第5卷第3期2007年9月
1672-6553/2007/05(3)/228-5

动力学与控制学报
JOURNAL OF DYNAMICS AND CONTROL

Vol.5 No.3
Spe. 2007

基于参数自适应延时反馈的混沌系统控制及应用*

王林泽　周军楠

(杭州电子科技大学计算机应用技术研究所,杭州　310018)

摘要　针对延迟反馈法参数较难确定的问题,给出了一种自适应调节反馈系数方法来控制非线性Lorenz混沌系统的方案.数值仿真结果表明,选择适当的延迟时间和反馈系数能够控制系统的不稳定周期轨道、消除混沌,并能使系统从失稳状态进入稳定状态.由于不需要外加参考信号,可以在混沌态的任意时刻施加控制,所以该方法简单易行.同时将以上控制效果应用于动画的控制中,对指定动画角色行为进行控制,使其可以运动到混沌的轨道上或者某一个特殊的轨迹上.

关键词　不稳定周期轨道,　延迟反馈控制,　Lorenz系统稳定性,　混沌,　动画

引言

非线性系统广泛存在于气象、物理、化学、生物等各个领域,在一定条件下,非线性系统将导致混沌,由于在现实生活中,混沌运动往往是有害的,所以研究如何避免或控制混沌运动是当前自然科学基础研究的热门课题之一.自从20世纪90年代初出现了混沌控制的OGY法(参数扰动法)以来,混沌控制受到广泛的关注,相继出现了偶然比例反馈(Occasional Proportional Feedback,OPF)、自适应控制、线性反馈控制、自控制反馈控制等方法[1-8].在这些方法中,由K. Pyragas提出的延迟反馈控制法(Time-delayed Feedback Control,DFC)具有广泛的适应性,它利用简单的反馈来控制混沌吸引子不稳定的周期轨道(Unstable Periodic Orbits,UPO),既适用于低维系统混沌的控制,也适用于高维系统和无限维延迟微分动力系统混沌的控制,甚至可用于时空混沌的控制,但该反馈控制方法中计算反馈系数比较麻烦.由于Lorenz系统的混沌轨迹较为丰富[9-14],本文采用延迟反馈控制法研究Lorenz系统混沌控制,在延迟反馈控制方法的基础上提出了一种选择合适的时间延迟来自动调节反馈系数的方法,仿真结果表明,该方法具有较好的控制效果,并且由此给出了一个动画控制的应用实例.

1　混沌系统的延迟反馈模型

本文采用经典的Lorenz系统数学模型[3],其动力学方程为

$$\begin{cases}\mathrm{d}x/\mathrm{d}t=a(y-x)\\ \mathrm{d}y/\mathrm{d}t=-xz+cx-y\\ \mathrm{d}z/\mathrm{d}t=xy-bz\end{cases}\tag{1}$$

式(1)中a,c和b分别是控制参数Prantdl数、Rayleigh数、正常数.这里x正比于对流运动的强度,y正比于水平方向温度的变化,z正比于竖直方向温度的变化.(x,y,z)代表三维相空间.当取$a=10$、$c=28$、$b=8/3$时,系统(1)显示为混沌状态的Loren吸引子,其轨道运动是遍历的.如何消除上述混沌现象、使系统的UPO稳定在某一轨道上是本文研究的主要内容.

为了丰富和发展Lorenz混沌系统的应用方法,延迟反馈控制器设计为

$$u(t)=k(z(t-\tau)-z(t))\tag{2}$$

式中$z(t)$、$z(t-\tau)$分别为t时刻$z(t)$值及其延迟量,τ为延迟时间,k为反馈系数.把时间延迟反馈$u(t)$加到Lorenz系统的z轴上,得

$$\begin{cases}\mathrm{d}x/\mathrm{d}t=a(y-x)\\ \mathrm{d}y/\mathrm{d}t=-xz+cx-y\\ \mathrm{d}z/\mathrm{d}t=xy-bz+u(t)\end{cases}\tag{3}$$

式(3)是把输出信号以特定的方式反馈给系统来实现控制,该反馈以输出信号与延迟输出信号之差作为控制信号,反馈控制框图如图1所示.这种反馈仅需要一条延迟线,其可控性分析见文献[5][6].这种反馈控制方法的可行性在于:当对某个

2006-11-07收到第1稿,2007-04-10收到修改稿.
*浙江省教育厅科研计划项目资助(20040459)

变量进行负反馈操作时,抑制了该变量中所包含的各个不稳定模的发散性质. 由于所有不稳定模在该变量方向上都有分量,该单一变量上的负反馈就有可能有效地抑制所有不稳定模,从而达到稳定目标状态的目的. 它取当前信号与 τ 时间以前的输出信号之差作为反馈信号的来源,无需外加参考信号,由于延迟反馈产生一个作用明显的扰动项,使得稳定流形和不稳定流形不再横截相交,从而达到控制混沌的目的.

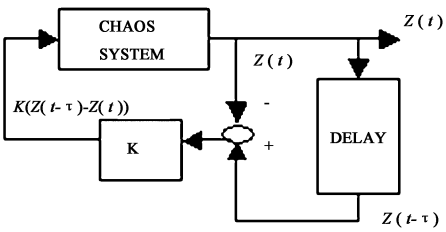


图 1　延迟反馈框图

Fig. 1　Structural picture of time – delay feedback

2　参数的确定方法

为实现所期望的 UPO 稳定化,在实验中仅需调节延迟时间 τ 和反馈系数 k,但要确定这两个参数并非易事. 文献[5]根据 Melnikov 方法分析延迟反馈控制的机理,得出延迟时间 τ 与混沌吸引子的不稳定周期轨道的周期无关,不必是 UPO 周期的整数倍,它与 UPO 的周期无关的结论,从而给 τ 和 k 的确定带来方便.

2.1　延迟时间 τ 的确定

为了控制不稳定周期 1 轨道,延迟时间 τ_n 被选定为两个相邻的输出信号极大值间的时间间隔,并且在每个极大值处对它进行修正,即 $\tau_n = t_{max}^{(n)} = t_{max}^{(n)} - t_{max}^{n-1}$,这里 $t_{max}^{(n)}$ 为系统输出到达第 n 个极大值的时刻. 当这种方法扩展到高周期的不稳定周期轨道上时,不稳定周期 k 轨道可以通过这样选择延迟时间 τ_n 而被稳定化,即延迟时间 τ_n 等于输出信号的 $k+1$ 个相邻极值间的时间间隔($\tau_n = t_{max}^{(n)} - t_{max}^{n-k}$),并在间隔 k 个极植的时刻改变它.

2.2　反馈系数 k 的自适应确定

Pyragas K 方法中并没有给出外部控制信号刚度如何确定的方法,一般是通过计算李雅普诺夫指数来确定,即那些对应最大李雅普诺夫指数不大于零所对应的 k 值可以使系统稳定到所需要的周期轨道上.

下面通过参数自适应调整来控制系统到所需要的运动状态. 由目标输出与实际输出之间的差来调整参数,使系统从混沌运动状态转变到规则运动状态. 对于如下一个 N 维混沌动力系统:

$$\mathrm{d}X/\mathrm{d}t = F(X,V,t) \tag{4}$$

$X = \{x_1, x_2, \cdots, x_N\}$ 代表系统的状态变量,$V = \{v_1, v_2, \cdots, v_m\}$ 代表系统的参数,控制时另加一个调节 V 值的动力方程:

$$\mathrm{d}V/\mathrm{d}t = vG(x, x_s) \tag{5}$$

x_s 代表目标状态,v 是权重系数,$G(x,x_s)$ 为输出状态 x 和目标状态 x_s 的函数. 这种方法适合于多维,多参数,强非线性的混沌系统的控制,能很好地把系统的混沌状态转化为规则运动状态,也可以在系统参数发生突变时调节它回到原来的值.

现利用自适应控制混沌方法与 PyragasK 方法结合,提出一种只需引入外部控制信号来控制的方法,如下式所示:

$$u(t) = k(z_s - z) = k(z(t-\tau) - z(t)) \tag{6}$$

$$\mathrm{d}k/\mathrm{d}t = k_0(z(t-\tau) - z(t)) \tag{7}$$

k 的具体调节算法如下式:

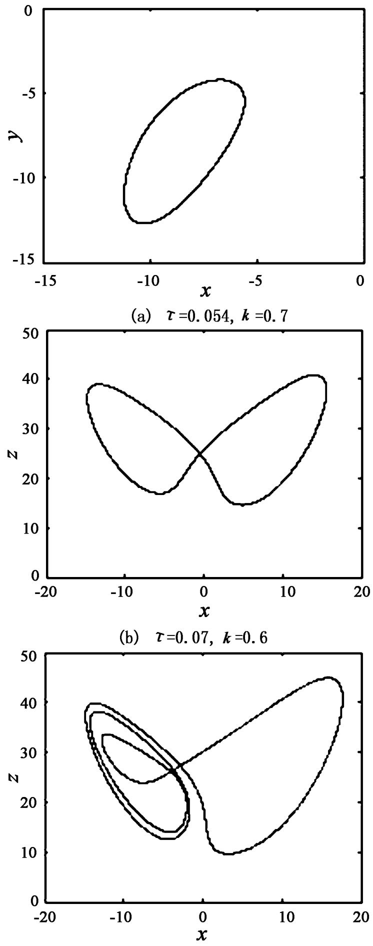
$$k_{n+1} = k_n + \Delta k, \Delta k = k_0(x(t-\tau) - x(t))\Delta t \tag{8}$$

k_0 为事先确定的权重系数,其取值范围为 $0 < k_0 < 1$,为时间步长,Δt 以上算法的基本步骤是:给定一个合适的权重系数 k_0,并通过(7)式计算和观测外部控制信号即微扰,由于当控制到稳定状态时输出信号与目标轨道非常接近,微扰权重就变化很小. 当小于某个给定的允许误差范围时外部控制信号就不再改变,也就等效于搜索到靠近 PyragasK 方法的最优的微扰权重 k.

3　数值仿真结果

为了验证算法的有效性,以式(1)描述的混沌系统为例在 matlab6. 5 中进行数值仿真,固定取用 $a = 10$、$c = 28$、$b = 8/3$,步长为 0. 001,初值 $x(0) = 0.2$,$y(0) = 0.3$,$z(0) = 0.2$,$k_0 = 0.5$. 先对其周期 1 进行控制,并从第 500 步迭代开始时施加控制式(2),当 $\tau = 0.054$,$k = 0.7$ 时,系统的混沌将被破坏,受控系统由混沌状态转为周期 1 状态,系统进入稳态后出现稳定的周期运动,去掉前面 2000 次迭代过程后画出的控制结果如图 2 –(a)所示. 同样对更高周期进行控制,结果如图 2 –(b),图 2 –(c)所示. 图 3 显示了加控制后的 Lorenz 周期 1 吸

引子 x、y 随时间的波形图,由图 3 可知,当 $N=500$ 加入控制式(2)后,x 能较快地稳定在某周期轨上.



(a) τ=0.054, k=0.7

(b) τ=0.07, k=0.6

(c) τ=0.168, k=0.5

图 2 被控制住的 Lorenz 周期吸引子

Fig. 2 The controlled Lorenz period attractors

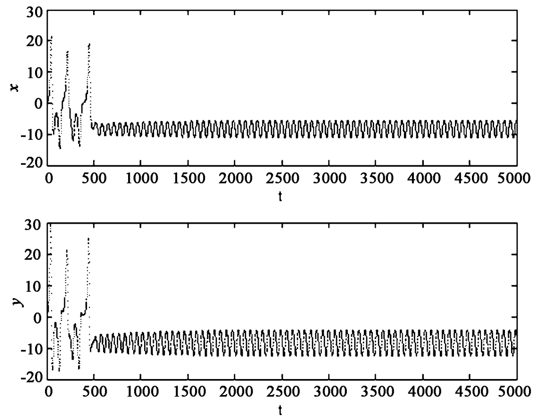


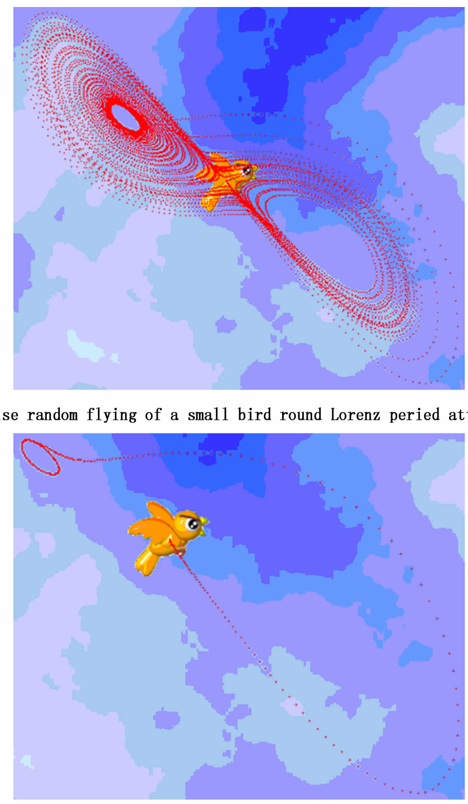
图 3 加控制后的周期 1 的 x、y 随时间的波形图

Fig. 3 One period waveform of x and y by using control

4 应用实例

一般的动画制作都以定性的方式来表达物体的运动,有时人们希望用计算机动画模拟物体的运动过程,例如:模拟鱼的游动、模拟小鸟运动等,这时就要求我们在制作动画时对运动物体的轨迹有一个精确的量化表示,并且根据其自身的运动规律或人为地进行控制,使其在时间域上和空间域上发生行为得到控制. 计算机动画由于其逼真的效果,已被广泛应用于各个领域,尤其在艺术领域,如广告制作、电影电视中的动画制作等这些精美的三维动画无论在视觉上或精神上都给人们带来了愉悦的享受.

混沌在时间尺度内反映世界的复杂形态,利用混沌图形的自相似性,轨迹的遍历性,伪随机性以及混沌系统的简单确定性,可以创造奇妙美丽的计算机图形,根据作者所查找国内外文献得知,关于混沌及其控制在动画中的应用方面的研究,目前在文献中很少见到. 本文将以上控制效果应用于动画的控制中,我们对指定角色进行控制,使其可以运动到混沌的轨道上或者某一个特殊的轨迹上.



(a) False random flying of a small bird round Lorenz peried attractors

(b) A small bird flying round a circle

图 4 动画角色行为控制效果图:小鸟的飞行

Fig. 4 The control effect picture of cartoon role: flying of a small bird

图 4 显示了路径约束的引导线动画,实际应用可以选择指定的控制器和路径参数,将小鸟控制到各种特殊轨迹上飞行. 当然,在三维动画中可以让

小鸟挥动翅膀,作一些更复杂的动作以及多角色的控制是将会使动画效果更加逼真,这些都是值得研究的问题.

5 结论

本文在延迟反馈控制方法的基础上提出了一种选择合适的时间延迟来自动调节反馈系数的方法,通过对经典 lorenz 系统的仿真验证了其有效性.但本方法不局限于 lorenz 系统,此方法对其他类似非线性混沌系统也应适用.本方法不要求知道非线性系统的精确的数学模型,它不需要等待系统运行到目标状态附近才加以控制,而可以随时加以控制,目标周期轨道不需要事先知道,只要通过调节控制增益和延迟时间,控制系统就会在混沌控制过程中自动找到自己的轨道,还可以灵活地选择不同的目标,通过选择合适的参数,使得受控系统稳定到某一周期轨道上,在工程上易于实现.

本文将混沌的控制效果应用于动画的控制中,对指定动画角色行为进行控制,使其可以按照特殊轨迹(指定的周期)或是随机的(不加控制时)运动,只是一个初步的探索,具体更深层次的应用有待于以后作进一步的研究.因此,利用混沌系统轨迹的遍历性及丰富的动力学形态,选择合适的数学模型建模方法,并结合适当的混沌控制方法研究计算机角色的动画行为运动控制,将受控动力学模型转化为数字化的抽象运动,使动画软件能用它驱动动画角色,使动画角色在时间域上和空间域上发生行为得到控制.将混沌、混沌控制与数字动画角色行为控制相结合,开展新的探索性研究将有一定的研究意义.

参考文献

1 胡岗,萧井华,郑志刚.混沌控制.上海:上海科技教育出版社,2000(Hu Gang, Xiao Jinhua, Zheng Zhigang. Control of chaos. Shanghai: Shanghai Science Technology Education Press, 2000(in Chinese))

2 Ott E, Grebogi C, York J. A controlling chaos. *Physical Review Letters*, 1990, 64(11): 1196 ~ 1199

3 Sparrow C. The lorenz equations: bifurcations, chaos, and strange attractors. NewYork: Springer-Verlag, 1983: 1 ~ 5

4 Chen G R, Yu X H. On time-delayed feedback control of chaotic system. *IEEE Trans on Circuits and Systems: Fundamental Theory and Applications*, 2001, 46(6): 767 ~ 772

5 闵富红,王执铨.混沌 Lorenz 系统延迟反馈控制的机理分析.控制理论与应用,2004,21(2):205 ~ 211(Min Fuhong, Wang Zhiquan. Analyze the time-delayed feedback control of chatic Lorenz system. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(2): 205 ~ 211(in Chinese))

6 Just W. Mechanism of time-delayed feedback control. *Physical Review Letters*, 1997, 78(2): 203 ~ 206

7 Hu G, Qu Z, He K. Feedback control of chaos in spatiotemporal systems. *Int J of Bifurcation and Chaos*, 1995: 7901 ~ 936

8 王林泽,赵文礼.外加正弦驱动力抑制一类分段光滑系统的混沌运动.物理学报,2005,54(9):4038 ~ 4043(Wang Linze, Zhao Wenli. Suppression of chaotic motion in a cIass of piecewise-smooth systems by using sine periodic force. *Acta Phys Sinica*, 2005, 54(9): 4038 ~ 4043(in Chinese))

9 王琳,倪樵,刘攀,黄玉盈.一种新的类 lorenz 系统的混沌行为与形成机制.动力学与控制学报,2005,3(4):1 ~ 6(Wang Lin, Ni Qiao, Liu Pan, Huang Yuying. Chaos and its forming mechanism of a newlorenz-like system. *Journal of Dynamic and Control*, 2005, 3(4): 1 ~ 6 (in chinese))

10 陈关荣,吕金虎. Lorenz 系统族的动力学分析、控制与同步.北京:科学出版社. 2003(Chen Guanrong, LüJinhu. Dynamical analysis, control and synchronization of generalized Lorenz systems family. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese))

11 高洁,陆君安.不确定参数下的四维超混沌吕系统的最优同步.动力学与控制学报,2006,4(4):320 ~ 325(Gao jie, Lu Jun - an. Optimal synchronization of hyperchaotic Lü system with uncertain parameters. *Journal of Dynamic and Control*, 2006, 6(4): 320 ~ 325 (in chinese))

12 单梁,李军,王执铨.参数不确定 Liu 混沌系统的自适应同步.动力学与控制学报,2006,4(4):338 ~ 343(Shan Liang, Li Jun, Wang Zhiquan. Adaptive synchronization of Liu chaotic system with uncertain parameters. *Journal of Dynamic and Control*,) 2006, 6(4): 338 ~ 343(in chinese))

13 王兴元,王勇.基于主动控制的三维自治混沌系统的异结构反同步.动力学与控制学报,2007,5(1):13 ~ 17(Wang Xingyuan, Wang Yong. Anti - synchronization of three - dimensional autonomous different - structural chaotic systems via active control. *Journal of Dynamic and Control*, 2007, 5(1): 13 ~ 17(in chinese))

14 梁海花,郑伟峰. 碰摩转子映射系统的非线性反馈混沌控制. 动力学与控制学报,2007,5(1):30 ~ 33(Liang Haihua, Zheng Weifeng. Nonlinear feedback control of chaos in Rub – impact rotor mapping systems. *Journal of Dynamic and Control*,2007,5(1):30 ~ 33(in chinese))

CHAOTIC SYSTEM CONTROL BASED ON SELF-ADAPTED PARAMETER TIME-DELAYED FEEDBACK AND ITS APPLICATION *

Wang Linze Zhou Junnan

(*The Research Institute of Computer Application Technology, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract Aiming at the problem that the time-delayed feedback parameters are not easily confirmed, this paper presented a control scheme, i. e., time-delayed feedback control through the self-adapted method of adjusting feedback coefficient, to control the nonlinear Lorenz chaotic system. Numerical simulation results showed that the unstable periodic orbits of the system could be ballasted, the chaos could be eliminated via choosing proper delayed time and gain coefficient, and the system could be changed from unstable to stable. Because the additional reference signal is not necessary, and because the control actions can be exerted at any time in the chaotic state, so the presented method is simple and easy to implement. At the same time, the presented control scheme was applied to the control of animation, and the various cartoon roles could be controlled and moved along chaotic orbits or a certain special track.

Key words unstable periodic orbits, time-delayed feedback control, Lorenz system stability, chaos, animation

Received 7 November 2006, revised 10 April 2007.

* The project supported by Foundation of Zhejiang Educational Committee(20040459)