

基于终端滑模的机械手鲁棒自适应控制

高道祥, 薛定宇

(东北大学 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 对于不确定的机械手系统, 提出一种鲁棒自适应控制方法, 用自适应控制来估计系统的未知参数, 用终端滑模控制来减少不确定因素的影响, 为了避免因干扰的存在使自适应的估计参数发生漂移, 引入死区自适应控制. 仿真表明, 滑模控制不仅抑制了误差, 而且消除了死区自适应算法的局限性, 该算法在取得较好控制效果的同时, 具有很强的鲁棒性.

关键词: 机械手; 鲁棒控制; 自适应控制; 终端滑模; 死区

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Robust adaptive control of robotic manipulators based on terminal sliding mode

GAO Dao-xiang, XUE Ding-yü

(Key Laboratory of Process Industry Automation, Ministry of Education, Northeastern University,
Shenyang Liaoning 110004, China)

Abstract: A robust adaptive controller is proposed for uncertain robotic manipulators. The controller estimates the unknown physical parameters by adaptive law and eliminates the uncertainties by terminal sliding mode control. Dead-zone adaptive control strategy is then employed to prevent the drift of the estimated parameters. Simulation studies indicate that the sliding mode control can not only reject the disturbances, but also eliminate the drawback of the dead-zone adaptive control. Hence, a satisfactory control performance as well as a strong robustness can be achieved.

Key words: robotic manipulator; robust control; adaptive control; terminal sliding mode; dead-zone

1 引言(Introduction)

机械手自适应控制能够满足机械手末端执行器有效载荷大范围变化的需要, 能够在线估计机械手系统的未知参数. 在过去的十几年中, 研究者们提出了众多的机械手自适应算法^[1~3], 并对这些算法的全局收敛性进行了严格的证明.

机械手系统所具有的两类不确定性包括参数或结构化的不确定性与固有的或非结构化的不确定性. 自适应控制能够通过在线估计而不断减少结构化的不确定性^[4,5], 但是受到外界干扰和可持续激励条件的限制, 即使收敛, 估计的参数与真实参数之间也存在一定的误差. 文献[6]指出系统存在的未建模动态和不确定干扰容易引起辨识参数的发散, 进而导致整个系统控制性能的下降甚至不稳定. 高增益的鲁棒控制器^[7]能保证系统较小的跟踪误差, 但是, 高增益在实际系统中容易引起控制器的饱和并激发

未建模的高频动态. 不确定干扰的上界可以假设为一个常数或者是系统状态函数的范数^[8,9]. 根据这个假设已经设计出了一些轨迹跟踪的鲁棒控制器^[10], 来抑制参数误差和外界的干扰. 对于集中不确定有界干扰, 终端滑模控制是一种较为理想的方法. 文献[11]根据机械手动力学方程参数线性化的特点, 利用参数误差的上界, 基于机械手的标称系统, 设计了一种滑模控制器. 文献[12,13]提出的终端滑模控制, 采用了非线性滑模向量, 使系统状态在趋近滑模表面时具有更好跟踪性能.

本文结合自适应控制与滑模控制的优点, 设计了一种抑制参数估计误差和外界干扰的鲁棒自适应控制器. 为防止估计参数的漂移, 采用死区自适应算法. 通过自适应控制器, 将误差驱赶到一个误差带, 然后采用终端滑模控制使误差渐近趋向于零. 这样即可以保证在有界干扰下不会引起辨识参数的漂

移,又可以保证系统良好的跟踪性能.

2 n 连杆机械手模型的描述(Model description of n -link robotic manipulators)

如果考虑外部干扰力矩, n 连杆机械手的动力学模型可表示为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + \tau_d. \quad (1)$$

式中: $q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathbb{R}^n$ 表示机械手关节的位置、速度、加速度, $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为正定有界的惯量矩阵, $C(q, \dot{q})\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ 表示离心力和哥氏力项, $G(q) \in \mathbb{R}^n$ 表示重力项, $\tau \in \mathbb{R}$ 表示输入的控制力矩, $\tau_d \in \mathbb{R}^n$ 表示干扰力矩.

虽然式(1)所示的机械手动力学方程式非常复杂, 但由 n 个自由杆件所组成的机械系统是非常简单的, 其中一些特性有利于控制系统的分析与设计:

1) 参数线性化. 式(1)可写成

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta + \tau_d. \quad (2)$$

$Y(\cdot)$ 为机械手动力学方程的回归矩阵, θ 为线性化参数.

2) $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ 为斜对称矩阵, 即, $\forall x \in \mathbb{R}^n$, $x^T(\dot{M} - 2C)x = 0$.

3) $M(q)$ 满足 $\lambda_1 \|x\|^2 \leq x^T M(q)x \leq \lambda_2 \|x\|^2$, $\forall q$, $x \in \mathbb{R}^n$, $0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \infty$.

文中 $\|\cdot\|$ 在不作特别说明的情况下均指向量与矩阵的2-范数, $\lambda_{\min}(\cdot)$ 表示矩阵的最小奇异值.

3 终端滑模鲁棒自适应控制器设计(Design of robust adaptive controller based on terminal sliding mode)

3.1 控制器结构设计(Controller structure design)

考虑式(2)所示的机械手动力学系统, 将自适应与终端滑模控制相结合, 设计的控制律为

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r)(\hat{\theta} + u_1) + u_2 - Ks. \quad (3)$$

式中:

$$\begin{aligned} \dot{q}_r &= \dot{q}_d - \Lambda \tilde{q}^p, \\ \ddot{q}_r &= \ddot{q}_d - p\Lambda \text{diag}(\tilde{q}_1^{p-1}, \dots, \tilde{q}_n^{p-1})\dot{\tilde{q}}, \\ \tilde{q} &= q - q_d, \quad \tilde{q}^p = [\tilde{q}_1^p, \dots, \tilde{q}_n^p]^T, \\ \Lambda &= \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) > 0, \\ K &= \text{diag}(k_1, \dots, k_n) > 0, \\ 0 &< p \leq 1, \quad p = \omega_1/\omega_2, \quad \omega_1 < \omega_2, \end{aligned}$$

且为两个奇数. 定义滑模向量为

$$s = \dot{\tilde{q}} + \Lambda \tilde{q}^p. \quad (4)$$

辨识参数误差为 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta_0$, 其中: θ_0 为系统参数

的标称值, $\hat{\theta}$ 为待辨识参数值.

$$\begin{aligned} u_1 &= \begin{cases} -\frac{\rho_1 Y^T s}{\|Y^T s\|}, & \|Y^T s\| > 0, \\ 0, & \|Y^T s\| = 0, \end{cases} \\ u_2 &= \begin{cases} -\frac{\rho_2 s}{\|s\|}, & \|s\| > 0, \\ 0, & \|s\| = 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 ρ_1, ρ_2 分别为参数辨识误差 $\tilde{\theta}$ 和外界干扰力矩 τ_d 的上界.

参数估计采用如下的死区自适应算法:

$$\dot{\hat{\theta}} = \begin{cases} -\Gamma Y^T \bar{s}, & \|\tilde{q}\| > \delta, \\ 0, & \|\tilde{q}\| \leq \delta. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\bar{s} = \dot{\tilde{q}} + \Lambda \tilde{q}$, $\Gamma = \text{diag}(\gamma_1, \dots, \gamma_m) > 0$, m 为待辨识参数个数, δ 为死区大小.

注1 采用死区自适应算法, 在存在有界扰动的前提下, 也可以保证自适应回路参数和信号都有界. 很显然, 死区大小对自适应系统的全局稳定性有直接的影响. 死区越大, 自适应时间越短, 输出误差和参数误差就越大, 但稳定性易于保证, 死区过小, 虽然能提高跟踪精度, 但稳定性变差. 可以根据外界扰动的界限和对象参数的先验信息来选择死区大小, 当这些知识缺乏时, 只有加大死区, 这将加大跟踪误差, 即使扰动消失, 跟踪误差也不会消除, 这也是死区算法固有的缺陷.

3.2 稳定性分析(Stability analysis)

定理1 考虑闭环系统(1)(3)(5)(6), 则对于给定有界跟踪轨迹和任意初始误差 $\tilde{q}(0), \dot{\tilde{q}}(0)$, 跟踪误差 $\tilde{q}(t), \dot{\tilde{q}}(t)$ 是全局渐近收敛的.

证 将控制律式(3)(5)(6)代入式(1)得

$$\begin{aligned} M(q)\dot{s} + C(q, \dot{q})s &= \\ Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r)(\tilde{\theta} + u_1) + & \\ \tau_d + u_2 - Ks. \end{aligned} \quad (7)$$

考虑构造如下的李雅普诺夫函数

$$V(t) = s^T M(q)s/2. \quad (8)$$

利用机械手动力学方程的特性2), 沿式(7)解的轨迹求李雅普诺夫方程对时间的微分得

$$\dot{V}(t) = -s^T Ks + s^T Y(\tilde{\theta} + u_1) + s^T (\tau_d + u_2). \quad (9)$$

按照死区自适应算法, 当误差位于死区误差带之外, 系统参数估计值为 $\hat{\theta} = \int_0^t -\Gamma Y^T \bar{s} dt$, 按照李雅普诺夫原理设计的直接梯度方法, 如果死区误差带选择合理, 系统总能够在有限的时间内到达误差带之内, 因此, 当系统在 T 时刻到达误差带后, 系统的辨识参

数为常数, 即, $\hat{\theta} = \int_0^T -\Gamma Y^T \bar{s} dt$, 在有限时间内, $Y, \bar{s}$ 均为有界函数, 因此 $\hat{\theta}$ 是有界的, 由于假设了外界不确定干扰是有界的, 所以适当选取 $\rho_1 > 0, \rho_2 > 0$, 总有 $\|\tilde{\theta}\| \leq \rho_1, \|\tau_d\| \leq \rho_2$.

将控制量式(5)代入式(9)中, 有如下结果: 当 $\|Y^T s\| = 0, s^T Y(\tilde{\theta} + u_1) = 0$; 而当 $\|Y^T s\| > 0$ 时

$$\begin{aligned} s^T Y(\tilde{\theta} + u_1) &= \\ s^T Y(\tilde{\theta} - \rho_1 \frac{Y^T s}{\|Y^T s\|}) &\leq \\ \|s^T Y\|(\|\tilde{\theta}\| - \rho_1) &\leq 0. \end{aligned}$$

同理, 当 $\|s\| = 0$ 时, $s^T(\tau_d + u_2) = 0$; 当 $\|s\| > 0$ 时, $s^T(\tau_d + u_2) \leq 0$.

由于 $\|s\| \neq 0$ 时, $-s^T K s \leq -\lambda_{\min}(K)\|s\|^2 < 0$, 所以 $\dot{V}(t) < 0$. 说明 $\|s\|$ 以指数规律收敛于0, 在滑模 $s = \dot{q} + \Lambda \tilde{q}^p = 0$ 上, 定义李雅普诺夫函数 $V_m = \tilde{q}^T \tilde{q}/2$, 则 $\dot{V}_m = -\tilde{q}^T \Lambda \tilde{q}^p = -\sum_{i=1}^n \lambda_i \tilde{q}_i^{1+p}$, 由 p 的定义不难推出 $\dot{V}_m < 0$, 由此可以证明当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\tilde{q}(t) = 0, \dot{\tilde{q}}(t) = 0$. 这同时说明了上述算法能够消除死区自适应算法的缺陷

3.3 控制器的改进(Improvement in controller)

在实际应用中, 为了消除滑模附近的抖振现象, 需要将控制器中的 u_1, u_2 , 做如下的改进:

$$\begin{cases} u_1 = -\frac{\rho_1^2 Y^T s}{\rho_1 \|Y^T s\| + \varepsilon_1}, \\ u_2 = -\frac{\rho_2^2 s}{\rho_2 \|s\| + \varepsilon_2}. \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0$.

引理 1^[14,15] 对于系统 $\dot{x} = f(x(t), t)$, 若存在正定函数 $V(x)$ 满足

- 1) $\lambda_1 \|x\|^2 \leq V(x) \leq \lambda_2 \|x\|^2$;
- 2) $\dot{V}(x) \leq \lambda_3 \|x\|^2 + \varepsilon, \forall x, \forall t > 0$.

其中: $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0, \lambda_3 > 0, \varepsilon > 0$ 均为给定常数, 则对任意初始状态 $x(0)$, 下式成立:

$$\|x(t)\|^2 \leq \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \|x(0)\|^2 \exp(-\lambda t) + \frac{\varepsilon}{\lambda_1 \lambda_2} [1 - \exp(-\lambda t)] \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

其中 $\lambda = \lambda_3/\lambda_2 > 0$.

定理 2 考虑闭环系统(1)(3)(6)和(10), 对于给定有界跟踪轨迹和任意初始误差 $\tilde{q}(0), \dot{\tilde{q}}(0)$, 跟踪误差 $\tilde{q}(t), \dot{\tilde{q}}(t)$ 是一致最终有界的.

证 定义李雅普诺夫函数如式(8), 沿式(7)解的

轨迹求李雅普诺夫方程对时间的微分得式(9), 将式(10)的 u_1, u_2 代入式(9)中得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \\ &-s^T K s + s^T Y(\tilde{\theta} - \frac{\rho_1^2 Y^T s}{\rho_1 \|Y^T s\| + \varepsilon_1}) + \\ &s^T(\tau_d - \frac{\rho_2^2 s}{\rho_2 \|s\| + \varepsilon_2}) \leq \\ &-s^T K s + \|s^T Y\|(\|\tilde{\theta}\| - \frac{\rho_1^2 \|Y^T s\|}{\rho_1 \|Y^T s\| + \varepsilon_1}) + \\ &\|s^T\|(\|\tau_d\| - \frac{\rho_2^2 \|s\|}{\rho_2 \|s\| + \varepsilon_2}) \leq \\ &-s^T K s + \|s^T Y\|(\rho_1 - \frac{\rho_1^2 \|Y^T s\|}{\rho_1 \|Y^T s\| + \varepsilon_1}) + \\ &\|s^T\|(\rho_2 - \frac{\rho_2^2 \|s\|}{\rho_2 \|s\| + \varepsilon_2}) \leq \\ &-s^T K s + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \leq -\lambda_{\min}(K)\|s\|^2 + \varepsilon. \end{aligned} \quad (12)$$

式中 $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$. 由式(12), 引理和机械手动力学方程特性3)可知, s 是最终一致有界的, 并且当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\|s\|^2 \leq \varepsilon/(\lambda_1 \lambda)$. 根据以上的证明, 改进后的控制器能够保证将误差信号限制在一个误差带之内, 因此, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\tilde{q}(t), \dot{\tilde{q}}(t)$ 是一致最终有界的.

注 2 改进的控制器能够保证有界干扰下跟踪误差一致终值有界, 为了获得更好的控制效果, 应尽可能地选取较小的 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$. 通过仿真可以看到, 干扰上界的取值在保证系统稳定的前提下, 对于跟踪精度没有很大的影响, 可以根据具体需要确定.

注 3 本文死区自适应算法和参数投影法^[16]相比, 对系统先验知识要求较少, 简化了控制器的设计.

注 4 如果将系统参数误差看作外界干扰, 则可得到控制器 $\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r)\hat{\theta} + u_2 - Ks$, 如果将外界扰动引起的误差看作是由参数不确定性引起的, 则可得到另一控制器 $\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r)(\hat{\theta} + u_1) - Ks$, 从仿真的情况来看, 无论暂态性能还是稳态性能, 控制器式(3)的控制效果是要强于后两者的.

注 5 滑模式(4)中非线性项的引入在跟踪误差较小时能够提高控制器的控制作用, 从而进一步减少误差, 当误差较大时, 能够减少控制作用使控制量变化更平缓, 因为 $0 < p < 1$, 当 $\|\tilde{q}\| < 1, \|\tilde{q}\|^p > \|\tilde{q}\|$; 而 $\|\tilde{q}\| > 1, \|\tilde{q}\|^p < \|\tilde{q}\|$.

4 仿真分析(Simulation analysis)

这里将通过一个二连杆机械手的仿真实验来说明上述算法的可行性. 根据机械手动力学方程

式(1)(2),

$$M(q) = \begin{bmatrix} \theta_1 + \theta_2 + 2\theta_3 \cos q_2 & \theta_2 + \theta_3 \cos q_2 \\ \theta_2 + \theta_3 \cos q_2 & \theta_2 \end{bmatrix},$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -2\theta_3 \dot{q}_2 \sin q_2 & -\theta_3 \dot{q}_2 \sin q_2 \\ \theta_3 \dot{q}_1 \sin q_2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} \theta_4 g \cos q_1 + \theta_5 g \cos(q_1 + q_2) + \theta_6 g \cos(q_1 + q_2) \\ \theta_6 g \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix},$$

$\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]$ 为线性化后的参数向量,
 $\theta_1 = I_1 + m_1 r_1^2 + m_2 l_1^2$, $\theta_2 = I_2 + m_2 r_2^2$,
 $\theta_3 = m_2 r_2 l_1$, $\theta_4 = m_1 r_1$, $\theta_5 = m_2 l_1$, $\theta_6 = m_2 r_2$.

机械手参数设置为: $m_1 = 10 \text{ kg}$, $m_2 = 5 \text{ kg}$ 为连杆质量; $l_1 = l_2 = 1 \text{ m}$ 为连杆长度, $r_1 = r_2 = 0.5 \text{ m}$ 为连杆质心至关节距离; $I_1 = 5/6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $I_2 = 5/12 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 为连杆绕质心的转动惯量, 由此可计算机械手的标称参数值; $\theta_0 = [8.33, 1.67, 2.5, 5, 5, 2.5]^T$.

假设系统受到外界周期为 2π 的方波干扰:

$$\tau_{d1} = \begin{cases} 3, & 0 \leq t < \pi, \\ 0, & \pi \leq t < 2\pi, \end{cases}$$

$$\tau_{d2} = \begin{cases} 5, & 0 \leq t < \pi, \\ 0, & \pi \leq t < 2\pi, \end{cases}$$

机械手关节空间的期望轨迹为: $q_{1d} = (\sin(0.67t) + \sin(0.3t))\text{rad}$, $q_{2d} = (\sin(0.39t) + \sin(0.5t))\text{rad}$; 机械手关节初始位置与速度为 $q_{10} = q_{20} = 1 \text{ rad}$, $\dot{q}_{10} = \dot{q}_{20} = 0 \text{ rad/s}$.

控制器参数设置为 $K = \text{diag}(40, 40)$, $\Lambda = \text{diag}(5, 5)$, $\rho_1 = 6$, $\rho_2 = 12$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1.0$, $p = 9/11$, $\delta = 0.01$, $\Gamma = \text{diag}(2, 1, 0.2, 5, 5, 1.5)$.

注 6 图中的误差曲线与前文中定义的 $\bar{q}$ 稍有不同, 为了在同一个图中更清楚表示轨迹曲线与误差曲线, 图中误差 $e_i = q_{1d} - q_i$, $i = 1, 2$.

由图1、图2可以看出, 系统在较大的初始误差状态下, 取得了满意的暂态性能, 外界方波干扰在滑模控制器的作用下, 能够被抑制在给定的范围之内, 其稳态性能也是较为理想的. 图3表明, 死区自适应算法配合滑模控制器, 能够有效防止辨识参数的漂移, 确保系统的鲁棒性能.

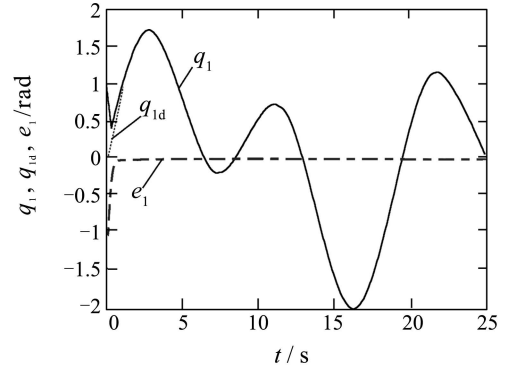


图1 关节1轨迹和跟踪误差

Fig. 1 Trajectory and tracking error of joint 1

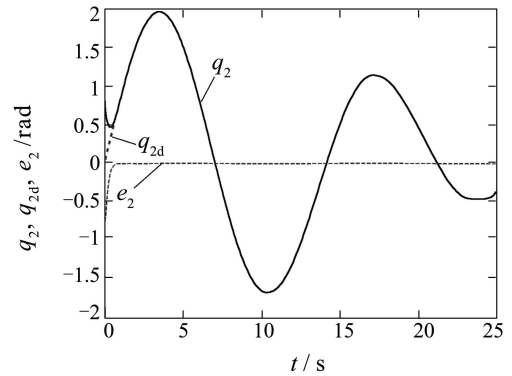


图2 关节2轨迹和跟踪误差

Fig. 2 Trajectory and tracking error of joint 2

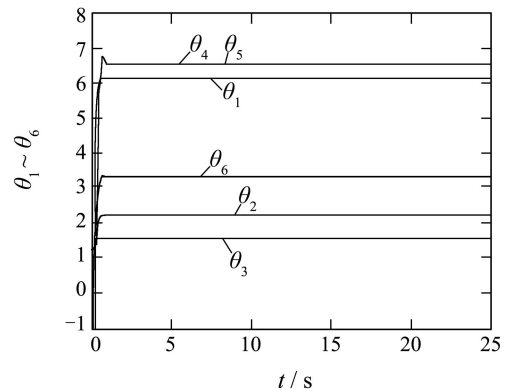


图3 自适应辨识参数

Fig. 3 Estimated parameters

图4给出了一个基于PD的自适应控制系统在不同死区($\delta = 0.1$ 和 $\delta = 0.01$)下的跟踪误差曲线, 各项参数与前文相同, 只是将PD控制器的参数改为 $K = \text{diag}(100, 100)$, 期望用控制器的高增益来抑制误差. 通过图4可以看出, 自适应控制能够依靠较高的增益将误差限制在合理的死区误差带内, 且具有一定的鲁棒性, 但由于死区自适应算法的局限性, 除了提高PD的增益, 很难再进一步缩小误

差, 而且, 系统对死区大小的变化随着PD增益的减少而更加敏感. 加入滑模控制之后, 参见图5(由于死区大小的不同对跟踪误差几乎是没有影响的, 因此这里只给出了 $\delta = 0.1$ 时的误差曲线), 跟踪误差不但被进一步的缩小了, 而且对死区的变化也不再敏感. 因此, 可以认为, 滑模控制不仅能够抑制外界干扰, 也能消除死区自适应固有的缺陷, 这有利于先验知识不足时死区大小的确定.

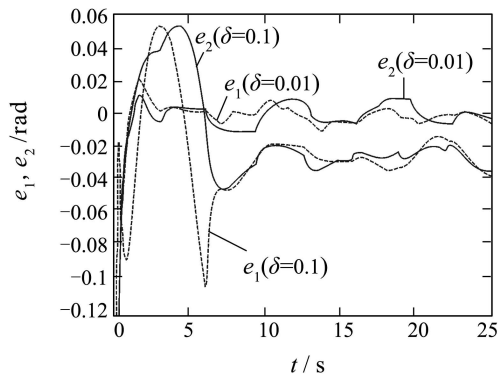


图4 基于PD自适应跟踪误差

Fig. 4 Tracking errors of PD adaptive control

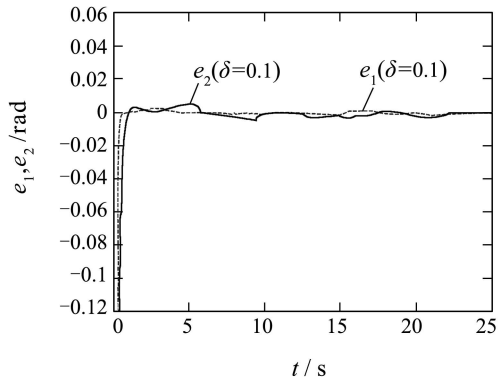


图5 终端滑模自适应控制跟踪误差

Fig. 5 Tracking errors of terminal sliding mode adaptive control

5 结论(Conclusion)

基于终端滑模的鲁棒自适应控制算法对于模型参数未知、初始误差较大且存在有界扰动的机械手系统具有较好的控制效果, 死区自适应算法虽然降低了系统的跟踪精度, 但克服了自适应控制辨识参数在外界干扰的作用下易发生漂移的缺点, 大大增加了自适应系统的鲁棒性能. 利用终端滑模控制抑制系统集中不确定的干扰, 消除死区自适应算法的缺陷, 能够有效地降低系统的增益. 从仿真的结果来看, 结合跟踪误差来调整控制器

的参数和自适应辨识死区的大小, 能得到理想的控制效果.

参考文献(References):

- [1] SLOTINE J J E, LI W. Composite adaptive control of robot manipulators[J]. *Automatica*, 1989, 25(4): 509 – 519.
- [2] ORTEGA R, SPONG M W. Adaptive motion control of rigid robots: a tutorial[J]. *Automatica*, 1989, 25(6): 877 – 888.
- [3] BERGHUIS H, ROBBERS H, NIJMEIJERS H. Experiment comparison of parameter estimation methods in adaptive robot control[J]. *Automatica*, 1995, 31(9): 1275 – 1285.
- [4] CHEN B S, CHANG Y C, LEE T C. Adaptive control in robotic system with H_∞ tracking performance[J]. *Automatica*, 1997, 33(2): 227 – 234.
- [5] ALONGE F, DIPPOLITO F, RAIMONDI F M. Globally convergent adaptive and robust control of robotic manipulators for trajectory tracking[J]. *Control Engineering Practice*, 2004, 12(9): 1091 – 1100.
- [6] ROHRS C, ATHANS M, VALAVANI L. Robustness of continuous time adaptive control algorithms in the presence of unmodeled dynamics[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1985, 30(9): 881 – 889.
- [7] CORLESS M J, LEITMANN G. Continuous state feedback guaranteeing uniform ultimate boundness for uncertainty dynamic system[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1981, 26(5): 1139 – 1144.
- [8] DAWSON D M, QU Z, LEWIS F L. Hybrid adaptive-robust control for a robot manipulator[J]. *Int J of Adaptive Control and Signal Processing*, 1992, 6(6): 537 – 545.
- [9] STEPANENKO Y, SU C Y. Variable structure control of robust manipulators with nonlinear sliding manifolds[J]. *Int J Control*, 1993, 58(2): 285 – 300.
- [10] ABDALLAH C, DAWSON D, DORATO P, et al. Survey of robust control of rigid robots[J]. *IEEE Control Systems*, 1991, 11(2): 24 – 30.
- [11] SPONG M V. On the robust control of robotic manipulators[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(11): 1782 – 1786.
- [12] YU T. Terminal sliding mode control for rigid robots[J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 51 – 56.
- [13] MAN Z, PAPLINSKI A P, WU H R. A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(12): 2464 – 2469.
- [14] 申铁龙. 机器人鲁棒控制基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. (SHEN Tielong. *Fundamentals of Robust Control of Robots*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.)
- [15] QU Z, DAWSON D M. *Robust Tracking Control of Robot Manipulator* [M]. New York: IEEE Press, 1996.
- [16] GOODWIN G C, MAYNE D Q. A parameter estimation perspective of continuous time model reference adaptive control[J]. *Automatica*, 1987, 23(1): 57 – 70.

作者简介:

高道祥 (1972—), 男, 博士研究生, 研究方向为机器人鲁棒控制、自适应控制, E-mail: Dausson@163.com;

薛定宇 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为控制系统CAD、机器人控制, E-mail: xue_dy@21cn.com.