文章编号: 1001-0920(2005)09-1069-04

一类非线性系统的鲁棒H∞控制

李桂芳, 王永成, 杨成梧
(南京理工大学 动力学院, 南京 210094)

摘　要: 研究一类可部分反馈线性化且具扰动三角结构的非线性参数不确定系统的鲁棒H_∞控制问题, 不确定参数属于已知紧集并以非线性形式进入系统. 在输入到状态稳定的理论框架下, 基于李雅谱诺夫函数和反演法构造出状态反馈控制器, 使得闭环系统对所有允许的参数不确定性是内稳定的, 且从扰动输入到输出有有界的L_2-增益. 控制器的设计不需解任何Hamilton-Jacobi方程, 并给出仿真算例说明了该结论的可行性和有效性.

关键词: 非线性系统; 鲁棒控制; 反演法; 有界L_2-增益; 输入到状态稳定
中图分类号: TP13　　**文献标识码**: A

Robust H∞ Control for a Class of Nonlinear Systems

LI Gui-fang, WANG Yong-cheng, YANG Cheng-wu
(School of Power, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. Correspondent: LI Gui-fang, E-mail: liguifanglgf@sohu.com)

Abstract: The problem of robust H_∞ control is considered for a class of nonlinear systems with parameter uncertainties. The uncertain parameter belongs to a known compact set and enters the system nonlinearly. The systems are assumed to admit partially feedback linearization and satisfy disturbance strict triangularity conditions. In the framework of the input-to-state stable theory, based on Lyapunov argument and backstepping design technique a state feedback controller is constructed which renders the closed-loop system internally stable with bounded L_2-gains from exogenous input to output for all admissible parameter uncertainties. No Hamilton-Jacobi equation is needed for the controller design. A simulation example shows the feasibility and effectiveness of the conclusion.

Key words: Nonlinear systems; Robust control; Backstepping; Bounded L_2-gains; Input-to-state stable (ISS)

1 引　言

近年来随着非线性几何理论的发展, 对非线性系统鲁棒H_∞控制问题的研究取得了丰硕的成果[1~7]. 文献[1,2]基于Hamilton-Jacobi方程或不等式解决仿射非线性不确定系统的鲁棒H_∞控制问题, 讨论的均为结构性不确定性, 并且Hamilton-Jacobi方程的求解很困难; 文献[3]讨论了一类带有参数不确定性的非线性系统H_∞控制问题, 基于李雅谱诺夫方法构造性地给出了经反馈线性化后系统正规型的相对度为一时问题可解的鲁棒控制器. 在此基础上, 本文研究了一类更广泛的带参数不确定性的非线性系统的鲁棒H_∞控制问题, 且输出带有外部扰动. 因输入到状态稳定概念可很好地将系统的性能要求与稳定性要求结合起来, 故本文在此框架下讨论非线性系统的鲁棒H_∞控制问题.

本文研究一类可部分反馈线性化的非线性参数不确定系统鲁棒H_∞控制问题, 不确定参数属于已知紧集且是非线性的进入系统, 另外调节输出包括扰动输入. 考虑到系统特殊的扰动三角结构, 基于李雅谱诺夫函数的反演法构造使闭环系统对所有允许的不确定性是内稳定的, 且从扰动输入到调节输出有有界L_2-增益的状态反馈控制器. 最后给出仿真算

收稿日期: 2004-09-29; **修回日期**: 2005-02-28.
基金项目: 南京理工大学青年发展基金项目(AB96037).
作者简介: 李桂芳(1978—), 女, 山西大同人, 博士生, 从事非线性不确定系统的鲁棒控制、无源系统理论的研究; 杨成梧(1937—), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士生导师, 从事广义系统、非线性系统控制的研究.

例

2 问题描述

考虑通常系统

$$\dot{x} = f(x, u). \tag{1}$$

其中: $x \in R^n, u \in R^m, f(0,0) = 0$.

引理1[8] 系统(1) 是输入到状态稳定(ISS) 当且仅当它存在输入到状态李雅谱诺夫函数(ISS-Lyapunov), 即一个正定且径向无界的光滑函数$V: R^n \to R$, 对某K_∞类函数α和χ, 任意的$x \in R^n$, $u \in L_\infty[0, \infty)$ 有

$$\nabla V(x) f(x, u) \leq -\alpha(\|x\|) + \chi(\|u\|). \tag{2}$$

注1 ISS 稳定性包含渐近稳定性

引理2 $X, Y \in R^n$, 则对任何正数 $\lambda > 0$, 都有如下不等式成立:

$$X^T Y \leq \frac{X^T X}{4\lambda^2} + \lambda^2 Y^T Y. \tag{3}$$

本文考虑如下非线性系统:

$$\begin{aligned} &\dot{x} = f(x) + g_1(x, \theta) u + g_2(x, \theta) w, \\ &y = h(x, \theta) + d(x, \theta) w. \end{aligned} \tag{4}$$

其中: $x \in R^n$ 为状态向量; $u \in R, w \in R$ 分别为控制输入和扰动输入; $y \in R^m$ 为调节输出, f, g_1, g_2, h 和 d 均为光滑函数向量, 且有$f(0) = 0, h(0, \theta) = 0$; 未知参数 θ 属于已知紧集 Θ, 即 $\theta \in \Theta$

若系统(4) 具有相对阶 $r(r < n)$, 并假设对于假想输出 $\xi = h_a(x)$ 和任意 $\theta \in \Theta$, 由 $g_1(x, \theta)$ 组成的分布是对合的, 而且该系统满足扰动严格三角条件[9]. 则通过适当的全局同胚坐标变换和反馈变换[7], 并取输出为$y = h(z, \theta) + d(z, \xi_1, \cdots, \xi_r, \theta) w$, 则系统(4) 可化为

$$\begin{aligned} &\dot{z} = f_0(z, \xi_1, \theta) + \hat{g}_0(z, \xi_1, \theta) \omega, \\ &\dot{\xi}_1 = \xi_2 + \phi_1(z, \xi_1, \theta) w, \\ &\vdots \\ &\dot{\xi}_{r-1} = \xi_r + \phi_{r-1}(z, \xi_1, \cdots, \xi_{r-1}, \theta) w, \\ &\dot{\xi}_r = v + \phi_r(z, \xi_1, \cdots, \xi_r, \theta) w. \\ &y = h(z, \theta) + d(z, \xi_1, \cdots, \xi_r, \theta) w. \end{aligned} \tag{5}$$

假设1 $\hat{g}(z, 0, \theta) = 0, \theta \in \Theta$ (6)

假设2 存在正常数 $\gamma_d > 0$, 使得

$$\begin{aligned} &d^T(z, \xi_1, \cdots, \xi_r, \theta) d(z, \xi_1, \cdots, \xi_r, \theta) \leq \\ &\gamma_d^2, \forall (z^T, \xi_1^T, \cdots, \xi_r^T) \in R^n, \theta \in \Theta, \end{aligned} \tag{7}$$

并存在连续函数 $h_0(z)$, 有

$$\begin{aligned} &h^T h = \|h(z, \theta)\|^2 \leq \|h_0(z)\|^2, \\ &\forall \theta \in \Theta, h_0(0) = 0. \end{aligned} \tag{8}$$

鲁棒H_∞控制问题: 对形如式(5) 的非线性方程, 给定正实数 $\gamma > \gamma_d > 0$, 设计状态反馈控制律 $v = v(z, \xi_1, \cdots, \xi_r)$, $v(0, \cdots, 0) = 0$, 使得对某个正定且适定的光滑函数$V(x)$ 和某个K_∞类函数$\alpha(\cdot)$, 在任何 $\forall \theta \in \Theta$, 有下式成立:

$$\begin{aligned} &\dot{V} + y^T y \leq \\ &\gamma^2 w^T w - \alpha(\|(z \quad \zeta \quad \cdots \quad \zeta)^T\|). \end{aligned} \tag{9}$$

假设3 存在光滑函数$W_0(z, \theta)$, 有下不等式成立:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial W_0(z, \theta)}{\partial z} \dot{z} \Big|_{\xi_1 = 0} \leq \\ &-\alpha^2 \|z\|^2 - \left(1 + \frac{\gamma_d^2}{\lambda_0^{(1)^2}}\right) \|h_0(z)\|^2, \\ &\forall \theta \in \Theta, \end{aligned} \tag{10}$$

这里的 $\lambda_0^{(1)}$ 满足

$$\hat{\gamma}^{(1)^2} = \gamma^2 - \gamma_d^2 - \lambda_0^{(1)^2} - \lambda_2^{(1)^2}, \tag{11}$$

注2 假设3 是当系统(5) 输出取特殊情况 $y = \zeta$ 时, 系统的零动态为渐近稳定条件的推广.

3 主要结论

定理1 给定正实数 $\gamma > \gamma_d$, 若非线性不确定系统(5) 满足假设1～ 假设3, 则存在状态反馈控制律 $v = v(z, \xi_1, \cdots, \xi_r)$, $v(0, \cdots, 0) = 0$, 使得闭环系统对所有允许的参数不确定性是内稳定的, 且从 w-y 有有界的L_2-增益

证明 **Step1** 考虑(z, ξ_1)-子系统, 由假设1 知, 存在光滑函数 $g_0(z, \xi_1, \theta)$, 使得 $\hat{g}_0(z, \xi_1, \theta) = g_0(z, \xi_1, \theta) \xi_1$, 故该子系统化为

$$\begin{aligned} &\dot{z} = f_0(z, \xi_1, \theta) + g_0(z, \xi_1, \theta) \xi_1 w, \\ &\dot{\xi}_1 = \nu_1 + \phi_1(z, \xi_1, \theta) w, \\ &y = h(z, \theta) + d(z, \xi_1, \cdots, \xi_r, \theta) w, \end{aligned} \tag{12}$$

其中 ν_1 是假想控制律 因为$f_0(0, 0, \theta) = 0$, 故存在光滑函数$f_{01}(z, \theta)$ 和$f_{02}(z, \xi_1, \theta)$, 使得

$$f_0(z, \xi_1, \theta) = f_{01}(z, \theta) + f_{02}(z, \xi_1, \theta) \xi_1,$$

且$f_{01}(0, \theta) = 0$.

取候选李雅谱诺夫函数

$$W_1(z, \xi_1, \theta) = W_0(z, \theta) + \frac{1}{2}\xi_1^2, \tag{13}$$

使其沿系统(12) 对时间t进行求导并结合假设2, 可得

$$\begin{aligned} &\dot{W}_1(z, \xi_1, \theta) + y^T y - \gamma^2 w^T w \leq \\ &\frac{\partial W_0(z, \theta)}{\partial z}[f_{01}(z, \theta) + f_{02}(z, \xi_1, \theta) \xi_1 + \\ &g_0(z, \xi_1, \theta) \xi_1 w] + \xi_1(\nu_1 + \phi_1(z, \xi_1, \theta) w) + \\ &\left(1 + \frac{\gamma_d^2}{\lambda_0^{(1)^2}}\right) h^T h + (\gamma_d^2 + \lambda_0^{(1)^2} - \gamma^2) w^T w \leq \\ &-\alpha^2 \|z\|^2 + \xi_1 \nu_1 + \frac{\partial W_0(z, \theta)}{\partial z} f_{02}(z, \xi_1, \theta) \xi_1 + \\ &\xi_1 \left[\frac{\partial W_0(z, \theta)}{\partial z} g_0(z, \xi_1, \theta) + \phi_1(z, \xi_1, \theta)\right] w + \end{aligned}$$

$$(\gamma_d^2+\lambda_0^{(1)^2}-\gamma^2)w^Tw.$$

记

$$\Phi_1(z,\xi_1,\theta):=\frac{\partial W_0(z,\theta)}{\partial z}f_{02}(z,\xi_1,\theta),$$

$$\Phi_1^*(z,\xi_1,\theta):=\Phi_1(z,\xi_1,\theta^*),$$

因有 $\Phi_1(0,\xi_1,\theta)=0$, 故存在光滑函数 $\Phi_{11}(z,\xi_1,\theta)$, 使得 $\Phi_1-\Phi_1^*=\Phi_{11}(z,\xi_1,\theta)z$, 且有 $\|\Phi_{11}(z,\xi_1,\theta)\|^2\le\delta^2_{\Phi_{11}}(z,\xi_1)$.

再由引理 2 可得

$$\xi_1(\Phi_1-\Phi_1^*)=\xi_1\Phi_{11}(z,\xi_1,\theta)z\le\frac{\delta^2_{\Phi_{11}}}{4\lambda_1^{(1)^2}}\xi_1^2+\lambda_1^{(1)^2}\|z\|^2.$$

令

$$\Phi_2(z,\xi_1,\theta):=\frac{\partial W_0(z,\theta)}{\partial z}g_0(z,\xi_1,\theta)+\phi_1(z,\xi_1,\theta),$$

且 $\|\Phi_2(z,\xi_1,\theta)\|^2\le\delta^2_{\Phi_2}(z,\xi_1)$, 同上亦有

$$\xi_1\Phi_2w\le\frac{\delta^2_{\Phi_2}}{4\lambda_2^{(1)^2}}\xi_1^2+\lambda_2^{(1)^2}\|w\|^2.$$

于是得到

$$\dot W_1(z,\xi_1,\theta)+y^Ty-\gamma^2w^Tw\le -(\alpha^2-\lambda_1^{(1)^2})\|z\|^2+(\gamma_d^2+\lambda_0^{(1)^2}+\lambda_2^{(1)^2}-\gamma^2)\|w\|^2+\xi_1\left[\nu_1+\Phi_1^*+\left(\frac{\delta^2_{\Phi_{11}}}{4\lambda_1^{(1)^2}}+\frac{\delta^2_{\Phi_2}}{4\lambda_2^{(1)^2}}\right)\xi_1\right].$$

适当选择正实数 $\lambda_0^{(1)},\lambda_1^{(1)}$ 和 $\lambda_2^{(1)}$, 使得存在正实数 $\hat\alpha$ 和 $\hat\gamma^{(1)}$, 满足 $\hat\alpha^2=\alpha^2-\lambda_1^{(1)^2}$ 和式(11), 并取 $\beta_1^2=\min\{\hat\alpha^2,1\}$, 则在假想控制律

$$\nu_1=-\Phi_1^*-\left(1+\frac{\delta^2_{\Phi_{11}}}{4\lambda_1^{(1)^2}}+\frac{\delta^2_{\Phi_2}}{4\lambda_2^{(1)^2}}\right)\xi_1 \tag{14}$$

的作用下, 有

$$\dot W_1(z,\xi_1,\theta)+y^Ty-\gamma^2w^Tw\le -\beta_1^2(\|(z\quad \xi_1)^T\|)^2. \tag{15}$$

Step k+1　假设已找到假想控制律 $\nu_i(z,\xi_1,\cdots,\eta_i)$, $\nu_i(0,\cdots,0)=0$, $i=1,2,\cdots,k-1$, 经坐标变换 $\eta_{i+1}=\xi_{i+1}-\nu_i$, $i=1,2,\cdots,k-1$, 当 $\eta_{k+1}=0$ 时选李雅谱诺夫函数

$$W_k(z,\xi_1,\cdots,\eta_k,\theta)=W_0(z,\theta)+\frac12\xi_1^2+\frac12\sum_{i=2}^{k}\eta_i^2$$

满足

$$\dot W_k(z,\xi_1,\cdots,\eta_k,\theta)+y^Ty-\gamma^2w^Tw\le -\beta_k^2(\|(z\quad \xi_1\quad \cdots\quad \eta_k)^T\|)^2. \tag{16}$$

在坐标变换 $\eta_{i+1}=\xi_{i+1}-\nu_i(i=1,2,\cdots,k)$ 下, 原系统的 $(z,\xi_1,\xi_1,\cdots,\xi_{k+1})$-子系统化为

$$\begin{bmatrix}\dot z\\ \dot\xi_1\\ \dot\eta_2\\ \vdots\\ \dot\eta_k\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}f_0(z,\eta_1,\theta)\\ \eta_2+\nu_1\\ \eta_3+\nu_2+f_1\\ \vdots\\ \nu_k+f_{k-1}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\0\\0\\0\\1\end{bmatrix}\eta_{k+1}+\begin{bmatrix}g_0(z,\xi_1,\theta)\xi_1\\ \phi_1\\ g_1\\ \vdots\\ g_{k-1}\end{bmatrix}w, \tag{17}$$

$$\dot\eta_{k+1}=\nu_{k+1}+f_k+g_kw,$$

$$y=h(z,\theta)+d(z,\xi_1,\cdots,\xi_r,\theta)w.$$

其中

$$f_j:=-\left(\frac{\partial\nu_j}{\partial z}f_0+\frac{\partial\nu_j}{\partial\xi_1}(\eta_2+\nu_1)+\cdots+\frac{\partial\nu_j}{\partial\eta_i}(\eta_{i+1}+\nu_i+f_{i-1})\right),$$

$$j=1,2,\cdots,k,\ i=2,3,\cdots,k;$$

$$g_j:=\phi_{j+1}-\left(\frac{\partial\nu_j}{\partial z}g_0\xi_1+\frac{\partial\nu_j}{\partial\xi_1}\phi_1+\cdots+\frac{\partial\nu_j}{\partial\eta_i}g_{i-1}\right),$$

$$j=1,2,\cdots,k,\ i=2,3,\cdots,k;$$

且 $f_i(0,\cdots,0,\theta)=0$, $i=1,2,\cdots,k$.

下面寻找控制律 $\nu_k(z,\xi_1,\cdots,\eta_k)$, $\nu_k(0,\cdots,0)=0$, 使得

$$W_{k+1}(z,\xi_1,\cdots,\eta_{k+1},\theta)=W_0(z,\theta)+\frac12\xi_1^2+\frac12\sum_{i=2}^{k+1}\eta_i^2$$

满足

$$\dot W_{k+1}(z,\xi_1,\cdots,\eta_{k+1},\theta)+y^Ty-\gamma^2w^Tw\le -\beta_{k+1}^2(\|(z\quad \xi_1\quad \cdots\quad \eta_{k+1})^T\|)^2. \tag{18}$$

候选函数 W_{k+1} 沿式(17) 对时间 t 求导, 得

$$\dot W_{k+1}(z,\xi_1,\cdots,\eta_{k+1},\nu)+y^Ty-\gamma^2w^Tw\le \dot W_0(z,\theta)+\xi_1\dot\xi_1+\sum_{i=2}^{k-1}\eta_i\dot\eta_i+\eta_k(\nu_k+f_{k-1}+g_{k-1}w)+\eta_{k+1}(\eta_k+\nu_{k+1}+f_k+g_kw)+y^Ty-\gamma^2w^Tw.$$

因 $f_k(0,\cdots,0,\theta)=0$, 故存在光滑函数 f_{ki}, $i=1,2,\cdots,k+1$, 使得

$$f_k=f_{k1}z+f_{k2}\xi_1+f_{k3}\eta_2+\cdots+f_{k,k+1}\eta_k,$$

且

$$\|f_{ki}\|^2\le\delta^2_{ki},\ i=1,2,\cdots,k+1,$$

$$\|g_k\|^2\le\delta^2_{k0}.$$

类似于前述证明, 由引理 2 可知, 存在正实数 λ_{kj}^{k+1}, $j=0,1,\cdots,k+1$, 使得

$$\dot W_{k+1}(z,\xi_1,\cdots,\eta_{k+1},\theta)+y^{\mathrm T}y-\gamma^2 w^{\mathrm T}w\le$$
$$-\beta_k^2(\|(z\quad \zeta_1\quad\cdots\quad\eta_k)^{\mathrm T}\|)^2+$$
$$\eta_{k+1}\left[\eta_k+v_{k+1}+\left(\sum_{j=0}^{k+1}\frac{1}{4\lambda_{kj}^{(k+1)^2}}\delta_{kj}^2\right)\eta_{k+1}\right]+$$
$$\lambda_{k1}^{(k+1)^2}\|z\|^2+\lambda_{k2}^{(k+1)^2}\xi_1^2+\sum_{j=3}^{k+1}\lambda_{kj}^{(k+1)^2}\eta_{j-1}^2-$$
$$\hat\gamma^{(k)^2}\|w\|^2+\lambda_{k0}^{(k+1)^2}w^{\mathrm T}w.$$

适当选取正实数 $\lambda_{k+1}^{(k+1)}$, 使得存在正实数 $\hat\gamma^{(k+1)}$, 满足 $\hat\gamma^{(k+1)^2}=\hat\gamma^{(k)^2}-\lambda_{k+1}^{(k+1)^2}$, 并取 $\beta_{k+1}^2=\min\{\beta_k^2,\lambda_{k1}^{(k+1)^2},\cdots,\lambda_{k,k+1}^{(k+1)^2}\}$, 则在假想控制律

$$v_{k+1}=-\eta_k-\left(1+\left(\sum_{j=0}^{k+1}\frac{1}{4\lambda_{kj}^{(k+1)^2}}\delta_{kj}^2\right)\right)\eta_{k+1}\tag{19}$$

作用下, 便有

$$\dot W_{k+1}(z,\xi_1,\cdots,\eta_{k+1},\theta)+y^{\mathrm T}y-\gamma^2w^{\mathrm T}w\le$$
$$-\beta_{k+1}^2(\|(z\quad\zeta_1\quad\eta_2\quad\cdots\quad\eta_{k+1})^{\mathrm T}\|)^2.\tag{20}$$

Step r　继续上述递推过程, 当 $k=r-1$ 时获得最终的实际控制 v, 使得系统满足

$$\dot W_r(z,\xi_1,\cdots,\eta_r,\theta)+y^{\mathrm T}y-\gamma^2w^{\mathrm T}w\le$$
$$-\beta_r^2(\|(z\quad\zeta_1\quad\eta_2\quad\cdots\quad\eta_r)^{\mathrm T}\|)^2.\tag{21}$$

于是非线性系统(5) 的鲁棒 H_∞ 控制问题有解 □

4　仿真算例

考查如下系统

$$\begin{aligned}\dot z&=-2z^3-z,\\ \dot\xi_1&=\xi_2+\sin\theta\cdot zw,\\ \dot\xi_2&=v+w,\\ y&=z^2+\frac{\cos\theta}{2}w,\ \theta\in[0,\pi].\end{aligned}\tag{22}$$

取性能指标 $\gamma^2=1$, 且有 $\gamma_d^2=\frac{1}{4}$. 定理 1 的 $f_{01}=-2z^3-z$, $f_{02}=0$, $h_0(z)=z^2$, $\Phi_1^*=0$, $\Phi_2=\sin\theta\cdot z$, $\delta_{11}^2=4\xi_1^2(2z^3+z)^2$, $\delta_{12}^2=(1+z^2)^4$, $\delta_{13}^2=(1+z^2)^2$, $\delta_{g_2}^2=(1+(1+z^2)|z|)^2$, 并取 $\delta_{\Phi_{11}}=0$, $\delta_{\Phi_2}^2=z^2$, $\alpha^2=1$, $\hat\alpha^2=\frac{1}{2}$, $\lambda_0^{(1)^2}=\frac{1}{4}$, $\lambda_1^{(1)^2}=\frac{1}{2}$, $\lambda_2^{(1)^2}=\frac{1}{4}$, $\lambda_3^{(2)^2}=1$, $\lambda_{11}^{(2)^2}=1$, $\lambda_{12}^{(2)^2}=\frac{1}{4}$, 则由定理 1 可得鲁棒 H_∞ 控制问题有解的真实控制为

$$\begin{aligned}v=-\xi_1-[&1+\xi_1^2(2z^3+z)^2+\\&(1+z^2)^4+(1+z^2)^2+\\&\frac{1}{4}(1+(1+z^2)|z|)^2]\eta_2\end{aligned}\tag{23}$$

于是原系统(22) 满足

$$\dot W^2(z,\xi_1,\eta_2,\theta)+y^{\mathrm T}y-w^{\mathrm T}w\le$$
$$-\frac{1}{4}(\|(z\quad\zeta_1\quad\eta_2)^{\mathrm T}\|)^2.\tag{24}$$

其仿真曲线如图 1 和图 2 所示

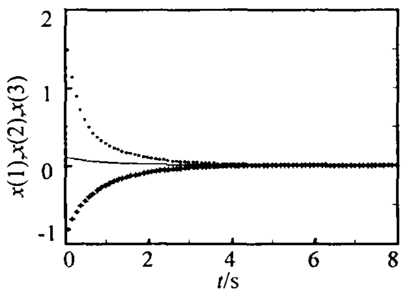

图 1　状态变量的曲线

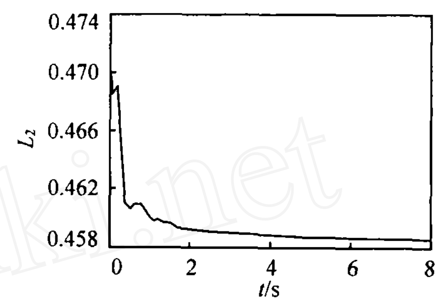

图 2　L_2 增益曲线

5　结　　论

本文针对一类可部分反馈线性化的非线性参数不确定系统, 研究了它的鲁棒 H_∞ 控制问题 基于李雅谱诺夫函数的反演法构造出状态反馈控制器使得闭环系统对允许的参数不确定性是内稳定的, 且从扰动输入到调节输出有有界 L_2-增益的状态反馈控制器 它隐含着可显式构造控制器使该系统的鲁棒 H_∞ 控制问题可解 仿真结果说明, 所设计的控制器具有很好的鲁棒性和控制性能

参考文献(References)

[1] Tielong Shen, Katsutoshi Tamura. Robust H_∞ Control of Uncertain Nonlinear System Via State Feedback[J]. *IEEE Transcation Automatic Control*, 1995, 40(4): 766-769.

[2] Tielong Shen, Katsutoshi Tamura, Gu D W, et al. Robust H_∞ Control of Nonlinear Systems with Structured Perturbation [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Washington, 1995: 4219-4220.

[3] Xie L H, Su W Z. Robust H_∞ Control for a Class of Cascaded Nonlinear Systems [J]. *IEEE Transcation Automatic Control*, 1997, 42(10): 1465-1469.

[4] Su W Z, Xie L H, Carlos E de Souza. Global Robust Disturbance Attenuation and Almost Disturbance Decoupling for Uncertain Cascaded Nonlinear Systems [J]. *Automatica*, 1999, 35(4): 697-707.

(下转第 1076 页)

2D-DCT 系数作为观测向量, 降低了观测向量的维数, 识别率为 86% , 与 Samaria 的识别效果相当. 尽管Nefian 采用的 EHMM 具有较高的识别率, 但它实际上是伪 2D-HMM 模型, 观测向量数多, 状态总数多, 对模型进行训练所需的时间较长. 本文方法的识别率达到 99% , 而且仅采用 1D-HMM , 观测向量数较少, 状态数也少, 因此整体性能较好.

5 结 语

本文提出一种基于 Gabor 变换且结合 ICA 和 HMM 的人脸识别方法, 并与Nefian 方法进行了比较. 实验结果表明, 本文方法识别率较高, 具有良好的发展前景. 但本文算法在特征提取上所需的计算量较大, 在今后的研究中可采用快速算法降低复杂度, 使本算法更有利于工程应用.

参考文献(References)

[1] Gong S, Psarrou A. *Dynamic Vision: From Images to Face Recognition*[M]. London: Imperial College Press, 2000: 5-20.

[2] Nefian A. *A Hidden Markov Model-based Approach for Face Detection and Recognition* [D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 1999.

[3] Bicego M, Castellani U, Murino V. Using Hidden Markov Models and Wavelets for Face Recognition[A]. *Proc of the 12th Int Image Analysis and Processing*[C]. Mantova, 2003: 52-56.

[4] 刘小军, 邹谋炎. 一种基于奇异值分解和隐马尔可夫模型的人脸识别方法[J]. *计算机学报*, 2003, 26(3): 340-344.
(Liu X J, Zou M Y. An Approach for Face Recognition Based on Singular Value Decomposition and Hidden Markov Model[J]. *Chinese J of Computers*, 2003, 26(3): 340-344.)

[5] Othman H, Aboulnasr T. A Separable Low Complexity 2D HMM with Application to Face Recognition [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(10): 1229-1238.

[6] Lades M, Vorbruggen J C, Buhmann J. Distortion Invariant Object Recognition in the Dynamic Link Architecture [J]. *IEEE Trans on Computers*, 1993, 42(3): 300-311.

[7] Tenenbaum J, Silva V, Langford J. A Global Geometric Framework for Nonlinear Dimensionality Reduction[J]. *Science*, 2000, 290(22): 2319-2323.

[8] Comon P. Independent Component Analysis: A New Concept[J]. *Signal Processing*, 1994, 36(3): 287-314.

[9] Rabiner L. A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Application in Speech Recognition[J]. *Proc of the IEEE*, 1989, 77(2): 257-286.

[10] Samaria F. *Face Recognition Using Hidden Markov Model* [D]. Cambridge: University of Cambridge, 1994.

(上接第 1072 页)

[5] Fei S M. An H_∞ Approach to Robust Stabilization of Nonlinear Uncertain Systems, 1995, 10(5): 390-394.

[6] Wu M, Zhang L B, Gui W H. Analisis and Synthesis for Robust Control of Uncertain Nonlinear Systems[J]. *Control Theory and Applications*, 2002, 19(2): 203-206.

[7] Isidori A. *Nonlinear Control Systems*[M]. 3nd ed. New York: Springer, 1995.

[8] Daniel Liberzon, Eduardo D Sontag, Wang Yuan. Universal Construction of Feedback Laws Achieving ISS and Integral-ISS Disturbance Attenuation [J]. *Systems and Letters*, 2002, 46(2): 111-127.

[9] Wei Lin. Global Robust Stabilization of Minimum-phase Nonlinear Systems with Uncertainty [J]. *Automatica*, 1997, 33(3): 453-462.