



کنترل فازی - لغزشی سیستم آشوبگونه لورنز توسط روش مدل مرجع بهبود یافته

مجید مرادی زیرکوهی^{*۱}

^۱ استادیار کنترل، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۰

چکیده

در این مقاله ایده کنترل تطبیقی مدل مرجع، مود لغزشی و کنترل فازی به منظور استفاده از محاسن هر کدام با هم ترکیب شده و روش کنترلی جدیدی برای حل هر دو مسئله پایدارسازی و ردیابی سیستم آشوبگونه لورنز با حذف لرزش سیگنال کنترل در حضور عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری پیشنهاد می‌شود. این طرح از تخمین‌گر فازی تطبیقی برای تقریب تابع استفاده کرده در نتیجه نیازمند محاسبه توابع محدودیت نمی‌باشد و پدیده لرزش کنترل را کاهش می‌دهد. تاثیر بکارگیری روش پیشنهادی در مقابله با عدم قطعیتها و اغتشاشات به گونه‌ای است که رفتار سیستم حلقه بسته همانند مدل مرجع پیشنهادی می‌شود. به این ترتیب، ضعف روش کنترل تطبیقی در برابر دینامیک‌های مدل نشده و اغتشاشات خارجی جبران می‌گردد. کارایی این روش جدید کنترلی از آن جهت برجسته می‌شود که سیستم‌های آشوبگونه، رفتاری نامنظم و وابستگی شدید به شرایط اولیه دارند. از مزایای طرح پیشنهادی این است که مختص به سیستم لورنز نیست و می‌تواند برای کنترل دسته وسیعی از سیستم‌های آشوبی و غیر آشوبی مورد استفاده قرار گیرد. پایداری کنترل کننده پیشنهادی به روش تحلیلی ثابت شده و عملکرد آن توسط شبیه سازی با روش پسگام مقایسه می‌شود. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند که عملکرد روش کنترلی پیشنهادی از روش پسگام که قبلا در مراجع برای کنترل سیستم لورنز ارائه شده، بهتر است.

کلمات کلیدی: سیستم آشوبگونه لورنز؛ مدل مرجع؛ مودلغزشی؛ کنترل فازی؛ کنترل پسگام.

Fuzzy Sliding Mode Control of Lorenz Chaotic System using Improved Model Reference Approach

M. Moradi Zirkohi^{1,*}

¹ Assist. Prof., Elect. Eng, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

Abstract

In this work, by combining the merits of model reference adaptive control, sliding mode, and fuzzy control, a novel control approach is proposed to address the stabilization and tracking problem of Lorenz chaotic system without the chattering phenomenon in the face of structured and unstructured uncertainties. In this control scheme, an adaptive fuzzy system is used to estimate the unknown function. As a result, there is no need to calculate the bound of the unknown function, and the chattering phenomenon is attenuated. One of the advantages of the proposed method is that the behavior of the close loop system is similar to that for the proposed model reference in the presence of uncertainties and disturbances. As a result, the shortcoming of adaptive control in the presence of unmodeled dynamics and external disturbances is compensated. Another advantage of the proposed approach is that chaotic systems have an unpredictable behavior and an extreme sensitivity to the initial conditions. The stability analysis is verified, and the effectiveness of the proposed method is compared with the backstepping method through simulation. Numerical simulations illustrate that the proposed control approach is superior to the backstepping method already published in the literature in overcoming uncertainties.

Keywords: Lorenz Chaotic System; Model Reference; Sliding Mode; Fuzzy Control; Backstepping Control.

۱- مقدمه

لورنز^۱ ایده سیستم آشوبی خود را زمانی مطرح کرد که قبل از او افراد کمی سیستم‌های نامنظم و وابسته به شرایط اولیه را شناسایی کرده بودند. قبل از لورنز این باور غلط وجود داشت که آشفتگی کم در سیستم فقط به تغییرات جزئی آن در طول زمان منجر می‌شود در حالی که لورنز نشان داد آشفتگی کم، منجر به تغییر شدید رفتار سیستم می‌گردد. یکی از ویژگی‌های سیستم لورنز، وابستگی شدید به شرایط اولیه است. یعنی، تغییر کوچکی در شرایط اولیه باعث تغییر زیادی در خروجی می‌شود.

آشوب در بیشتر سیستم‌های مهندسی از جمله مدارهای الکترونیکی، مبدل‌های قدرت و سیستم‌های شیمیایی وجود دارد. خاصیت بارز سیستم‌های آشوب، غیر قابل پیش‌بینی بودن آنها است که این امر می‌تواند منجر به نوسان و خطا در سیستم شود [۳، ۴]. از اینرو کنترل سیستم‌های آشوب، یکی از موضوعات قابل توجه از اوایل سال ۱۹۹۰ بوده است و روش OGY از جمله کارهای اولیه در این زمینه است [۵]. عیب عمده این روش، زمان طولانی به منظور پایداری سازی سیستم آشوب است. در [۶] روشی به منظور کاهش زمان لازم برای پایداری سازی پیشنهاد گردید. علی‌رغم پیشرفت‌های مهم در این زمینه، هنوز هم تئوری‌های عمیق و روش‌های متفاوتی برای کنترل سیستم آشوبی در مرحله شکل‌گیری و توسعه است. بیشتر روش‌های کنترلی برای سیستم‌های آشوب بر مبنای خطی‌سازی فیدبکی طراحی می‌شوند که در اغلب موارد با محدودیت همراه هستند [۷].

در حال حاضر روش‌های مختلفی از جمله شبکه‌های عصبی [۸، ۹]، فازی [۱۰، ۱۱]، هندسه تفاضلی [۱۲] و روش مد لغزشی [۱۳-۱۵] برای کنترل سیستم آشوب ارائه شده‌اند. در بسیاری از مقالاتی که در زمینه کنترل سیستم لورنز منتشر شده‌اند، برای طراحی کنترل کننده فرض شده که ساختار سیستم لورنز کاملاً مشخص است و هیچ گونه عدم قطعیتی لحاظ نشده است. علاوه بر این فرض شده که سیستم تحت تاثیر اغتشاش خارجی نیست. عموماً، بیشتر سیستم‌های فیزیکی غیر خطی و متغیر با زمان بوده و تحت

تاثیر عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری متنوعی هستند. بنابراین مدل‌سازی دقیق آنها برای اهداف کنترلی بخصوص برای طراحی کنترل کننده‌هایی که کاملاً به مدل وابسته هستند مشکل است. سیستم لورنز نیز از سیستم‌هایی است که دارای عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری در دینامیک خود بوده که این مسئله مدل‌سازی دقیق آن را با مشکل مواجه می‌کند. بنابراین طراحی کنترل کننده برای آن در حضور عدم قطعیت‌ها و اغتشاش خارجی مسئله مهمی است [۱۶]. به همین دلیل روش‌هایی که طراحی آنها آزاد از مدل است^۲، می‌تواند گزینه مناسبی برای کنترل سیستم لورنز باشد. از جمله این روش‌ها، روش‌های کنترل فازی هستند. کنترل کننده‌های فازی که در حوزه الگوریتم‌ها هوشمند قرار دارند، یکی از کنترل کننده‌های قدرتمند در کنترل سیستم‌های با مدل دینامیکی نامعین هستند [۱، ۲]. در [۱۷] از کنترل فازی برای کنترل سیستم لورنز استفاده شده است که نتایج نشان از برتری آن نسبت به روش کلاسیک پسگام^۳ دارد. اخیراً روش‌های فازی-تطبیقی نیز توجه محققان را به خود جلب کرده است. در این روش‌ها، ابتدا یک سیستم فازی ساخته می‌شود و سپس پارامترهای آن با استفاده از یک قانون تطبیق تنظیم می‌شود. کنترل کننده‌های فازی-تطبیقی به دو صورت مستقیم^۴ و غیر مستقیم^۵ بکار می‌روند. در روش مستقیم از آنها به عنوان یک کنترل کننده استفاده می‌شود در صورتی که در روش غیر مستقیم برای مدل کردن یک سیستم نامعلوم بکار می‌روند [۱۸].

یکی از روش‌های کنترلی مرسوم به منظور مقابله با عدم قطعیت‌ها، استفاده از کنترل مودل‌غزشی است. این روش، یک روش موفق برای کنترل سیستم‌های غیر خطی است. کنترل مودل‌غزشی اساساً یک روش کنترل فیدبک کلیدزنی سرعت بالایی باشد که با استفاده از یک کنترل ناپیوسته مسیره‌های حالت سیستم را به تعدادی سطوح لغزش از پیش تعریف شده هدایت می‌کند.

از کنترل مودل‌غزشی نیز برای کنترل سیستم لورنز

² Free of model

³ Backstepping

⁴ Direct

⁵ Indirect

¹ Lorenz

۲- مدلسازی سیستم لورنز

سیستم لورنز توسط معادلات زیر بیان می‌شود [۱۲، ۲۳]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -10x + 10y \\ \dot{x} &= -xz - y \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن $R = R_0 + u$ عدد ری لی^۲، R_0 مقدار عمل و ورودی کنترل است. در صورتی که $R_0 = 28$ انتخاب شود بدون اعمال کنترل ($u = 0$)، سیستم رفتار نامنظم و همراه با آشوب از خود نشان می‌دهد.

سیستم لورنز دارای سه نقطه تعادل ناپایدار $(0, 0, -R_0)$ و $(C_0, C_0, -1)$ ، $(-C_0, -C_0, -1)$ است که $C_0 = \sqrt{R_0 - 1}$ می‌باشد. لازم به ذکر است که وقتی نقطه تعادل سیستم در $(C_0, C_0, -1)$ قرار دارد، روش OGY قابل اعمال نیست [۲۳]. با تغییر مبدا سیستم (۱) به نقطه $(C_0, C_0, -1)$ ، معادلات سیستم به صورت زیر در می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -10x_1 + 10x_2 + d_1 \\ \dot{x}_2 &= x_1 - x_2 - (\sqrt{27} + x_1)x_3 + d_2 \\ \dot{x}_3 &= \sqrt{27}(x_1 + x_2)x_3 - x_3 + x_1x_2 - u + d_3 \end{aligned} \quad (2)$$

که d_1 ، d_2 و d_3 اغتشاشات خارجی کراندار هستند. این واقعیت، با ترسیم پیکره فاز در شرایط اولیه $(1.0, 0.1, 0)$ در صفحه X-Z توسط شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل مسیرها به یک نقطه تعادل ختم نمی‌شوند. علاوه بر این، به منظور نمایش حساسیت رفتار سیستم لورنز به شرایط اولیه، رفتار سیستم لورنز را برای دو شرط اولیه نزدیک به هم در شکل ۲ نشان داده‌ایم. در این شکل، شرایط اولیه به صورت $(1.0, 0.1, 0)$ و $(1.0, 0.1, 0.001)$ انتخاب شده‌اند که رفتار سیستم لورنز به ترتیب با خط توپر و خط چین نشان داده شده است. در شرایط اولیه متفاوت، رفتار سیستم در بازه زمانی $0 < t < 20$ یکسان به نظر می‌رسد، در حالی که در $t > 20$ رفتار سیستم کاملاً با هم متفاوت است. بمنظور اهداف کنترلی با کمی ساده سازی سیستم لورنز (۲) را می‌توان بصورت زیر نیز نشان داد:

$$\dot{\tilde{x}}_2 = f + gu \quad (3)$$

که دو تابع متغیر با زمان f و g بصورت زیر تعریف می‌شوند:

استفاده شده است [۱۴، ۱۹]. اگرچه کنترل مود لغزشی یکی از روش‌های مقاوم کنترلی سیستم‌های غیر خطی نامعین است اما برای طراحی باید حدود عدم قطعیت‌ها معلوم باشد. همچنین سیگنال کنترل دارای لرزش^۱ است که در عمل مطلوب نیست. لرزش سیگنال کنترل موجب نویز شدید، تنش بین قطعات مکانیکی، ارتعاش و تحریک "دینامیک‌های مدل نشده" می‌گردد. برای غلبه بر این ایرادها، طرح جدید کنترلی در این مقاله ارائه می‌شود.

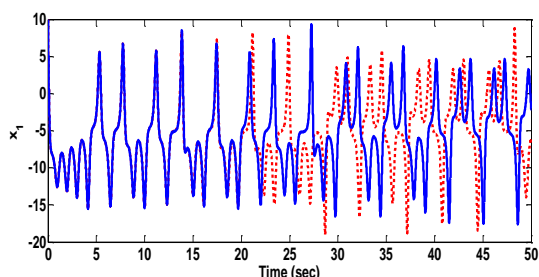
اگرچه کنترل تطبیقی مدل مرجع یکی از روش‌های قدرتمند در کنترل سیستم‌ها است، اما وابسته بودن آن به دینامیک سیستم تحت کنترل و ضعف در مقابله با دینامیک‌های مدل نشده، کاربرد این روش را با محدودیت مواجه می‌سازد. در روش کنترل پیشنهادی این مشکلات مرتفع می‌شود.

در این مقاله ایده کنترل تطبیقی مدل مرجع، مود لغزشی و کنترل فازی به منظور استفاده از محاسن هر کدام با هم ترکیب شده و روش کنترلی جدیدی برای حل هر دو مسئله پایدارسازی و ردیابی سیستم لورنز با حذف لرزش سیگنال کنترل در حضور عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری پیشنهاد می‌شود. این طرح از تخمین‌گر فازی تطبیقی برای تقریب تابع استفاده کرده و نیازمند محاسبه توابع محدودیت نمی‌باشد و پدیده لرزش کنترل را کاهش می‌دهد. روش فازی- لغزشی پیشنهادی با روش‌های قبلی کاملاً متفاوت است. به عنوان مثال، در بسیاری از روش‌های فازی- لغزشی مانند [۲۰، ۲۱] سیستم فازی برای معرفی سطح لغزش بکارگیری شده است. در بعضی موارد نیز از سیستم فازی برای تخمین حدود عدم قطعیت یا تعیین ضرایب کنترل کننده استفاده شده است [۲۲]. از مزایای طرح پیشنهادی این است که مختص به سیستم لورنز نیست و می‌تواند برای کنترل دسته وسیعی از سیستم‌های آشوبی و غیر آشوبی مورد استفاده قرار گیرد.

ساختار این مقاله بدین صورت است که مدل ریاضی و معادلات حاکم بر سیستم لورنز در بخش دوم و روش کنترلی پیشنهادی در بخش سوم بیان می‌گردد. شبیه‌سازی‌ها در بخش چهارم می‌آید و در پایان نتیجه گیری می‌شود.

² Rayleigh

¹ Chattering



شکل ۲- نمایش حساس بودن رفتار سیستم لورنز به شرایط اولیه

همانطور که قبلاً بیان شد سیستم لورنز از سیستم‌هایی است که دارای عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری در دینامیک خود بوده که این مسئله مدلسازی دقیق آن را با مشکل مواجه می‌کند. بنابراین در عمل پیاده سازی u^* ممکن نیست. در نتیجه در این مقاله از یک سیستم فازی برای تقلید رفتار قانون کنترل u^* استفاده می‌شود. در واقع از سیستم فازی به عنوان یک تخمینگر استفاده می‌شود. برای طراحی تخمینگر فازی، ورودی‌های سیستم فازی خطا و مشتق خطا در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن سه تابع عضویت برای هر ورودی، کل فضا را می‌توان با ۹ قانون فازی پوشش داد. قوانین به فرم ممدانی به صورت زیر بیان می‌شوند:

(۱۱) قانون l : اگر e برابر با A_l و \dot{e} برابر با B_l باشد، آنگاه u برابر C_l است

که در آن $l = 1, \dots, 9$ است و برای هر ورودی سه تابع تعلق مثبت P ، صفر Z و منفی N مانند زیر در نظر می‌گیریم:

$$\mu_N(e) = \begin{cases} 1 & e \leq -1 \\ 1 - 2(e + 1)^2 & -1 \leq e \leq -0.5 \\ 2e^2 & -0.5 \leq e \leq 0 \\ 0 & e \geq 0 \end{cases}$$

$$\mu_P(\dot{e}) = \begin{cases} 0 & \dot{e} \leq 0 \\ 2\dot{e}^2 & 0 \leq \dot{e} \leq 0.5 \\ 1 - 2(\dot{e} - 1)^2 & 0.5 \leq \dot{e} \leq 1 \\ 1 & \dot{e} \geq 1 \end{cases}$$

$$\mu_Z(e) = \exp\left(-\frac{e^2}{2\sigma^2}\right), \quad \sigma = 0.5 \quad (12)$$

توابع تعلق خروجی را به صورت گوسین در نظر می‌گیریم که به صورت زیر است.

$$\mu_{C_l} = \exp\left(-\frac{(u - \bar{y}_l)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (13)$$

$$f = 10(x_2 - x_1) - \dot{x}_2 - \dot{x}_1 x_3 - (\sqrt{27} + x_1)(\sqrt{27}(x_1 + x_2) + (\sqrt{27} + x_1)(x_3 - x_1 x_2)) \quad (4)$$

$$g = (\sqrt{27} + x_1) \quad (5)$$

۳- روش کنترلی پیشنهادی

طرح جدید بصورت زیر معرفی می‌گردد. ابتدا ساختار مدل مرجع به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$P_m(s) = \frac{Y_r(s)}{R(s)} = \frac{100}{s^2 + 20s + 100} \quad (6)$$

که در آن $Y_r(s)$ و $R(s)$ به ترتیب تبدیل لاپلاسهای خروجی و ورودی مدل مرجع هستند. با فرض $y = x_2$ به عنوان خروجی سیستم لورنز و y_r به عنوان خروجی مدل مرجع در حوزه زمان، برای طراحی کنترلر مود لغزشی، سطح لغزش را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$S = \dot{e} + 20e + 100 \int e dt \quad (7)$$

که $e = x_2 - y_r$ خطای ردگیری می‌باشد. با مشتق گیری از (۷) و کمی ساده سازی داریم:

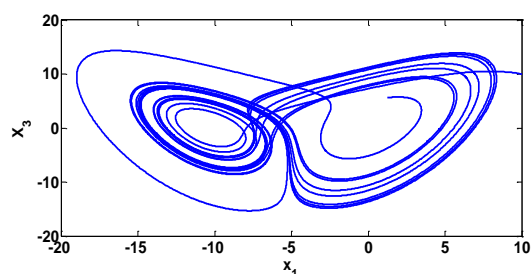
$$\dot{S} = \ddot{e} + 20\dot{e} + 100e = \ddot{x}_2 - \ddot{y}_r + 20\dot{x}_2 - 20\dot{y}_r + 100(x_2 - y_r) \quad (8)$$

با استفاده از رابطه (۳)، رابطه (۸) را می‌توان بصورت زیر نوشت:

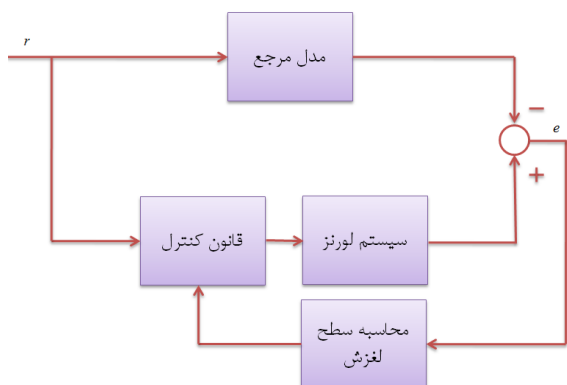
$$\dot{S} = f + gu + 20\dot{x}_2 + 100x_2 - 100r \quad (9)$$

که در آن r ورودی مرجع در حوزه زمان می‌باشد. با فرض اینکه دینامیک سیستم بخوبی مشخص و اغتشاش خارجی وجود نداشته باشد، قانون کنترل معادل را می‌توان با قرار دادن $\dot{S} = 0$ بصورت زیر بدست آورد:

$$u^* = \frac{1}{g}(-f - 20\dot{x}_2 - 100x_2 + 100r) \quad (10)$$



شکل ۱- پیکره فاز برای نمایش رفتار آشوب سیستم لورنز



شکل ۳- بلوک دیاگرام روش پیشنهادی

رابطه (۲۳) را می‌توان بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\dot{V} = \tilde{y}^T \left(Sg\psi + \frac{1}{\gamma} \dot{\tilde{y}} \right) - Sg\varepsilon + Sgu_1 \quad (24)$$

با پیشنهاد قانون تطبیق،

$$\dot{\tilde{y}} = -\gamma_1 Sg\psi \quad (25)$$

و انتخاب $u_1 = -\gamma_2 \text{sgn}(S)$ که γ_2 ضریبی مثبت است داریم:

$$\dot{V} = -Sg\varepsilon - \gamma_2 g|S| \quad (26)$$

اگر $\dot{V} \leq 0$ باشد خطای ردگیری کاهش پیدا می‌کند. برای آنکه $\dot{V} \leq 0$ باشد، کافی است،

$$\dot{V} = -Sg\varepsilon - \gamma_2 g|S| \leq -|S||g||\varepsilon| - \quad (27)$$

$$\gamma_2 g|S| \leq -|S|(\gamma_2 g - |g||\varepsilon|)$$

در نتیجه با انتخاب γ_2 بصورت

$$\gamma_2 \geq |\varepsilon| \text{sgn}(g) \quad (28)$$

شرط $\dot{V} \leq 0$ برقرار می‌شود. sgn تابع علامت است و بصورت $\text{sgn}(g) = g/|g|$ تعریف می‌شود. البته برای برقراری (۲۸) باید علامت g معلوم باشد. با توجه به مباحث فوق خطای ردگیری e کراندار و به تبع آن \tilde{y} محدود است.

توجه شود که با توجه به کوچک بودن ε سمت راست (۲۸) بسیار کوچک است. از آنجا که روش کنترل تطبیقی پیشنهادی بر مبنای لیاپانوف است همگرایی تضمین می‌گردد. در این خصوص کافی است که ضرایب مثبت انتخاب شوند. ضرایب تطبیق کوچک باعث کند شدن همگرایی می‌شوند. از طرفی انتخاب ضرایب بزرگ باعث همگرایی سریع پارامترها می‌شود. بلوک دیاگرام کنترلی در شکل ۳ نشان داده شده است.

که در آن \hat{y}_l مرکز C_l است. با استفاده از (۱۱) تا (۱۳) و در نظر گرفتن موتور استنتاج مددانی، فازی ساز منفرد و غیرفازی ساز میانگین مراکز \mathcal{Y} به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۰]

$$u_f = \sum_{l=1}^9 \hat{y}_l \psi_l(e, \dot{e}) = \tilde{y}^T \Psi(e, \dot{e}) \quad (14)$$

که در آن $\Psi = [\psi_1 \dots \psi_9]^T$ و $\tilde{y} = [\hat{y}_1 \dots \hat{y}_9]^T$ است. ψ_l مقدار مثبتی دارد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\psi_l(e, \dot{e}) = \frac{\mu_{A_l}(e) \mu_{B_l}(\dot{e})}{\sum_{l=1}^9 \mu_{A_l}(e) \mu_{B_l}(\dot{e})} \quad (15)$$

که در آن $\mu_{A_l}, \mu_{B_l} \in [0,1]$ است. پس، $|\psi_l(e, \dot{e})| \leq 1$ است. در نتیجه تابع فازی Ψ محدود است.

با توجه به این که سیستم‌های فازی را می‌توان به عنوان تخمین‌گر عمومی در نظر گرفت، در نتیجه یک سیستم فازی بهینه به فرم (۱۴) وجود دارد که:

$$u^* = y^* T \Psi(e, \dot{e}) + \varepsilon \quad (16)$$

که ε به عنوان خطای تقریب در نظر گرفته می‌شود که طبق قضیه تقریب عمومی مقدار محدودی دارد. در نتیجه خطای تقریب ε محدود است.

قانون کنترل جدید بصورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$u = u_f + u_1 \quad (17)$$

که u_f خروجی تخمین‌گر فازی بمنظور تخمین u^* می‌باشد. u_1 نیز برای جبران خطای تقریب استفاده می‌شود. با استفاده از (۱۰) و کمی ساده سازی رابطه (۹) را می‌توان بصورت زیر نوشت.

$$\dot{S} = g(u_f - u^* + u_1) \quad (18)$$

از طرفی با استفاده از (۱۴) و (۱۶) داریم:

$$u_f - u^* = (\tilde{y}^T - y^{*T}) \Psi - \varepsilon = \tilde{y}^T \Psi - \varepsilon \quad (19)$$

با جایگذاری (۱۹) در (۱۸) داریم:

$$\dot{S} = g(\tilde{y}^T \Psi - \varepsilon + u_1) \quad (20)$$

حال برای اثبات پایداری و همچنین به دست آوردن قانون تطبیق به منظور محاسبه \tilde{y} تابع مثبت معین V را به صورت زیر پیشنهاد می‌دهیم.

$$V = \frac{1}{2} S^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{y}^T \tilde{y} \quad (21)$$

که γ_1 مقداری مثبت است. بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{V} = S\dot{S} + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{y}^T \dot{\tilde{y}} \quad (22)$$

با جایگذاری (۲۰) در (۲۲) و کمی ساده سازی داریم:

$$\dot{V} = Sg\tilde{y}^T \Psi - Sg\varepsilon + Sgu_1 + \frac{1}{\gamma} \tilde{y}^T \dot{\tilde{y}} \quad (23)$$

۴- شبیه سازی

به منظور نمایش عملکرد مناسب ساختار کنترلی پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها با روش پسگام که قبلاً برای کنترل سیستم لورنز [۲۳] اعمال شده، مقایسه شده است. پارامترهای قانون کنترل، با روش سعی و خطا برای دستیابی به عملکرد بهتر به صورت $\gamma_1 = 500$ و $\gamma_2 = 0.01$ داده شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها در چهار بخش انجام شده است.

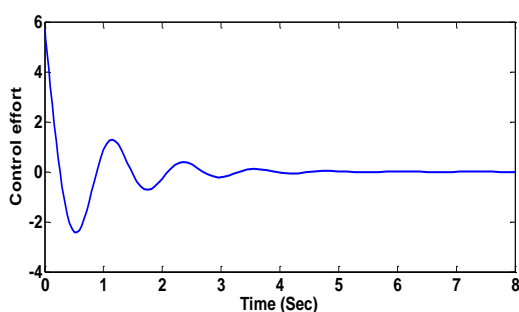
شبیه‌سازی اول: در این قسمت، به مسئله پایداری می‌پردازیم. شرایط اولیه به صورت (۱،/۵،/۸) انتخاب شده است. نمایش حالت‌ها و تلاش کنترلی برای روش پسگام و روش کنترلی پیشنهادی به ترتیب در اشکال ۴ و ۵ نشان داده شده است. در هر دو روش، کلیه حالت‌ها به سمت صفر میل می‌کنند. در روش پیشنهادی و پسگام بترتیب حالات بعد از ۴/۴ ثانیه و ۴ ثانیه صفر می‌شوند. در واقع روش پیشنهادی دارای عملکرد مناسب‌تری در مقایسه با روش پسگام با داشتن رفتار گذرا و ماندگار بهتر است. تطبیق پارامترهای سیستم فازی نیز در شکل ۶ نشان داده شده است.

شبیه سازی دوم: در این قسمت، با انتخاب ورودی به صورت $r(t) = 2\sin(t)$ به مسئله ردیابی بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای سیستم و اغتشاش خارجی می‌پردازیم. نتایج حاصل، در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. ماکزیمم خطای ردگیری در روش پسگام ۰/۴۸ در

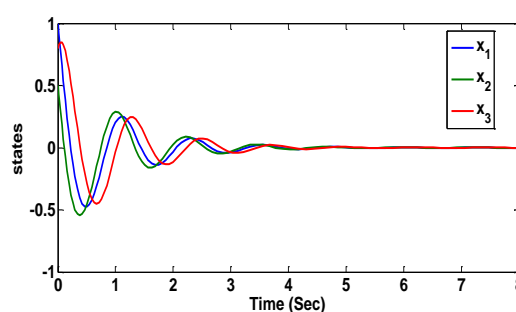
صورتی که همین مقدار در روش پیشنهادی ۰/۰۲ می‌باشد. مشاهده می‌شود روش پیشنهادی بمراتب دارای عملکرد بهتری است.

شبیه‌سازی سوم: در این قسمت، مقاوم بودن روش پسگام و روش پیشنهادی را در مسئله ردیابی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای سیستم و همچنین اغتشاش خارجی بررسی می‌کنیم. بدین منظور، عدم قطعیت در پارامترهای سیستم لورنز را به صورت ۳۰٪ تغییر در مقادیر نامی آن در نظر می‌گیریم. همچنین اغتشاشات خارجی را بصورت $d_1 = \sin(\pi t)$ ، $d_2 = \sin(\pi t) \cos(2\pi t)$ و $d_3 = 0.5 \sin(t)$ در نظر می‌گیریم. نتایج حاصل در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده است. روش کنترلی پیشنهادی دارای پاسخ سریع‌تر و خطای ردیابی به مراتب کمتر است. به عبارتی، روش پسگام در حضور عدم قطعیت عملکرد مناسبی نداشته و مقاوم نمی‌باشد.

شبیه‌سازی چهارم: این شبیه‌سازی به بررسی عملکرد قانون کنترل (۱۷) برای حالت تنظیم می‌پردازد. نتایج حاصل در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پاسخ روش پسگام نوسانی است. در نتیجه در مقایسه با روش پسگام، روش کنترلی پیشنهادی دارای پاسخ سریع‌تر و بدون فراجهش است. بنابراین روش پیشنهادی در تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده با در نظر گرفتن سیگنال کنترل دارای عملکرد خوبی است.

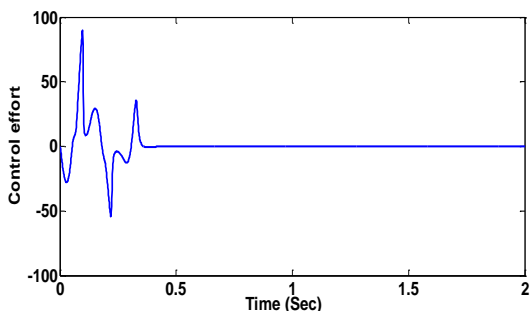


ب) تلاش کنترلی

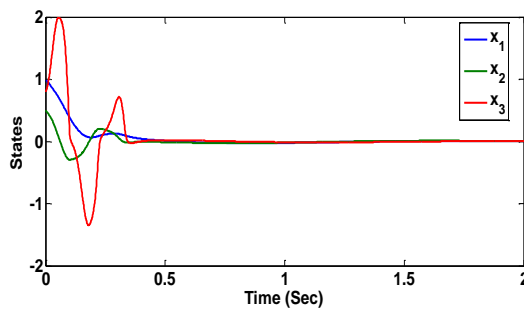


الف) حالت‌های سیستم

شکل ۴- پایداری‌سازی به روش پسگام

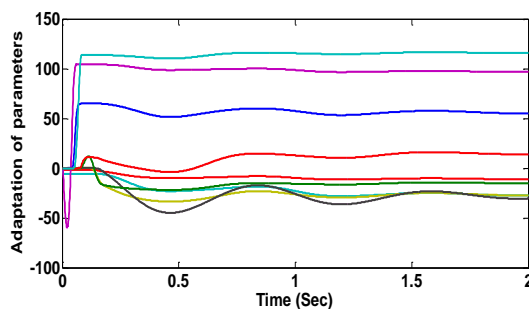


ب) تلاش کنترلی

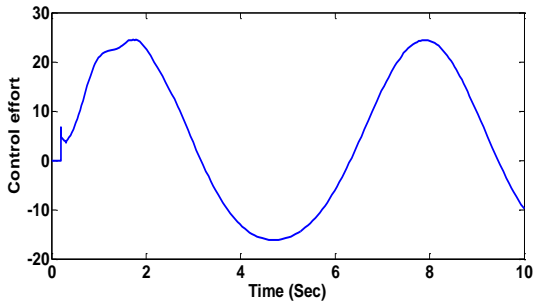


الف) حالت‌های سیستم

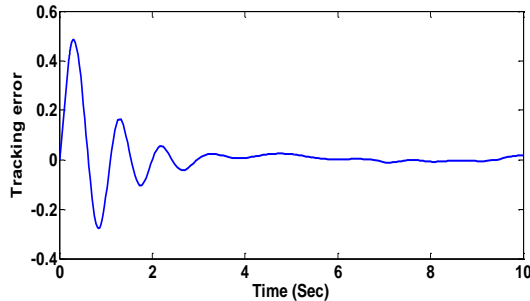
شکل ۵- پایداری‌سازی به روش پیشنهادی



شکل ۶- تطبیق پارامترهای سیستم فازی

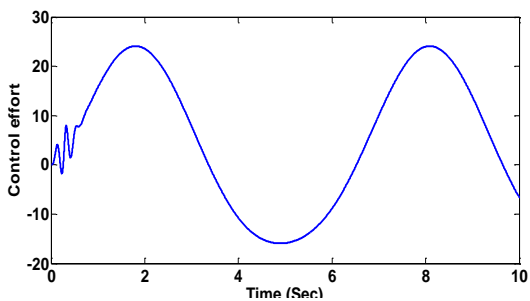


ب) تلاش کنترلی

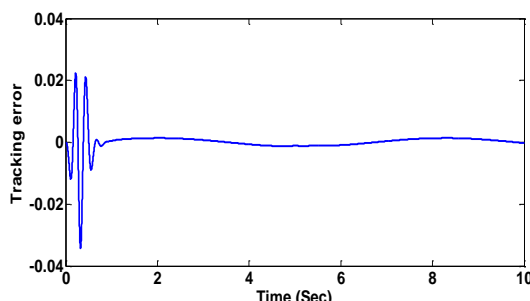


الف) خطای ردیابی

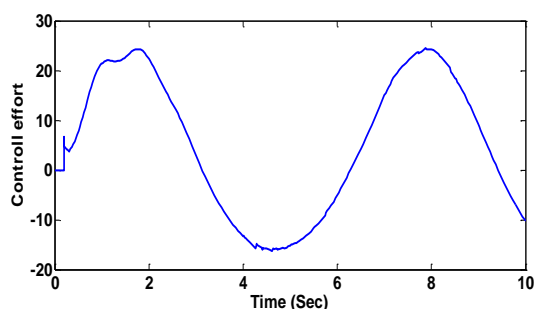
شکل ۷- ردیابی به روش پسگام بدون عدم قطعیت



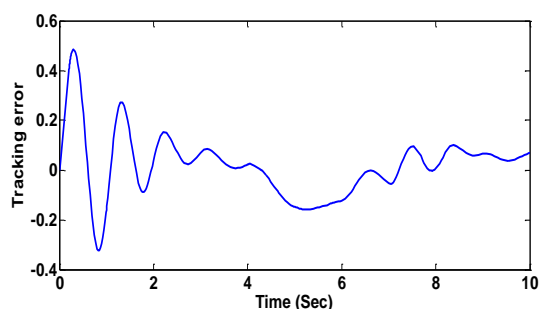
ب) تلاش کنترلی



الف) خطای ردیابی

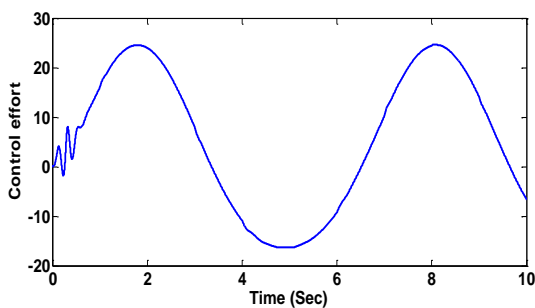


ب) تلاش کنترلی

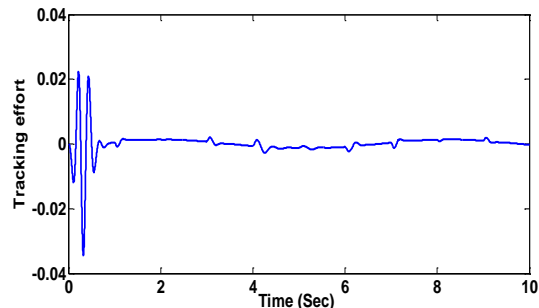


الف) خطای ردیابی

شکل ۹- عملکرد روش پسگام در حضور عدم قطعیت

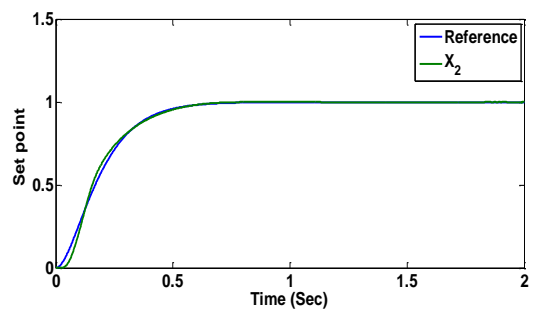


ب) تلاش کنترلی

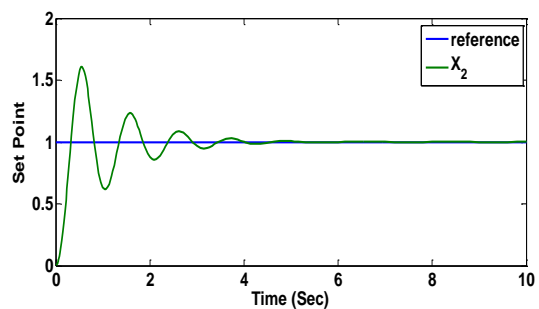


الف) خطای ردیابی

شکل ۱۰- عملکرد روش پیشنهادی در حضور عدم قطعیت



شکل ۱۲- عملکرد روش پیشنهادی در حالت تنظیم



شکل ۱۱- عملکرد روش پسگام در حالت تنظیم

تطبیقی مستقیم^۱ استفاده شده است. نتایج شبیه سازی برای حالت تنظیم در شکل ۱۳ آمده است. با مقایسه شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آشکار است که پاسخ روش پیشنهادی سریعتر و بدون فراجهش است. عملکرد سیستم در ردیابی نیز در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با مقایسه شکل ۸ و ۱۴ آشکار است که

شبیه‌سازی پنجم: در این شبیه سازی به مقایسه روش پیشنهادی با روش ارائه شده در [۱۷] می‌پردازیم. توجه شود که ماهیت دو مقاله متفاوت است در [۱۷] یک سطح لغزش متغیر با زمان تعریف شده و سپس از سیستم فازی برای تنظیم این ضرایب استفاده شده است در صورتی که در این مقاله از سیستم فازی به عنوان یک کنترل کننده فازی

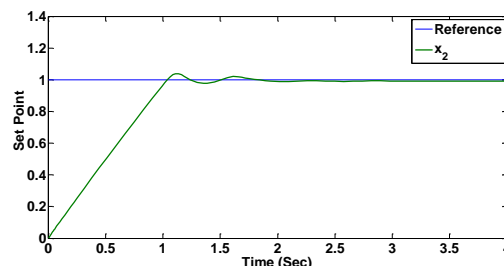
^۱ Direct

سیستم‌های آشوبگونه زیادی از جمله سیستم چن^۱ [۲۴] را می‌توان به فرم معادله (۳) نوشت. لذا روش پیشنهادی مختص به سیستم لورنز نمی‌باشد و برای کنترل دسته وسیعی از سیستم‌های آشوبی و غیر آشوبی قابل استفاده است.

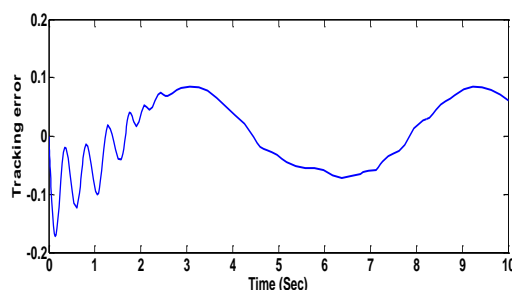
۶- مراجع

- [۱] فاتح م م، عابدین زاده شهری م (۱۳۹۴) کنترل فازی تطبیقی بازوی رباتیک سیار. مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۵-۱۷-۲۷.
- [۲] فاتح م م، کیقبادی ج (۱۳۹۴) کنترل فازی تطبیقی ربات تک چرخ الکتریکی. مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۵-۵۶۱-۷۵.
- [3] Chen G (1999) Controlling chaos and bifurcations in engineering systems. CRC press.
- [4] Kocamaz UE, Uyaroglu Y, Kizmaz, H (2014) Control of Rabinovich chaotic system using sliding mode control. Int J Adapt Control 28: 1413-1421.
- [5] Ott E, Grebogi C, Yorke JA (1990) Controlling chaos. Phys Rev Lett 64: 1196-1199.
- [6] Shinbrot T, Ott E, Grebogi C, Yorke JA (1990) Using chaos to direct trajectories to targets. Phys Rev Lett 65: 3215.
- [7] Fang JQ, Hong Y, Qin H, Chen G (2000) Nonlinear control of chaotic systems: A switching manifold approach. Discrete Dyn Nat Soc 4: 257-267.
- [8] Ramesh M, Narayanan S (2001) Chaos control of Bonhoeffer-van der Pol oscillator using neural networks. Chaos Soliton Fract 12: 2395-2405.
- [9] Chen CW (2014) Applications of neural-network-based fuzzy logic control to a nonlinear time-delay chaotic system. J Vib Control 20: 589-605.
- [10] Udawatta L, Watanabe K, Kiguchi K, Izumi K (2002) Fuzzy-chaos hybrid controller for controlling of nonlinear systems. IEEE T Fuzzy Syst 10(3): 401-411.
- [11] Hu C, Jiang H (2014) Time-delayed impulsive control of chaotic system based on TS fuzzy model. Math Probl Eng.
- [12] Fuh CC, Tung PC (1995) Controlling chaos using differential geometric method. Phys Rev Lett 75: 2952.
- [13] Li J, Li W, Li Q (2012) Sliding mode control for uncertain chaotic systems with input nonlinearity. Commun Nonlinear Sci Numer Simul 17(1): 341-348.

روش پیشنهادی موفقتر عمل کرده که این بخاطر تطبیقی بودن ساختار کنترل کننده پیشنهادی است.



شکل ۱۳- عملکرد روش ارائه شده در [۱۷] در حالت تنظیم



شکل ۱۴- عملکرد روش ارائه شده در [۱۷] در حالت ردگیری

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش کنترلی ترکیبی جدید بر مبنای مدل مرجع بهبود یافته، مود لغزشی و فازی همراه با تحلیل پایداری برای کنترل سیستم لورنز که دارای رفتار نامنظم و آشوبگونه است، ارائه شد. استفاده از کنترل مود لغزشی با توجه به کارایی آن در برابر عدم قطعیت‌های ناشی از دینامیک‌های مدل نشده در ساختار پیشنهادی، عملکرد روش کنترل تطبیقی مدل مرجع را بهبود داده است. در روش پیشنهادی از سیستم فازی برای تقریب تابع استفاده شده است. در نتیجه، نیازی به محاسبه حدود عدم قطعیت نبوده و پدیده لرزش سیگنال کنترل نیز کاهش یافته است. نتایج شبیه سازی نشان دهنده عملکرد بهتر روش کنترلی پیشنهادی در مقایسه با روش پسگام است. از مزایای طرح پیشنهادی این است که ضمن داشتن عملکرد خوب و مقاوم

¹ Chen

- International MultiConference of Engineers and Computer Scientists.
- [20] Ha QP, Rye DC, Durrant-Whyte HF (1999) Fuzzy moving sliding mode control with application to robotic manipulators. *Automatica* 35: 607-616.
- [21] Li THS, Huang YC (2010) MIMO adaptive fuzzy terminal sliding-mode controller for robotic manipulators. *Inform Sciences* 180:4641-4660.
- [22] Guo Y, Woo PY (2003) An adaptive fuzzy sliding mode controller for robotic manipulators. *IEEE T Syst Man Cy A* 33: 149-159.
- [23] Mascolo S (1997) Backstepping design for controlling Lorenz chaos, in: *IEEE Conference On Decision And Control*, Citeseer, 1500-1501.
- [24] Al-sawalha MM, Noorani M, Al-Dlalah M (2010) Adaptive anti-synchronization of chaotic systems with fully unknown parameters. *Comput Math Appl* 59: 3234-3244.
- [14] Nazzal JM, Natsheh AN (2007) Chaos control using sliding-mode theory. *Chaos Soliton Fract* 33: 695-70.
- [15] Dadras S, Momeni HR, Majd VJ (2009) Sliding mode control for uncertain new chaotic dynamical system. *Chaos Soliton Fract* 41: 1857-1862.
- [16] Guo H, Lin S, Liu J (2006) A radial basis function sliding mode controller for chaotic Lorenz system. *Phys Rev Lett* 351: 257-261.
- [17] Fateh MM, Alfi A, Moradi M, Modarres H (2009) Sliding mode control of Lorenz chaotic system on a moving fuzzy surface. *EUROCON, IEEE* 964-970.
- [18] Wang LX (1999) *A course in fuzzy systems*. Prentice-Hall press, USA.
- [19] Chena SW, Yangb YS, Zhang-Jian PZ, Liaob TL, Yan JJ (2013) Synchronization control of uncertain generalized Lorenz chaotic system: chattering-free sliding model control. in: *Proceedings of the*