. Industr. Electron.*, **34**(1987), 11—18.

[6] Koditschek, D., Natural Motion of Robot Arm, IEEE Conf. Decision and Control, (1984).

[7] Khosla, P. and Kanade, T., Parameter Identification of Robot Dynamics, IEEE Conf. Decision and Control, (1985).

[8] Leung, T. P. and Fung, E. H. K., Microcomputer Control of An Experimental Five-axis Robot Manipulator, *Hong Kong Engineer*, **14**(1986), 5, 5—12.

VARIABLE STRUCTURE CONTROL OF ROBOT MANIPULATOR WITH ADAPTIVE FEEDFORWARD COMPENSATOR AND ITS IMPLEMENTATION

LIANG TIANPEI

(Dept. of Mechanical and Marine Engineering, Hong Kong Polytechnic, Hong Kong)

ZHOU QIJIE SU CHUNYI

(Dept. of Automation, South China University of Technology, Guangzhou)

ABSTRACT

In order to realize high-speed, high-precision control of robot manipulators, a new robust control algorithm is proposed by coupling the adaptive feedforward compensator to the variable structure control. Real-time control results show the validity and feasibility of the presented method.

Key words: Robot manipulator; variable structure control; feedforward compensation; application.