



دانشگاه زابل

پایان نامه کارشناسی

دانشکده مهندسی

گروه برق

گرایش: کنترل

عنوان:

شبیه سازی و کنترل سیستم های آشوبناک

استاد راهنما: جناب آقای دکتر صالح مبین

نگارش: پریسا بیگدلی

شماره دانشجویی: 90450259

بهار 95

چکیده

به طور خلاصه در این پایان نامه ماهیت سیستم آشوبناک و چگونگی کنترل این سیستم ها با روش کنترل

بازخورد^۱ خطی برای حذف آشوب در سیستم دارای آشوب ارائه شده است. دینامیک سیستم طوری تغییر می

کند که مدل حلقه بسته منطبق با مدل مرجع خطی مشخص شده باشد. پارامترهای کنترلر مجهول فرض می-

شود و با استفاده از آن یک قانون انطباق مشخص می شود که هدف آن این است که این پارامترها را نسبت به

مقادیر ایده آل آن ها برای رسیدن تطابق کامل بین مرجع و مدل سیستم مطرح کند. یک سیگنال محرکه

خارجی به هردو سیستم آشوبناک و سیستم مرجع مطرح شده است و قانون انطباق، پایداری مشتق تابع لیپانوف

را ارائه می کند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که رفتار آشوب گونه با کنترلرگر پیشنهادی به طور موثر حذف

شده است. در این پایان نامه همچنین کنترل سیستم های آشوبناک با پارامترهای مجهول را بررسی می کنیم.

کلید واژه: سیستم آشوبناک، کنترل بازخورد تطبیقی، قانون انطباق، تابع لیپانوف، سیگنال محرکه

¹ Feed Linearization

عنوان	صفحه
فصل اول - آشوب و کنترل آشوب	۱
۱-۱ مقدمه	۱
۲-۱ کنترل آشوب چیست؟	۵
۳-۱ کاربردهای کنترل آشوب	۶
۴-۱ تعاریف ریاضی آشوب	۷
۵-۱ روش های کنترل آشوب	۱۱
فصل دوم - بررسی روش خطی سازی فیدبک تطبیقی	۱۴
۱-۲ مقدمه	۱۴
۲-۲ خطی سازی ورودی - حالت	۱۴
۳-۲ خطی سازی خروجی - حالت	۱۸
۴-۲ کنترل بازخورد	۱۹
۱-۴-۲ پایدارسازی	۱۹
۲-۴-۲ ردیابی	۲۰
۵-۲ کنترل تطبیقی مبتنی بر لیاپانوف	۲۱
فصل سوم - کنترل سیستم آشوبناک با استفاده از خطی سازی فیدبک تطبیقی	۲۲
۱-۳ مقدمه	۲۲
۲-۳ سیستم آشوبناک جنسیو-تسی	۲۴

۳-۳	بازخورد تطبیقی خطی و تجزیه و تحلیل پایداری	۲۵
۳-۴	قضیه ردیابی	۲۸
۳۳	فصل چهارم - مطالعه جزئی کنترل تطبیقی سیستم آشوبناک با پارامترهای مجهول	۳۳
۱-۴	مقدمه	۳۳
۲-۴	کنترل سیستم آشوبناک با پارامترهای مجهول	۳۳
۳-۴	قضایا	۳۴
۴۲	فصل پنجم - شبیه سازی عددی	۴۲
۱-۵	نتایج شبیه سازی	۴۳
۲-۵	مقادیر به کار رفته	۴۵
۴۶	فصل ششم - نتیجه گیری و پیشنهادات	۴۶
۴۷	• مراجع	۴۷

فصل اول

آشوب و کنترل آشوب

۱- مقدمه

آشوب چیست؟

مفهوم آشوب یکی از مفهومی جدید و بنیادی علم نوین است که افق درک ما نسبت به هستی را بسیار گسترش

داده است. آشوب- همان طور که از نامش پیداست - رفتاری به ظاهر تصادفی و بی نظم است که در بسیاری از

پدیده های دنیای واقعی رخ میدهد. پدیده های معروفی چون اثر پروانه ای^۲ از ویژگی های خاص آشوب است

که به زودی درموردشان توضیح خواهیم داد. در این نوشتار جز مقدمه ای کوتاه و چند تعریف ریاضی، چندان به

خود تئوری آشوب نمی پردازم ولی با این حال یاد آوری مجدد ویژگی های آن بی فایده نخواهد بود.

می دانیم که ابزار تحلیل پدیده های طبیعی برای فیزیک دانان و مهندسان و بقیه علوم که نیاز به مدل سازی

و تحلیل آن پدیده ها با استفاده از آن مدل دارند، معادلات دیفرانسیل (یا معادلات تفاضلی) است. این معادلات

که می توانند به صورت جزئی^۳ یا معمولی^۴ باشند، چارچوب تحلیلی قوی ای برای همه دانشمندان علوم طبیعی

فراهم می کند. در بسیاری از موارد برای سادگی تحلیل، مدل ها به صورت خطی تخریب زده می شوند. در این

صورت ابزارهای ریاضی کاملی برای تحلیل این چنین مسائلی وجود دارد. با این حال به محض این که چنین

ساده سازه ای انجام ندهیم، با معادلات غیر خطی ای مواجه شویم که پدیده های جدیدی چون چرخه حدی^۵

در آنها مشاهده می شود. اما این تنها رفتار متفاوت دینامیک غیر خطی با خطی نیست. مدت ها به دلیل وجود

قضیه ی پوانکاره-بندیکسون^۶ تصور می شد که یک سیستم یا دارای نقطه تعادل (چه پایدار و چه ناپایدار) است و

یا دارای چرخه حدی است. البته این قضیه تنها برای سیستم های مرتبه دوم صادق بود، اما باور عموم بر آن بود

که چنین قضیه ای برای سیستم های مرتبه بالاتر نیز برقرار است. با این حال مشاهده شد که برای سیستم های

مرتبه سه به بالا، پدیده ی دیگری نیز علاوه بر این ها رخ می دهد و آن هم آشوب است.

² Butterfly Effect

³ Partial Differential Equation (PDE)

⁴ Ordinary Differential Equation (ODE)

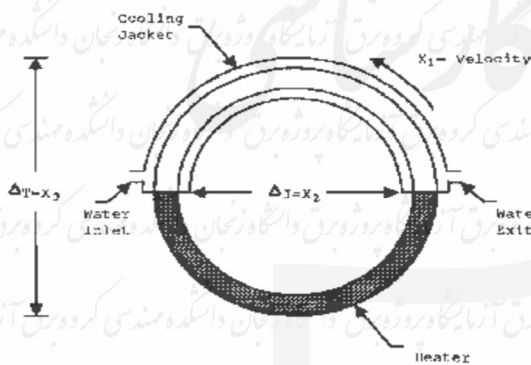
⁵ Limit Cycle

⁶ Poincare-Bendixon

آشوب به مفهوم دقیق و ریاضی آن - پدیده ای است به ظاهر تصادفی و پیچیده که در باطن طبیعتی قطعی^۷ (در تقابل با تصادفی^۸) دارد. به عبارت دیگر از یک معادله ی دیفرانسیل ساده می توان رفتار های بسیار پیچیده

ای را انتظار داشت. نمونه ای از دینامیک مرتبه ی سوم آشوبناک را که به دینامیک لورنتس^۹ مشهور است، در زیر

بینید.



شکل ۱-۱ نمونه ای از آزمایشی که منجر به معادلات دیفرانسیل لورنس می شود. x_1

(نشان داده شده با x در معادلات داخل متن) متوسط چرخش سیال، x_2 (نشان داده شده

با y) فاصله تفاوت دمای افقی و x_3 (نشان داده شده با z) تفاوت دمای عمودی است.

$$\dot{x} = \sigma(y - x) + u$$

$$\dot{y} = rx - y - xz$$

$$\dot{z} = -bz + xy$$

(1-1)

دینامیک لورنز که توسط هواشناسی به نام ادوارد لورنتس^{۱۰} در سال ۱۹۶۳ به دست آمده است، بیان گر جریان

هم رفت در مایعاتی است که گرما از طریق منبعی به آن ها تزریق می شود. نمونه ای از ترکیب بندی ای که

منجر به دینامیک لورنتس می شود را در شکل (۱-۱) می بینید. لورنتس نشان داد که تلاطم^{۱۱} در مایعات توسط

دینامیک ساده شده ی لورنز قابل بیان است [۱]. نمونه ای از رفتار آشوبی این دینامیک را در شکل (۱-۲) می

بینید.

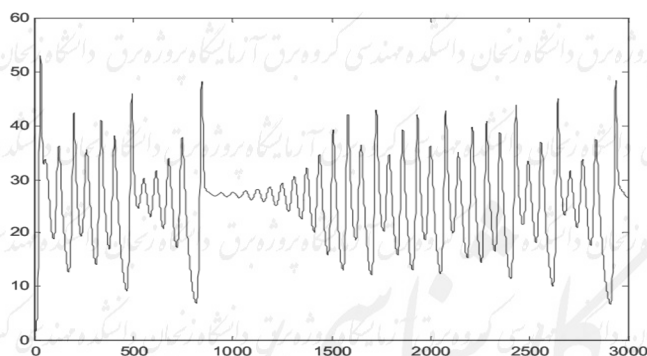
⁷ Deterministic

⁸ Stochastic

⁹ Lorenz

¹⁰ Edward Lorenz

¹¹ Turbulent



شکل ۱-۲ رفتار آشوبی دینامیک لورنتس

یکی از ویژگی های سیستم آشوبی، چیزی است که به حساسیت بالا به شرایط اولیه مشهور شده است. یک

سیستم آشوب ناک-برخلاف سیستم دارای چرخه حدی یا نقطه ی تعادل پایدار- به تغییرات کوچک حالتش

حساس است. تغییر بسیار کوچکی در حالت اولیه باعث تغییرات بسیار قابل توجه در شرایط نهایی می شود.

نمونه ی معروف چنین پدیده ای وضعیت آب و هوا و پدیده ی معروف اثر پروانه ای است. دینامیک غیر خطی

اجو باعث می شود که به دلیل نداشتن همه ی شرایط اولیه در زمان شروع محاسبات (مثلا نداشتن و هم چنین

عدم دقت اندازه گیری دما و رطوبت و... در همه ی نقاط سطح زمین)، پیش بینی طولانی مدت امکان پذیر

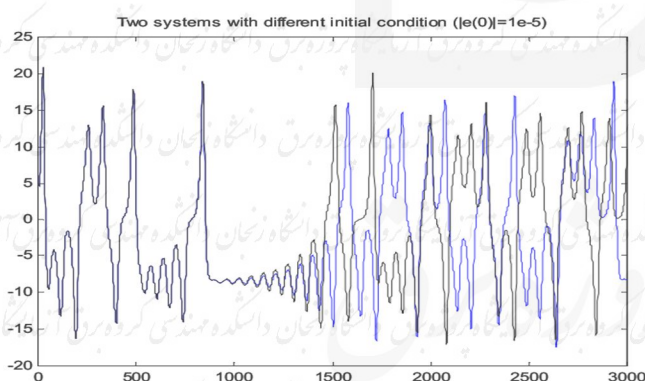
نباشد. مثال مشهوری است که می گوید بال زدن پروانه ای در کشوری دیگر می تواند باعث به وجود آمدن یا

نیامدن توفان در کشور شما شود. نمونه ای از این حساسیت را در شکل (۱-۳) می بینید. در این شکل، دینامیک

لورنتس به ازای دو شرایط اولیه ی بسیار نزدیک به هم (با خطای اولیه ی $|e(0)| = 10^{-5}$) با هم مقایسه

شده است. می بینید که با این که در ابتدا این دو بسیار شبیه به هم رفتار می کنند، با این حال در نهایت رفتار

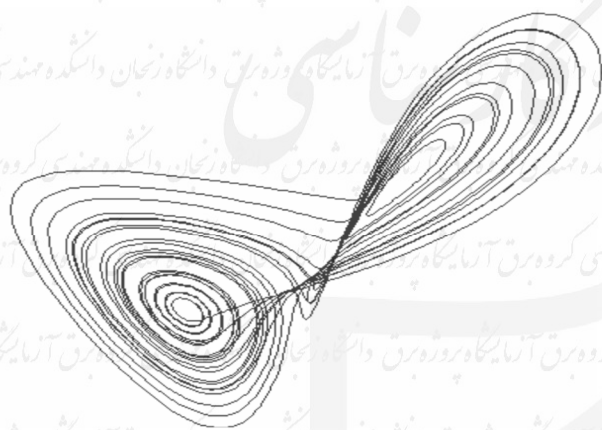
کاملاً متفاوتی پیدا می کنند.



شکل ۱-۳ مقایسه رفتار آشوبی دینامیک

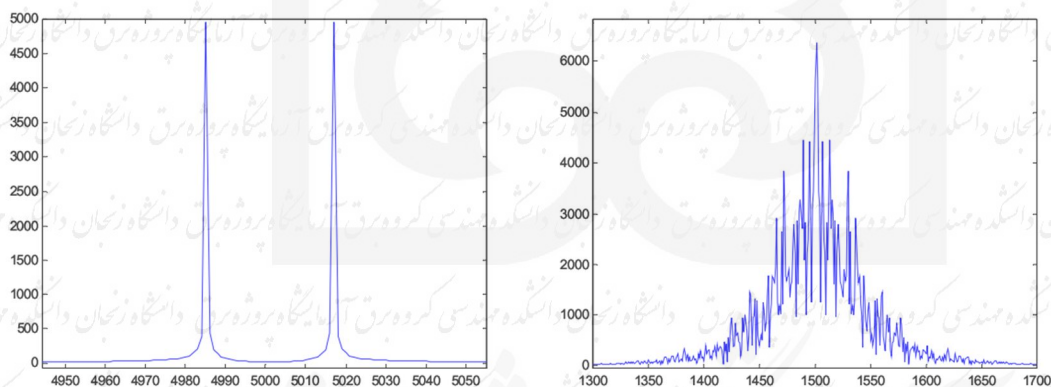
لورنتس به ازای دو شرایط اولیه ی بسیار
نزدیک

ویژگی دیگر سیستم های آشوبی، داشتن جاذب های شگفت^{۱۲} است. به طور کیفی، جاذب های شگفت جاذب هایی هستند که مسیر حالت به سمت آنها جذب می شود و در همان حال از آن ها دور می شود. نمونه های دیگری از چنان چیزی نیز در بقیه ی این گزارش خواهد آمد. جاذب های شگفت دارای بعد فراکتالی و غیر صحیح هستند.



شکل ۱-۴ نمونه ای از رفتار لورنتس به ازای $\sigma=10$ ، $b=8/3$ و $r=28$

از ویژگی های دیگر آشوب، وجود طیف فرکانسی پیوسته است. می دانیم اگر سیستمی دارای رفتار تناوبی باشد، دارای طیف گسسته ای است، اما در سیستم های آشوبی، طیف پیوسته خواهد بود. مقایسه ای بین طیف گسسته ی رفتاری تناوبی و طیف پیوسته ی رفتار آشوبی را در شکل (۱-۵) می بینید.



شکل ۱-۵ مقایسه طیف فرکانسی بین حرکت متناوب (چپ) و حرکت آشوبی (راست) مشاهده می شود که بر خلاف دینامیک متناوب، دینامیک آشوبی، طیف پیوسته ای دارد (صفر نبودن و عرض داشتن طیف حرکت تناوبی به دلیل خطای محاسبات عددی و محدود بودن پنجره ی تبدیل فوریه است).

¹² Strange Attractor

1-2 کنترل آشوب چیست؟

به دلیل دینامیک پیچیده و ناپایداری ذاتی سیستم آشوبی، ایده ی کنترل آن به طوری که رفتار مورد نظر را از خود نشان دهد- ممکن نمی نماید. با این حال نشان داده شده است که سیستم های آشوبی قابلیت کنترل شوندگی دارند و اهداف کنترلی متفاوتی برایشان قابل تصور است. ایده های کنترل خطی برای آنها قابل اعمال است و علاوه بر آن ها این به دلیل ویژگی های خاص خود، روش های کنترلی جدید و خاص خودی نیز قابل اعمال است. در این مورد در بخش های بعد به تفصیل توضیح خواهیم داد و تنها به این اشاره می کنیم که اهداف مختلف کنترلی برای یک سیستم آشوبی قابل تصور است که می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- حذف رفتار آشوبی و پایدار سازی به نقطه تعادل
 - پایدار سازی یکی از مسیرهای متناوب ناپایدار¹³ (و ایجاد چرخه ی حدی پایدار)
 - هم زمانی¹⁴ دو سیستم آشوبی
 - پادکنترل آشوب¹⁵ (ضد کنترل آشوب-آشوبی سازی¹⁶)
 - کنترل دو شاخگی
- مورد اول و مورد دوم واضح اند. سیستمی دارای رفتار آشوبی است و این رفتار برای ما مطلوب نیست. مثلا این می تواند نوسان آشوبی غیرقابل قبول در روتور یک موتور باشد. حذف چنان چیزی لازم است. هم زمانی دو سیستم آشوبی نیز به معنای این است که بخواهیم حالت دو سیستم آشوبی دقیقا مشابه هم شوند. چنین کاری در کاربرد های مانند مخابرات مطرح می شود. درمورد این ها به طور کامل در بخش های بعدی توضیح خواهیم داد. پادکنترل آشوب، مورد دیگری است که جدیدا توجه بسیاری به خود جلب کرده است. چنین کاری که به آن معناست که سیستمی را که به خودی خود دارای رفتار آشوبی نیست (مثلا به نقطه ی تعادلی پایدار است)، رفتار آشوبی پیدا کند. وجود آشوب در بعضی از موارد چون میکس کردن مواد مختلف و کنترل ضربان قلب لازم است. کنترل دو شاخگی¹⁷ نیز با این که دقیقا جزو کنترل آشوب محسوب نمی شود، اما به آن ارتباط دارد. با این که در اینجا توضیح چندانی درباره ی آن داده نمی شود، اما دو شاخگی یکی از پدیده هایی است که پیش از آشوبی شدن سیستم رخ میدهد. دو شاخگی به طور خلاصه به آن معناست که رفتار ساختاری سیستم (مکان نقاط تعادل، پایدار آن ها، تعداد نقاط تعادل، وجود یا عدم وجود نقطه ی تعادل و هم چنین وجود چرخه های

¹³ Unstable Periodic Orbit

¹⁴ Synchronization

¹⁵ Anticontrol of Chaos

¹⁶ Chaotification

¹⁷ Bifurcation Control

دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه گروه برق مراجعه فرمایید.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهاد

با توجه به این پایان نامه، حذف آشوب سیستم جنسیو با استفاده از بازخورد تطبیقی خطی براساس کنترلگر

باموفقیت به دست آمده است. قانون به روز رسانی انطباق با استفاده از تجزیه و تحلیل تابع لیاپانوف، برای تخمین

پارامتر در حضور تابع محرکه است. شبیه سازی کنترل موفق و رفتار ردیابی از حالت های سیستم را نشان می

دهد. شبیه سازی ها نشان می دهد که برای به دست آوردن همگرایی پارامترهای خطی به مقدار واقعیشان باید

تعداد کافی سینوسی بافرکانس مختلف در سیگنال محرک حضور داشته باشد. در فصل سوم نیز یک

کنترلگر تطبیقی برای پایداری سیستم آشوبناک با پارامتر های مجهول به نقاط ثابت نشان دادیم. همچنین

اساس روش تابع لیاپانوف را برای طراحی تخمینگر پارامتریه کار بردیم به طوری که با کنترل کردن سیستم

آشوبناک می توان به یک پایداری کلی نسبت به نقطه مرجع رسید. سپس یک مطالعه جزئی از دینامیک

تخمینگر پارامتر داشتیم و در آخر قضیه ی چند شاخه مرکزی را برای مطالعه ی پایداری تخمینگر پارامتر را به

کار بردیم.

امروزه روش های بسیاری برای کنترل سیستم های آشوبناک ارائه شده است که بنده در این پایان نامه فقط

روش خطی سازی بازخورد تطبیقی براساس روش لیاپانوف را مطرح کرده ام، بنابراین پیشنهاد می کنم برای

کنترل سیستم آشوبناک روش های مختلفی را مطالعه نموده، بهترین، جامع ترین و به روز ترین روش را برای

حذف آشوب به کار برید.

مراجع

- [1]0 Lorenz63 E.N. Lorenz, "Deterministic Nonperiodic Flow," Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 20, pp.130-141, 2003.
- [2]0 Roy03 R. Roy, T. W. Murphy, T.D. Maier, Z. Gillis, and E.R. Hunt, "Dynamical Control of a Chaotic Laser: Experimental Stabilization of a Globally Coupled System ," Phys.Rev . Lett., vol.68, pp. 1259-1262, 1993.
- [3]. Kousaka01 T.Kousaka, S. Tahara, T. Ueta, M. Abe, and H. Kawakami, "Chaos in simple hybrid system and its control," Electronic Letters, vol.37, no 1, ,2001.
- [4].Garfinkel92 A.Garfinkel, M.L. Spano, W.L. Ditto, and J.N. Weiss, "Controlling Cardiac Chaos," Science, vol. 257, pp. 1230-1235 , 1992.
- [5]0[Brandt00] M.E, Brandt and G. Chen, "Delay Feedback Control of Cardiac Activity Models," in G. Chen (ed.), Controlling Chaos and Bifurcation in Engineering System, CRC Press, 2000.
- [6].Yang04. T. Yang and , "A Survey of Chaotic Secure Communication Systems," International Journal of Computational Cognition, vol. 2, no.2, pp. 81-130, 2004.
- [7]. Suykens00, J.A.K Suykens, T. Yang, J. Vandewalle, and L.O. Chua, "Impulsive Control and Synchronization of Chaos," in G. Chen (ed.), Controlling Chaos and Bifurcation in Engineering Systems, CRC Press, 2000.
- [8]0Chen03, L.Chen, X.F.Wang, and Z.Z. Han, "Controlling Bifurcation Control: Theories, Methods, and Applications," International Journal of Bifurcation and Chaos, vol. 10, no.3, pp. 511-548, 2000.
- [9].Vincent00T.L. Vincent , "Utilizing Chaos in Control System Design ," in G. Chen(ed), Controlling Chaos and Bifurcation in Engineering Control Systems, CRC Press, 2000.
- [10]. Andrevskii03a , B.R. Andrevskii and A. L. Fradkov, "Control of chaos: Method and Applications.I. Method," Automation and Remote Control, vol. 64, no. 5, pp.675-718, 2003
- [11]. Andrevskii04, B.R. Andrevskii and A. L. Fradkov, "Control of chaos: Method and Applications.II. Method," Automation and Remote Control, vol. 65, no. 4, pp.505-533, 2004
- [12]. Fradkov98, A.L. Fradkov and A. Yu. Pogromsky, "Speed Gradient Control of oscillations and chaos. World Scientific, Singapore, 1998.

[13]. Devaney87, R.L. Devaney, An Introduction to Chaotic Dynamics Systems, New York: Addison- Wesley, 1987.

[14]. Li75, T.Y.Li and J.A. Yorke, "Period Three Implies Chaos," Amer. Math. Monthly 82,pp. 481-485, 1975.

[15]. Marotto 78, F.R.Marotto, "Snap-back repellers imply chaos in R^n ," Journal of Math. Anal. APPL. 63,pp. 199-223, 1963.

[16]. Li03, C. Li and G. Chen, "on the Marotto-Li-Chen Theorem and its Application to Chaotification of multi-dimensional Discrete Dynamical Systems, " Chaos, Solitons and Fractals, vol. 20,pp. 130-141, 1963.

[17]. Ott90, Ott, E.,C. Grebogi, and J. Yorke,(1990), Controlling chaos. Phys. Rev. Lett., vol.64(11), 1196-1199.

[18]. Chen00a, G.Chen,"Control and Anticontrol of Chaos" , Proc. Int. Control of Oscillations and Chaos, St. Petersburg, Russia, pp.181-186, 1997.

[19]. Fradkov01, Fradkov and Evans, "Control of Chaos: Some Open Problems, " PROC.40th IEEE Conf. Decision and Control,2001.

[20]. Fradkov02, Fradkov and Evans, "Control of Chaos: Survey 1997-2000" , Preprints of 15th IFAC World Congress on Automatic Control. Plenary papers., Survey papers, Milestones. Barcelona,pp.143-154, 2002.

[21]. Boccaletti00, Boccaletti, Grebogi, Lai, Mancini, and Maza, "The Control of Chaos Theory and Applications, "Physics Report 329, pp,103-197,2000.

[22]. Chen00a, G.Chen, Controlling Chaos and Bifurcation in Engineering Systems, edited book, CRC Press, 2000.

[23]. دکتر حسن خلیل، مترجم دکتر غلامعلی منتظر، سیستم های غیر خطی، ویراست دوم، جلد دوم، تهران، مرکز انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۰

[24] Ott E, Grebogi C, York JA. Controlling chaos. Phys Rev Lett 1990;64(11):1196-9.

[25] Jackson EA, Hubler A. Periodic entrainment of chaotic logistic map dynamics. Physica D 1990;44:404-9.

[26] Ogorzalek MJ. Taming chaos: Part II – Control scheme via robust asymptotic feedback. IEEE Trans Circuits Syst – I

1993;40(10):700-6.

[27] Femat R, Alvarez J, Castillo-Toledo B, Gonzalez J. On robust chaos suppression in a class of no driven oscillators: application to the Chua's circuit. IEEE Trans Circuits Syst 1999;46:1150–2.

[28] Femat R, Jauregui-Ortiz R, Solys-Perales G. A chaos based communication scheme via robust asymptotic feedback. IEEE Trans Circuits Syst 2001;48(10):1161–9.

[29] Isidori A. Non-linear control systems. Berlin: Springer-Verlag; 1995.

[30] Li Z, Chen G, Shi S, Han C. Robust adaptive tracking control for a class of uncertain chaotic systems. Phys Lett A 2003;310:40–3.

[31] Jayaram A, Tadi M. Synchronization of chaotic systems based on SDRE method. Chaos Soliton Fract 2006;28(3):707–15.

[32] Yassen MT. Controlling chaos and synchronization for new chaotic system using linear feedback control. Chaos Soliton Fract 2005;26:913–20.

[33] Tian YC, Tade MO, Levy D. Constrained control of chaos. Phys Lett A 2002;296:87–90.

[34] Chang WD, Yan JJ. Adaptive robust PID controller design based on a sliding mode for uncertain chaotic systems. Chaos Soliton Fract 2005;26:167–75.

[35] Yassen MT. Chaos control of chaotic dynamical systems using backstepping design. Chaos Soliton Fract 2006;27(2):537–48.

[36] Hu J, Chen S, Chen L. Adaptive control for anti-synchronization of Chua's chaotic system. Phys Lett A 2005;339:455–60.

[37] Ge SS, Wang C, Lee TH. Adaptive back-stepping control of a class of chaotic systems. Int J Bifurcat Chaos 2000;10(5):1149–56.

[38] Ge SS, Wang C. Adaptive control of uncertain Chua's circuits-I: fundamental theory and applications. IEEE Trans Circuits Syst 2000;47(9):1397–402.

[39] Ge SS, Wang C. Uncertain chaotic system control via adaptive neural design. Int J Bifurcat Chaos 2002;12(5):1097–109.

[40] Barone K, Singh SN. Adaptive feedback linearizing control of Chua's circuit. Int J Bifurcat Chaos 2001;12(7):1599–604.

[41] Genesio R, Tesi A. A harmonic balance methods for the analysis of chaotic dynamics in nonlinear systems. *Automatica* 1992;28:531–48.

[42] Park Ju H. Synchronization of Genesio chaotic system via backstepping approach. *Chaos Soliton Fract* 2006;27:1369–75.

[43] Slotine JJE, Li W. *Applied nonlinear control*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; 1991

[44]. Chua, L. O., Yang, T., Zhong, G. Q., and Wu, C. W., “Adaptive synchronization of Chua’s Oscillators,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 6, pp. 189–201, 1996.

[45]. Wu, C. W., Yang, T., and Chua, L. O., “On adaptive synchronization and control of nonlinear dynamical systems,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 6, pp. 455–471, 1996.

[46]. Chen, G. and Dong, X., “From chaos to order-perspectives and methodologies in controlling chaotic nonlinear dynamical systems,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 3, pp. 1363–1409, 1993.

[47]. Itoh, M., Murakami, H., and Chua, L. O., “Experimental control of chaos in Chua’s circuit via tunnel diodes,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 4, pp. 741–750, 1994.

[48]. Celka, P. “Synchronization of chaotic systems through parameter adaptation,” in *IEEE International Symposium of Circuits and Systems Proceedings*, pp. 692–695, 1995.

[49]. di Bernado, M., “An adaptive approach to the control and synchronization of continuous-time chaotic systems,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 6, pp. 557–568, 1996.

[50]. John, J. K. and Amritkar, R. E., “Synchronization by feedback and adaptive control,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 4, pp. 1687–1695, 1994.

[51]. Wu, C. W. and Chua, L. O., “A unified framework for synchronization and control of dynamical systems,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 4, pp. 979–998, 1994.

[52]. Yang, T. and Chua, L. O., "Secure communication via chaotic parameter modulation,"

IEEE Transaction

on Circuits and Systems—I: Fundamental Theory and Applications, vol. 43, pp. 817–819, 1996.

[53]. Chua, L. O. and Green, D. N., "A qualitative analysis of the behavior of dynamic nonlinear

networks," *IEEE*

Transaction on Circuits and Systems, vol. 23, pp. 530–550, 1976.

[54]. Hübner, A. W., "Adaptive control of chaotic systems," *Helvetica Physica Acta*, vol. 62, pp.

343–346, 1989.

[55]. Qammar, H. K. and Mossayebi, "System identification and model-based control of a

chaotic system,"

International Journal of Bifurcation and Chaos, vol. 4, pp. 843–851, 1994.

[56]. Petrov, V., Crowley, M. F., and Showalter, K., "An adaptive control algorithm for tracking

unstable periodic

orbits," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 4, pp. 1311–1317, 1994.

[57]. Gonzalez, G. A., "Controlling chaos of an uncertain Lozi system via adaptive techniques,"

International

Journal of Bifurcation and Chaos, vol. 5, pp. 559–562, 1995.

[58]. Chua, L. O., "Chua's circuit: An overview ten years later," *J. of Circuits, Systems, and*

Computers, vol. 4,

pp. 117–159, 1994.

[59]. Cruz, J. R. and Chua, L. O., "A CMOS IC nonlinear resistor for Chua's circuit," *IEEE*

Transaction on

Circuits and Systems—I: Fundamental Theory and Applications, vol. 39, pp. 985–995, 1992.

[60]. Khibnik, A. I., Roose, D., and Chua, L. O., "On periodic orbits and homoclinic bifurcation

in Chua's circuit

with a smooth nonlinearity," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 3, pp. 363–

384, 1993.

ADAPTIVE CONTROL OF CHAOTIC SYSTEMS WITH UNKNOWN PARAMETERS 267

[61]. Zhong, G. Q., "Implementation of Chua's circuit with a cubic nonlinearity," *IEEE*

Transaction on Circuits

and Systems—I: Fundamental Theory and Applications, vol. 41, pp. 934–941, 1994.

[62]. Carr, J., *Applications of Center Manifold Theory*, New York: Springer-Verlag, 1981.