



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 3, No. 2, pp.: 89-100
2024

DOI:
10.22034/jssta.2023.403726.1128

Article Info

Received: 2023-06-25
Accepted: 2024-01-16

Keywords

Nonlinear Gyroscope System,
Sliding Mode Control,
Neural Network

How to Cite this article

Ali Foroutan, Alireza Safa,
"Design model-free
controller for a chaotic
nonlinear gyroscope
system", *Journal of Space
Science, Technology and
Applications*, vol 3 (2),
p.:89-100, 2024.

Design model-free controller for a chaotic nonlinear gyroscope system

Ali Foroutan¹, Alireza Safa^{2*}

1. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Golestan University, Gorgan, Iran.
a.foroutan400@stu.gu.ac.ir

2*. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Golestan University, Gorgan, Iran, (Corresponding Author).
a.safa@gu.ac.ir

Abstract

The gyroscope system is an attractive nonlinear system that is used in various industries such as the military, aerospace, navigation, etc. Considering the importance and applications of the nonlinear system of the gyroscope, the design of the control system for the operation of the gyroscope system is indispensable. Most systems in the real world have nonlinear dynamics, and it is inevitable to avoid the destructive effects of noise and unpredictable external disturbances. Nonlinear uncertainties in gyroscope dynamics, noise, and unpredictable external disturbances are major challenges in controller design. The model-free control is developed for this system. Particularly, the sliding mode controller is widely used in the control of non-linear systems due to its robustness to system dynamic uncertainties and system disturbances. In this paper, the dynamic behavior of the nonlinear gyroscope system is analyzed then a sliding mode controller based on the neural network is used to control the gyroscope system. The stability of the nonlinear gyroscope system is proved using Lyapunov's theory. The nonlinear model of the gyroscope is simulated in Simulink MATLAB to investigate the behavior of the proposed control method and compare it with other controller's methods, so the efficiency of the proposed control method in the control of the nonlinear gyroscope system is investigated.



طراحی کنترل کننده مدل آزاد برای سیستم غیر خطی ژيروسکوپ آشوبناک

علی فروتن^۱، علیرضا صفا^{۲*}

۱- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران، a.foroutan400@stu.gu.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران، a.safa@gu.ac.ir (نویسنده مسئول)

دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه
علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال سوم، شماره ۲، صفحه ۸۹-۱۰۰
پاییز و زمستان ۱۴۰۲

DOI:
10.22034/jssta.2023.403726.1128

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶

واژه‌های کلیدی

سیستم غیر خطی ژيروسکوپ،
کنترل کننده مدلغزشی، شبکه
عصبی.

نحوه استناد به این مقاله

علی فروتن، علیرضا صفا، " طراحی
کنترل کننده مدل آزاد برای سیستم
غیر خطی ژيروسکوپ آشوبناک"،
دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای
فضایی، جلد سوم، شماره دوم،
صفحات ۸۹-۱۰۰، ۱۴۰۲.

چکیده

سیستم ژيروسکوپ، یک سیستم غیر خطی جذاب است که در صنایع مختلف نظامی، هوا و فضا، ناوبری و بسیاری دیگر از صنایع کاربرد دارد. با توجه به کاربردهای در طیف وسیعی صنایع از ژيروسکوپ، طراحی سیستم کنترل برای بهبود رفتار آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اکثر سیستم‌ها در دنیای واقعی، دارای دینامیک غیر خطی می‌باشند و جلوگیری از اثرات مخرب نویز و اغتشاش‌های خارجی غیر قابل پیش‌بینی اجتناب‌ناپذیر است. در این مقاله یک کنترل کننده مدل آزاد برای این سیستم پیشنهاد می‌شود. به عبارت دقیق‌تر، از کنترل کننده مدل لغزشی به دلیل مقاوم بودن در مقابل نامعینی‌های دینامیک سیستم و اغتشاش‌های وارد بر سیستم، به‌طور گسترده در کنترل سیستم‌های غیر خطی استفاده می‌شود. در این مقاله رفتار دینامیکی سیستم غیر خطی ژيروسکوپ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و از کنترل کننده مدل لغزشی مبتنی بر شبکه عصبی برای کنترل سیستم ژيروسکوپ استفاده می‌شود. پایداری سیستم غیر خطی ژيروسکوپ با استفاده از تئوری لیاپانوف اثبات . برای بررسی رفتار سیستم کنترلی پیشنهادی و مقایسه با سایر کنترل کننده‌ها، مدل غیر خطی ژيروسکوپ در سیمولینک متلب، شبیه‌سازی می‌شود و کارآمدی رهیافت کنترلی پیشنهادی در کنترل سیستم غیر خطی ژيروسکوپ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱- مقدمه

سیستم ژيروسکوپ، یک سیستم غیرخطی جذاب و کارآمد است که در دهه‌های اخیر با توجه به کاربردهای این سیستم، مطالعه بر روی دینامیک پیچیده آن به موضوعی جذاب برای مهندسان کنترل و هوا و فضا تبدیل شده است. از سیستم ژيروسکوپ برای اندازه‌گیری زاویه و سرعت زاویه‌ای اجسام متحرک در طیف گسترده‌ای از صنایع نظیر هوا و فضا، نظامی، ناوربری، خودروسازی، پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دینامیک بسیاری از سیستم‌های صنعتی دارای غیرخطی‌های فراوانی است که موجب چالش در طراحی کنترل کننده می‌شود. سیستم ژيروسکوپ یک حسگر کلیدی در سامانه‌های مدرن به حساب می‌آید. سیستم ژيروسکوپ، دستگاهی است که بر روی یک چهارچوب^۱ قرار گرفته و با چرخش چهارچوب می‌تواند سرعت زاویه‌ای را حس نماید. ژيروسکوپ‌ها می‌توانند به‌تنهایی یا در سامانه‌های پیچیده‌ای نظیر قطب‌نمای گردش‌سنج^۲، واحد اندازه‌گیری اینرسی^۳، سیستم ناوربری اینرسی^۴ سامانه مرجع سمت و تراز^۵ استفاده شوند. واحد اندازه‌گیری اینرسی شامل ژيروسکوپ و شتاب‌سنج پیشرفته می‌باشد که قادر به اندازه‌گیری سرعت و شتاب خودرو است. یکی از کاربردهای اصلی ژيروسکوپ، حسگرهای شتاب‌سنج و حسگرهای سنجش سرعت زاویه‌ای در فضا می‌باشد این در حالی است که اخیراً از سیستم ژيروسکوپ در مریخ‌نورد استفاده می‌شود [۱]. ژيروسکوپ‌ها با توجه به فناوری ساختاری به ژيروسکوپ‌های مکانیکی^۶، سامانه‌های میکرو الکترومکانیکی^۷، فیبر نوری^۸ دسته‌بندی می‌شوند. از قرن نوزدهم، ژيروسکوپ‌های مکانیکی، به عنوان حسگرهای جابه‌جایی و سرعت توسعه یافتند. ژيروسکوپ میکرو الکترومکانیکی، حسگرهای حرکتی هستند که سرعت حرکت زاویه‌ای یک جسم را حول محور خاص اندازه‌گیری می‌کند. از این دسته از ژيروسکوپ‌ها در لوازم الکترونیکی خودرو، صنایع

دفاعی، پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. از مزایای سیستم ژيروسکوپ می‌توان به مصرف انرژی پایین، پیاده‌سازی ساده و هزینه کم اشاره نمود. در دهه اخیر کنترل سیستم‌های آشفته به مسئله مهمی تبدیل شده است. در سالیان اخیر چن^۹ به تجزیه و تحلیل رفتار دینامیکی یک سیستم ژيروسکوپ متقارن با میرایی خطی و غیرخطی پرداخته است که تحت برآشفتگی هارمونیک^{۱۰} قرار داشت [۳]. حرکت آشوبناک در سیستم ژيروسکوپ برای نخستین بار در سال ۱۹۸۱ ارائه شد. در سال ۱۹۹۶ چن و همکاران دینامیک غیرخطی یک ژيروسکوپ متقارن و سنگین نصب شده بر روی یک پایه مرتعش را مورد بررسی قرار دادند و در مورد حرکت‌های آشفته سیستم ژيروسکوپ با میرایی خطی بحث کردند [۴]. در سال ۲۰۰۱ حرکت سیستم ژيروسکوپ متقارن که تحت برآشفتگی هارمونیک قرار می‌گیرد مورد بررسی قرار گرفت [۵]. در سال ۲۰۰۲ چن حرکت غیرخطی یک سیستم ژيروسکوپ متقارن را با میرایی غیرخطی بررسی کرد. حرارت، تغییر پارامترهای سیستم با زمان، نویز مکانیکی، نویز مداری حسگر می‌توانند عملکرد و پایداری سیستم ژيروسکوپ را دچار اختلال نمایند. در سال ۲۰۱۵ ژانگ^{۱۱} و همکاران سعی در کاهش نویز در سیستم‌های ژيروسکوپ میکرو الکترومکانیکی داشتند [۶]. در سال ۲۰۱۶ توسط سان^{۱۲} و همکاران یک ساختار نوین از فرکانس خروجی رزونانس ژيروسکوپ ارائه شد [۷]. در سال ۲۰۱۹ ایساکوف^{۱۳} و همکاران تأثیر میرایی خطی و غیرخطی بر روی ارتعاشات غیرخطی رتور عمودی ژيروسکوپ را مورد بررسی قرار دادند [۸]. افزایش ناگهانی انرژی تشدید می‌تواند موجب آسیب رسیدن به سیستم مکانیکی شود که در سال ۲۰۱۷ با تعیین حالت‌های تشدید در دینامیک غیرخطی سیستم، پیش‌بینی تبادل انرژی با دامنه ارتعاشات ممکن می‌شود [۹]. در سالیان اخیر روش‌های کنترلی متنوعی برای افزایش عملکرد سیستم ژيروسکوپ و مقاوم بودن در مقابل نویز و اغتشاش‌های وارد بر سیستم پیشنهاد شده‌اند [۱۰]. در سال ۲۰۰۸ یک طرح

¹ Frame² Gyrocompass³ Inertial Measurement Unit⁴ Inertial Navigation System⁵ Attitude Heading Reference System⁶ Mechanical Gyroscope⁷ Micro Electro Mechanical Systems⁸ Fiber Optic Gyroscope⁹ Chen¹⁰ Harmonic¹¹ Zhang¹² Sun¹³ Iskakov

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه هوش مصنوعی و شبکه عصبی، از شبکه عصبی در کنترل تطبیقی سامانه‌های دارای دینامیک غیرخطی استفاده می‌شود. شبکه‌های عصبی ابزار دقیق برای تخمین دینامیک غیرخطی با پارامترهای نامعین و توابع غیرخطی پیچیده هستند. در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های بسیاری در زمینه شناسایی و کنترل سیستم‌های غیرخطی در حضور نامعینی‌ها به دست آمده است. اخیراً از شبکه‌های عصبی برای تخمین برخط اغتشاش‌های نامعین و طراحی ریتگر تطبیقی استفاده می‌شود. هدف اصلی از کنترل، دستیابی به عملکرد مناسب سیستم کنترل در حضور نامعینی‌ها، نویز، اغتشاش‌های خارجی وارد بر سیستم می‌باشد. در دهه‌های گذشته دستاورد و پیشرفت‌های زیادی در زمینه طراحی کنترل‌کننده به دست آمده است که کنترل مقاوم، کنترل تطبیقی، کنترل مد لغزشی و کنترل مبتنی بر شبکه عصبی برخی از این پیشرفت‌ها می‌باشند. نامعینی‌های غیرخطی در دینامیک ژيروسکوپ و اغتشاش‌های خارجی غیرقابل پیش‌بینی، چالش بزرگ در طراحی کنترل‌کننده می‌باشند. کنترل‌کننده مد لغزشی دارای ویژگی‌های جذابی نظیر مقاوم بودن در برابر تغییرات پارامترهای سیستم و عدم حساسیت به اغتشاش‌ها می‌باشد. با مروری اجمالی که پژوهش‌های پیشین صورت پذیرفت مبین شد که اکثر رویکردهای پیشنهادی برای کنترل ژيروسکوپ مبتنی بر مدل هستند و نیازمند مدل دقیق از سیستم می‌باشیم. این در حالی است که در واقعیت دسترسی به چنین مدلی سخت و یا مقدور نیست. نوآوری این مقاله در طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی و ادغام با شبکه عصبی برای تخمین دینامیک ژيروسکوپ برای دستیابی به عملکرد کنترلی مطلوب در کنترل سیستم ژيروسکوپ با دینامیک غیرخطی نامعلوم در حضور نامعینی‌ها و تغییرات پارامترهای دینامیکی سیستم باگذشت زمان می‌باشد. از جمله دستاوردهای پژوهشی این مقاله عبارت است از:

- طراحی کنترل‌کننده قابل اعتماد برای کنترل سیستم ژيروسکوپ، دستیابی به پاسخ گذرای مطلوب و پایداری سیستم؛
- عدم نیاز به دانش مدل دینامیکی سیستم ژيروسکوپ در طرح کنترلی پیشنهادی؛

کنترلی فازی مد لغزشی برای کنترل سیستم غیرخطی ژيروسکوپ با نامعینی‌ها و اغتشاش‌های خارجی وارد بر سیستم ارائه گردید [۱۱]. در سال ۲۰۱۸ یک طرح کنترلی تطبیقی با روش خطی‌سازی بازخورد خروجی^۱ برای کنترل سیستم دو درجه آزادی ژيروسکوپ طراحی شد [۱۲]. در سال ۲۰۱۱ یک طرح کنترلی تطبیقی فازی مد لغزشی برای دسته‌ای از سیستم‌های غیرخطی چند ورودی چند خروجی ارائه گردید [۱۳]. در سال ۲۰۱۸ وانگ^۲ و همکاران به بررسی همگام‌سازی مد لغزشی مرتبه کسری پرداختند [۱۴]. کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، توجه زیادی را در مهندسی به خود جلب کرده‌اند. در سال ۲۰۱۸ ارتباط امن با استفاده از کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی بهینه توسط نادری و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت [۱۵]. در سال ۲۰۱۷ یک کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی نوین برای همگام‌سازی سیستم‌های آشسته در حضور اغتشاش و نویز مورد بررسی قرار گرفت [۱۶]. در سال ۲۰۱۹ یک کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی کسری برای همگام‌سازی سیستم‌های آشسته ارائه شد [۱۷]. در سال ۲۰۱۸ یک استراتژی تثبیت‌کننده مد لغزشی تطبیقی فازی مقاوم برای سیستم‌های آشسته مرتبه کسری ارائه شد [۱۸]. در سال ۲۰۱۹ یک کنترل‌کننده مد لغزشی پسگام فازی مرتبه کسری برای ژيروسکوپ میکرو الکترومکانیکی سه محوره طراحی شد [۱۹]. در دهه اخیر مطالعات زیادی توسط محققان در مورد کنترل هوشمند سیستم‌های غیرخطی با استفاده از شبکه‌های عصبی انجام شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی یک سیستم پردازش اطلاعات غیرخطی تطبیقی می‌باشند. از سال ۱۹۸۰ تحقیقات بر روی شبکه‌های عصبی مصنوعی پیشرفت چشمگیری داشته است. عملکرد شبکه عصبی به تعداد نوروها وابسته می‌باشد. اگر تعداد نوروها کم باشد منجر به عملکرد تخمین ضعیف می‌شود و در صورتی که تعداد نوروها زیاد انتخاب شوند شبکه عصبی با مشکل بیش برآزش^۳ مواجه می‌شود. معماری یک شبکه عصبی مصنوعی با تمام اتصال‌های شبکه و تابع تبدیل‌های نوروها تعیین می‌شوند. فرآیند یادگیری در شبکه عصبی مصنوعی با آموزش و تنظیم مکرر وزن‌ها حاصل می‌شود [۲۰].

¹ Output Feedback Linearization

² Wang

³ Overfitting Problem

$$P_\phi = \beta_\phi, \quad (3)$$

$$P_\psi = \frac{\partial L}{\partial \psi} = I_3(\phi \cos(\theta) + \psi), \quad (4)$$

$$P_\psi = I_3 \omega_z = \beta_\psi, \quad (5)$$

که ω_z سرعت چرخش سیستم ژيروسکوپ است. با استفاده از روش روث^۶ معادلات حرکت سیستم غیرخطی ژيروسکوپ تنها به زاویه θ بستگی خواهد داشت و به صورت زیر توصیف می شود [۲۱]:

$$h(\theta) = \left[\frac{(\beta_\phi - \beta_\psi \cos(\theta))^2}{2I_1 \sin^2(\theta)} \right] + \frac{\beta_{phi}^2}{2I_3} + M_g(l + \bar{l} \sin(\omega t)) \cos(\theta), \quad (6)$$

$$R = L - \beta_\phi \phi - \beta_\psi \psi = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}^2 - h(\theta), \quad (7)$$

$$R = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}^2 - h(\theta), \quad (8)$$

اگر $\theta = 0$ باشد، آنگاه $\beta_\phi = \beta_\psi$ خواهد بود. تابع اتلاف به صورت رابطه زیر توصیف می شود:

$$F = -D_1 \dot{\theta} - D_2 \dot{\theta}^3, \quad (9)$$

که D_1 و D_2 مقادیر ثابت مثبت هستند. $D_1 \dot{\theta}$ تابع خطی و $D_2 \dot{\theta}^3$ تابع مکعب می باشند. معادله حاکم بر حرکت سیستم غیرخطی ژيروسکوپ از رابطه زیر حاصل می شود:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial R}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial R}{\partial \theta} = F, \quad (10)$$

معادله حاکم بر حرکت یک سیستم ژيروسکوپ متقارن با زاویه θ به صورت زیر بیان می شود [۲۱]:

$$\ddot{\theta} + \left(\frac{\beta_\phi}{I_1} \right)^2 \frac{(1 - \cos(\theta))^2}{\sin^3(\theta)} - \frac{M_g \bar{l}}{I_1} \sin(\theta) + \frac{D_1}{I_1} \dot{\theta} + \frac{D_2}{I_1} \dot{\theta}^3 = \frac{M_g \bar{l}}{I_1} \sin(\omega t) \sin(\theta) \quad (11)$$

بگذارید:

$$\alpha := \frac{\beta_\phi}{I_1} = \frac{I_3 \omega_z}{I_1}, \quad c_1 := \frac{D_1}{I_1} \quad c_2 := \frac{D_2}{I_2}$$

$$\beta := \frac{M_g \bar{l}}{I_1}, \quad f := \frac{M_g \bar{l}}{I_1}.$$

- بهبود عملکرد سیستم کنترل و تقاوم در برابر تغییرات پارامترها و نامعینی های دینامیکی سیستم با بهره گیری از شبکه عصبی برای تخمین دینامیک پیچیده سیستم غیرخطی ژيروسکوپ؛

- تقلیل اثرات مخرب نویز و اغتشاش های خارجی غیر قابل پیش بینی وارد بر سیستم.

طرح کنترلی پیشنهادی منجر به پایداری سیستم غیرخطی ژيروسکوپ می شود و با جلوگیری از اثرات مخرب اغتشاش های غیرقابل پیش بینی خارجی وارد بر سیستم منجر به بهبود عملکرد سیستم کنترلی خواهد شد. از نظریه ی لیاپانوف^۱ برای اثبات تضمین پایداری سیستم ژيروسکوپ استفاده می شود. در بخش دوم این مقاله، دینامیک غیرخطی سیستم ژيروسکوپ توصیف می گردد و در بخش سوم کنترل کننده مد لغزشی مبتنی بر شبکه عصبی طراحی و پایداری سیستم حلقه-بسته مورد ارزیابی قرار می گیرد. در بخش نتایج شبیه سازی در فصل چهارم بازتاب داده شده است و بخش پنجم به جمع بندی پژوهش حاضر اختصاص یافته است.

۲- دینامیک غیرخطی ژيروسکوپ

معادلات حرکت یک سیستم غیرخطی ژيروسکوپ متقارن^۲ تعبیه شده بر روی یک پایه مرتعش، با استفاده از زوایای اوپلر^۳ خمش (θ)، غلتش (ϕ) و گردش (ψ) توصیف می شود. با استفاده از روش اوپلر-لاگرانژ خواهیم داشت [۴]:

$$L = \frac{1}{2} I_1 (\dot{\theta}^2 + \dot{\phi}^2 \sin^2(\theta)) + \frac{1}{2} I_3 (\dot{\phi} \cos(\theta) + \dot{\psi})^2 - M_g(l + \bar{l} \sin(\omega t) \cos(\theta)) \quad (1)$$

که در رابطه فوق I_1 و I_3 به ترتیب ممان های اینرسی قطبی^۴ و استوایی^۴ ژيروسکوپ متقارن، M_g نیروی گرانش زمین^۵، $\bar{l}$ آ دامنه اغتشاش خارجی، ω فرکانس اغتشاش خارجی می باشند. با مشتق گیری از رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$P_\phi = \frac{\partial L}{\partial \phi} = I_1 \dot{\phi} \sin^2(\theta) + I_3 (\dot{\phi} \cos(\theta) + \dot{\psi}) \cos(\theta), \quad (2)$$

¹ Lyapunov Theory

² Symmetric

³ Polar

⁴ Equatorial

⁵ Gravity Force

پس داریم:

$$\ddot{\theta} + \alpha^2 \frac{(1 - \cos(\theta))^2}{\sin^3(\theta)} - \beta \sin(\theta) + c_1 \dot{\theta} + c_2 \dot{\theta}^3 = f \sin(\omega t) \sin(\theta). \quad (12)$$

در رابطه فوق $c_1 \dot{\theta}$ و $c_2 \dot{\theta}^3$ به ترتیب میرایی^۱ خطی و غیرخطی می‌باشند و $f \sin \omega t$ پارامتر برآشفتهگی^۲ می‌باشد.

عبارت $\alpha^2 \frac{(1 - \cos(\theta))^2}{\sin^3(\theta)} - \beta \sin(\theta)$ نیروی تاب‌آوری^۳ غیرخطی می‌نامند. برای دستیابی به معادلات فضای حالت سیستم ژيروسکوپ، متغیرهای حالت سیستم را به صورت $x_1 = \theta$ و $\dot{\theta} = x_2$ در نظر می‌گیریم و بردار حالت‌های سیستم ژيروسکوپ $x := [x_1, x_2]^T$ تعریف می‌شود:

$$g(x) = -\alpha^2 \frac{(1 - \cos(x))^2}{\sin^3(x)}, \quad (13)$$

$$L(x) = \beta \sin(x) + f \sin(\omega t) \sin(x). \quad (14)$$

دو سیستم ژيروسکوپ غیرخطی را در نظر گرفته می‌شود که سیستم پایه و سیستم پیرو با x و y نشان داده می‌شود. معادلات فضای حالت نرمالیزه شده سیستم ژيروسکوپ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g(x_1) - c_1 x_2 - c_2 x_2^3 + L(x_1) \end{cases} \quad (15)$$

رابطه (۱۵) فضای حالت سیستم پایه^۴ می‌باشد. با جایگذاری حالت‌های سیستم پیرو در روابط (۱۳) و (۱۴) خواهیم داشت:

$$g(y_1) = -\alpha^2 \frac{(1 - \cos(y_1))^2}{\sin^3(y_1)}, \quad (16)$$

$$L(y_1) = \beta \sin(y_1) + f \sin(\omega t) \sin(y_1), \quad (17)$$

$$\mu(t) = \rho(t) \sin(\omega t). \quad (18)$$

برای توصیف سیستم غیرخطی ژيروسکوپ در فضای واقعی فرض می‌شود که پاسخ ژيروسکوپ شامل اغتشاش خارجی $\rho(t) \in R$ باشد. اغتشاش‌های خارجی به صورت زیر مد می‌شود:

$$|\rho(t)| \leq \sigma, \quad t \in R^+ \quad (19)$$

در رابطه (۱۸) μ از مجموع ترم‌های اغتشاش خارجی ρ و سیگنال کنترلی u حاصل می‌شود. رابطه فضای حالت

سیستم ژيروسکوپ آشفته کنترل شده پیرو را نشان می‌دهد که y_1 و y_2 متغیرهای فضای حالت سیستم می‌باشند:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = g(y_1) - c_1 y_2 - c_2 y_2^3 + L(y_1) + \mu(t) \end{cases} \quad (20)$$

سیگنال کنترلی $u(t) = [u_1(t), u_2(t)]^T$ برای همگام‌سازی به سیستم پیرو افزوده شده است که توسط کنترل کننده مد لغزشی مبتنی بر شبکه عصبی برای کنترل سیستم ژيروسکوپ تعیین می‌شوند. خطای متغیرهای حالت همگام‌سازی بین سیستم‌های (۱۵) و (۲۰) از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$e_k(t) = y_k(t) - x_k(t), \quad k = 1, 2. \quad (21)$$

دینامیک خطای سیستم به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = -c_1 e_2 + \alpha^2 g(x_1, y_1) + \gamma + \epsilon(t). \end{cases} \quad (22)$$

پارامتر γ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma = -c_1 y_2 - c_2 x_2^3 + (\beta + f \sin(\omega t))(\sin(y_1) - \sin(x_1)). \quad (23)$$

پارامتر $g(x_1, y_1)$ نیز برابر خواهد بود با:

$$g(x_1, y_1) = \frac{(1 - \cos x_1)^2}{\sin^3 x_1} - \frac{(1 - \cos y_1)^2}{\sin^3 y_1}. \quad (24)$$

هدف این مقاله طراحی سیگنال کنترلی مناسب ورودی برای پایداری سازی مجانبی سیستم حلقه بسته است؛ به عبارتی دیگر، خطاهای تعقیب $e_k(t)$ می‌بایست به صفر میل کند آنگاه متغیرهای حالت سیستم پیرو (۲۰) به متغیرهای حالت سیستم پیرو (۱۵) همگرا می‌شود و خواهیم داشت:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y_k(t) - x_k(t)) \rightarrow 0, \quad k = 1, 2. \quad (25)$$

۳- طراحی کنترل کننده

سیستم غیرخطی پیوسته با زمان به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (26)$$

در رابطه (۲۶) $x \in R^n$ و $f(x) \in R^n$ و $g(x) \in R^{n \times m}$ می‌باشد.

سیستم غیرخطی ژيروسکوپ که یک سیستم مرتبه دوم می‌باشد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}) + g(x, \dot{x})u. \quad (27)$$

¹ Damping

² Parametric Excitation

³ Nonlinear Resilience Force

⁴ Master

با استدلال مشابه برای تخمین تابع $g(x, \dot{x})$ خواهیم داشت:

$$\hat{g} = \theta_g^T \zeta_g, \quad (31)$$

$\hat{g}$ تخمین تابع $g(x, \dot{x})$ می باشد. $\hat{g}$ از بردار مجهولات θ_g^T و معلومات ζ_g تشکیل می شود.

$$\zeta_g = f_1(W_1^T X_{NN}) \quad (32)$$

با استفاده از سری تیلور، برای تخمین تابع $g(x, \dot{x})$ از رابطه زیر حاصل می شود:

$$\hat{g} = W_1^T \frac{\partial O_2}{\partial W_1}. \quad (33)$$

برای سیستم ارائه شده در رابطه (۲۰) سطح لغزشی به صورت زیر تعریف می شود:

$$s := \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) e. \quad (34)$$

در روابط (۳۴)، λ پارامتر طراحی کنترل کننده مد لغزشی می باشد که مقدار آن مثبت می باشد. با توجه به سیستم ژيروسکوپ غیرخطی مرتبه دوم خواهیم داشت:

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) e = \dot{e} + \lambda e. \quad (35)$$

فرض کنید مشتق سطح لغزش (۳۵) رابطه ی زیر را برآورده سازد:

$$\dot{s} = -\rho \text{sign}(s) \rightarrow s\dot{s} = -\rho s \text{sign}(s). \quad (36)$$

در رابطه (۳۶) ρ ثابت مثبت می باشد و تابع $\text{sign}(s)$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} +1 & \text{if } s > 0 \\ -1 & \text{if } s \leq 0 \end{cases} \quad (37)$$

سیگنال کنترلی کنترل کننده مد لغزشی مبتنی بر شبکه عصبی دارای دو فاز رشح و لغزش می باشد. ساختار سیگنال کنترلی کنترل کننده مذکور به صورت زیر می باشد:

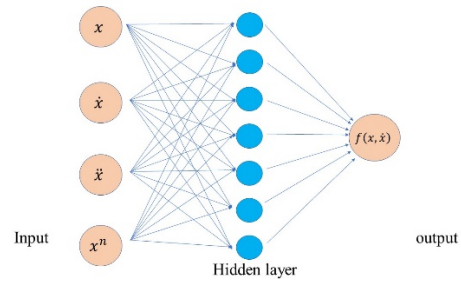
$$u := u_{eq} + u_{reach}, \quad (38)$$

جایی که:

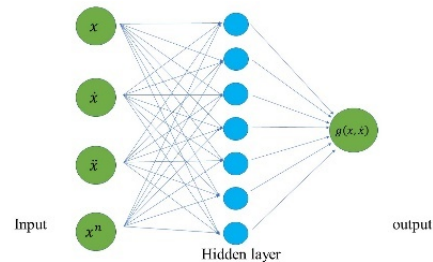
$$u_{eq} := \frac{1}{\hat{g}} [-\hat{f} + y_d^n - k_{n-1}e^{(n-1)} - k_{n-2}e^{(n-2)} + \dots + k_1\dot{e}], \quad (39)$$

$$u_{reach} := -\frac{\rho}{\hat{g}} \text{sign}(s). \quad (40)$$

با مشتق گیری از سطح لغزش خواهیم داشت:



شکل ۱: بلوک دیاگرام تخمین تابع $f(x, \dot{x})$ با شبکه عصبی



شکل ۲: بلوک دیاگرام تخمین تابع $g(x, \dot{x})$ با شبکه عصبی

در این طرح کنترلی از قابلیت یادگیری شبکه عصبی برای تخمین^۱ توابع $f(x, \dot{x})$ و $g(x, \dot{x})$ استفاده می شود. با به کارگیری دو شبکه عصبی مصنوعی، توابع $f(x, \dot{x})$ ، $g(x, \dot{x})$ ، نمایش داده شده به ترتیب در شکل های ۱ و ۲، سیستم ژيروسکوپ تخمین زده می شود. در شبکه عصبی مذکور وزن های شبکه عصبی به قسمی تعیین می شوند که سیستم ژيروسکوپ پایدار باشد. برای تخمین تابع $f(x, \dot{x})$ از یک شبکه عصبی پیش خور^۲ استفاده می شود که خواهیم داشت:

$$\hat{f} = \theta_f^T \zeta_f. \quad (28)$$

تخمین تابع $f(x, \dot{x})$ با $\hat{f}$ نشان داده شده است و از بردار مجهولات θ_f^T و معلومات ζ_f تشکیل می شود. با فرض معلوم بودن وزن لایه اول با W_1 نشان داده می شود، ورودی های شبکه عصبی می باشند خواهیم داشت:

$$\zeta_f = f_1(W_1^T X_{NN}). \quad (29)$$

برای تخمین تابع $f(x, \dot{x})$ از سری تیلور استفاده می شود:

$$\hat{f} = W_1^T \frac{\partial O_2}{\partial W_1}. \quad (30)$$

در رابطه (۳۰) خروجی لایه دوم O_2 می باشد

^۱ Approximation

^۲ Feed Forward

$$\dot{v} = s\dot{s} - \frac{1}{\gamma}\bar{\theta}_f^T \dot{\hat{\theta}}_f - \frac{1}{\gamma}\bar{\theta}_g^T \dot{\hat{\theta}}_g. \quad (53)$$

با جایگذاری رابطه (51) در رابطه (53) خواهیم داشت:

$$\dot{v} = s \left(2\epsilon + \bar{\theta}_f^T \zeta_f + \bar{\theta}_g^T \zeta_g u - \rho \operatorname{sign}(s) \right) - \frac{1}{\gamma}\bar{\theta}_f^T \dot{\hat{\theta}}_f - \frac{1}{\gamma}\bar{\theta}_g^T \dot{\hat{\theta}}_g \quad (54)$$

با ساده سازی رابطه (54) خواهیم داشت:

$$\dot{v} = 2\epsilon s - s \rho \operatorname{sign}(s) + \bar{\theta}_f^T \left(s \zeta_f - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{\theta}}_f \right) + \bar{\theta}_g^T \left(s u - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{\theta}}_g \right). \quad (55)$$

با در نظر گرفتن $s \times \operatorname{sign}(s) = |s|$ خواهیم داشت:

$$\dot{v} \leq 2\epsilon |s| - \rho |s| + \bar{\theta}_f^T \left(s \zeta_f - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{\theta}}_f \right) + \bar{\theta}_g^T \left(s u - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{\theta}}_g \right). \quad (56)$$

طبق قانون تطبیق قوانین به روزرسانی وزن های شبکه عصبی به صورت زیر تعریف می شوند:

$$s \zeta_f - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{\theta}}_f = 0 \rightarrow \dot{\hat{\theta}}_f = \gamma s \zeta_f; \quad (57)$$

$$s u - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{\theta}}_g = 0 \rightarrow \dot{\hat{\theta}}_g = \gamma s u \zeta_g. \quad (58)$$

با جایگذاری (57) و (58) در (56)، خواهیم داشت:

$$\dot{v} \leq 2\epsilon |s| - \rho |s|. \quad (59)$$

در صورتی که $\rho > 2\epsilon$ باشد. با توجه به شرایط مذکور وزن های شبکه عصبی مصنوعی به قسمی تنظیم می شوند که مشتق تابع لیاپانوف منفی و پایداری سیستم حلقه بسته با کنترل پیشنهادی در (38) تضمین می شود.

۴- نتایج

برای بررسی رفتار دینامیکی سیستم ژيروسکوپ و اثبات عملکرد مناسب کنترل کننده مد لغزشی مبتنی بر شبکه عصبی در کنترل سیستم غیرخطی ژيروسکوپ، مدل سیستم را در سیمولینک متلب شبیه سازی کرده و با کنترل کننده پیشنهادی، سیستم ژيروسکوپ کنترل می شود. در شکل ۳ رفتار آشوبناک

$$\dot{s} = f + g(u) - y_d^n + k_{n-1}e^{n-1} + k_{n-2}e^{n-2} + \dots + k_1\dot{e}. \quad (41)$$

با جمع و تفریق عبارت $\hat{g}(u)$ نتیجه می دهد:

$$\dot{s} = f + g(u) + \hat{g}(u) - \hat{g}(u) - y_d^n + k_{n-1}e^{n-1} + k_{n-2}e^{n-2} + \dots + k_1\dot{e}. \quad (42)$$

با جایگذاری قانون کنترلی و ساده سازی نتیجه می شود:

$$\dot{s} = f - \hat{f} + (g - \hat{g})u - \rho \operatorname{sign}(s) \quad (43)$$

$\bar{\theta}_f$ خطای تخمین تابع $f(x, \dot{x})$ و $\bar{\theta}_g$ خطای تخمین تابع $g(x, \dot{x})$ می باشد فرض می کنیم یک شبکه عصبی لیدنل با خروجی شبکه عصبی بهینه و خطای تخمین کمینه $\bar{\theta}_f$ و $\bar{\theta}_g$ وجود دارد آنگاه روابط زیر برقرار خواهد بود:

$$f - \hat{f} < \epsilon, \quad (44)$$

$$g - \hat{g} < \epsilon, \quad (45)$$

$$f^* = \theta_f^{*T} \zeta_f, \quad (46)$$

$$g^* = \theta_g^{*T} \zeta_g, \quad (47)$$

که در روابط بالا f^* و g^* خروجی شبکه عصبی بهینه می باشند. ϵ مقدار ثابت بسیار کوچک می باشد. با جمع و تفریق عبارت f^* و g^*u خواهیم داشت:

$$\dot{s} = f - f^* + f - \hat{f} + g^*u - g^*u + (g - \hat{g})u - \rho \operatorname{sign}(s) \quad (48)$$

با ساده سازی عبارت فوق نتیجه می شود:

$$\dot{s} = (f - f^*) + (f - \hat{f}) + (g - g^*)u + (g^* - \hat{g})u - \rho \operatorname{sign}(s). \quad (49)$$

داریم:

$$\dot{s} = 2\epsilon + (\theta_f^* - \theta_f)^T \zeta_f + (\theta_g^* - \theta_g)^T \zeta_g u - \rho \operatorname{sign}(s). \quad (50)$$

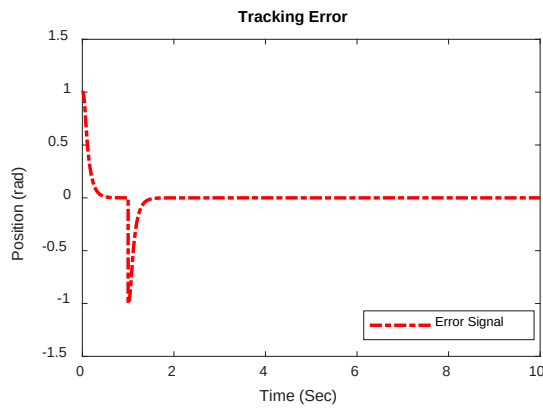
تفاضل مقادیر θ_f و θ_f^* با $\bar{\theta}_f$ و تفاضل مقادیر θ_g و θ_g^* با $\bar{\theta}_g$ نمایش داده می شود. مشتق سطح لغزش با رابطه زیر توصیف می شود:

$$\dot{s} = 2\epsilon + \bar{\theta}_f^T \zeta_f + \bar{\theta}_g^T \zeta_g u - \rho \operatorname{sign}(s). \quad (51)$$

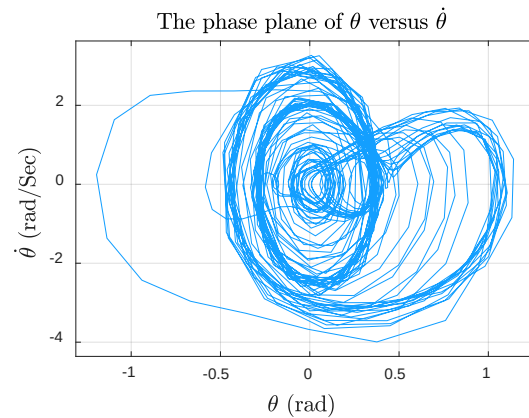
برای اثبات پایداری، تابع لیاپانوف را به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$v = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2\gamma}\bar{\theta}_f^T \bar{\theta}_f + \frac{1}{2\gamma}\bar{\theta}_g^T \bar{\theta}_g \quad (52)$$

تابع لیاپانوف در رابطه (52) مثبت معین می باشد. از رابطه (52) نسبت به زمان مشتق می گیریم:



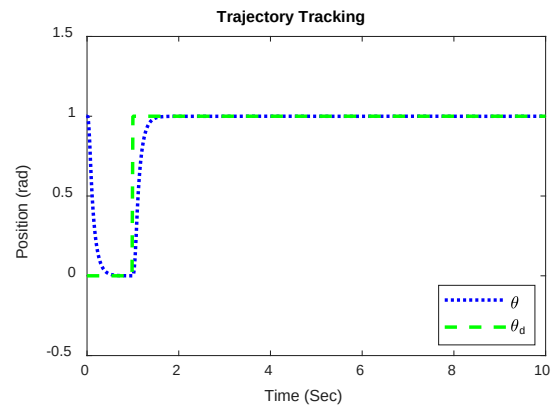
شکل ۵: نمودار خطای ردیابی در سیستم ژيروسکوپ



شکل ۳: نمودار صفحه فاز در ژيروسکوپ آشوبناک

در گام بعد برای بررسی مقاوم بودن طرح کنترلی پیشنهادی و بررسی تأثیرات نویز و اغتشاش بر روی سیستم کنترلی، سیگنال‌های نویز و اغتشاشات وارد بر سیستم غیرخطی ژيروسکوپ، به مدل سیستم اعمال می‌شود. در شکل ۷ و ۸ سیگنال اغتشاش و نویز اعمال شده به مدل سیستم ترسیم می‌شود. با اعمال سیگنال‌های مخرب نویز و اغتشاشات به مدل سیستم ژيروسکوپ، در شکل ۹ نمودار ردیابی مسیر با سیگنال مرجع ورودی پله واحد برای بررسی مقاوم بودن کنترل کننده مد لغزشی مبتنی بر شبکه عصبی ترسیم شده است. در شکل ۱۰ کنترل کننده مد لغزشی مبتنی بر شبکه عصبی با کنترل کننده‌های PID، PD، و PID مبتنی بر شبکه عصبی مقایسه می‌شود. کنترل کننده‌ای که از سرعت و دقت بیشتری برخوردار باشد و دارای خطای ردیابی مسیر کمتری باشد برای کنترل سیستم غیرخطی ژيروسکوپ مناسب‌تر خواهد بود. در شکل ۱۱ و ۱۲ مشخصات تحلیلی خطا، زمان صعود، زمان نشست، میزان حداکثر فراجش برای کنترل کننده‌های مختلف در ردیابی مسیر سیگنال ورودی مرجع برای سیستم ژيروسکوپ ترسیم شده است.

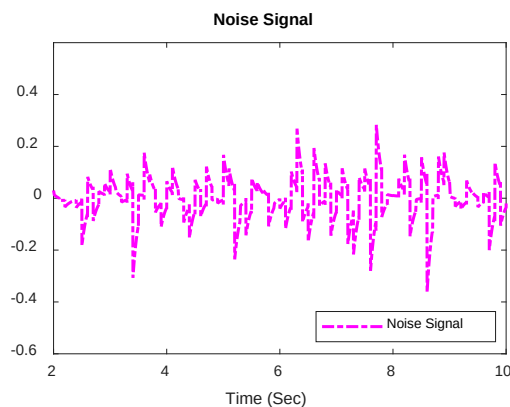
کنترل کننده مد لغزشی مبتنی بر شبکه عصبی دارای عملکرد مناسب‌تری در کنترل سیستم غیرخطی ژيروسکوپ نسبت به سایر کنترل کننده‌های مذکور می‌باشد. پاسخ ردیابی مسیر در کنترل کننده مد لغزشی مبتنی بر شبکه عصبی دارای دو مزیت می‌باشد. مزیت اول مقدار کمینه خطای حالت ماندگار سیستم و مزیت دوم پاسخ بدون نوسان می‌باشد.



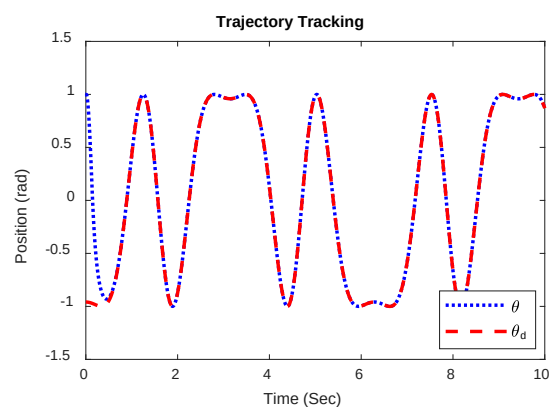
شکل ۴: نمودار ردیابی مسیر سیگنال مرجع ورودی با پله واحد

سیستم ژيروسکوپ با اعمال ورودی پله با دامنه یک ولت به سیستم غیرخطی ژيروسکوپ، به ازای مقادیر $\beta = 1$ ، $c_1 = 0.5$ ، $c_2 = 0.05$ ، $f = 35.5$ ، $\alpha^2 = 100$ و $\omega = 2$ با شرایط اولیه $(x_1, x_2) = (1, -1)$ ترسیم شده است. در شکل ۴ با اعمال ورودی پله واحد به مدل سیستم غیرخطی ژيروسکوپ، خروجی فرایند، سیگنال مرجع مطلوب را با زمان صعود کم، سرعت و دقت بالا ردیابی می‌کند. در شکل ۵ خطای ردیابی در سیستم ژيروسکوپ کنترل شده با کنترل کننده مد لغزشی مبتنی بر شبکه عصبی ترسیم شده است که خطای حالت ماندگار سیستم به صفر میل می‌کند و از دقت همگرایی بالایی برخوردار می‌باشد. در شکل ۶ نمودار ردیابی مسیر در سیستم غیرخطی ژيروسکوپ با کنترل کننده پیشنهادی به ازای سیگنال مرجع زیر ترسیم شده است:

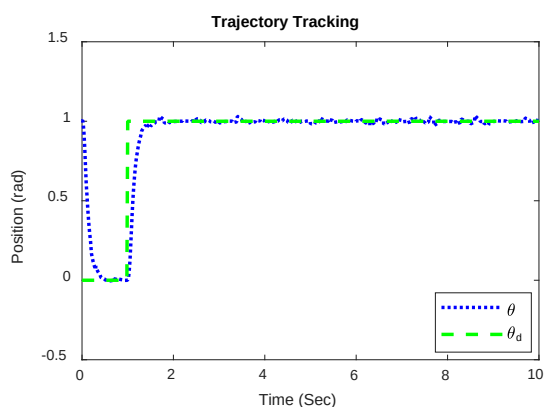
$$\theta_d = \sin(5\cos(t)) \quad (60)$$



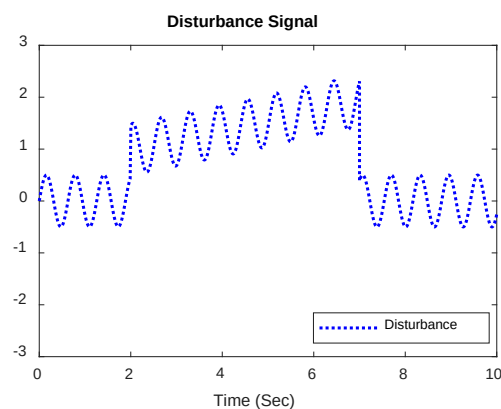
شکل ۸: سیگنال نویز بر حسب زمان



شکل ۶: نمودارهای ردیابی مسیر با سیگنال مرجع غیر خطی



شکل ۹: نمودار تأثیرات نویز و اغتشاش بر ردیابی مسیر سیگنال مرجع

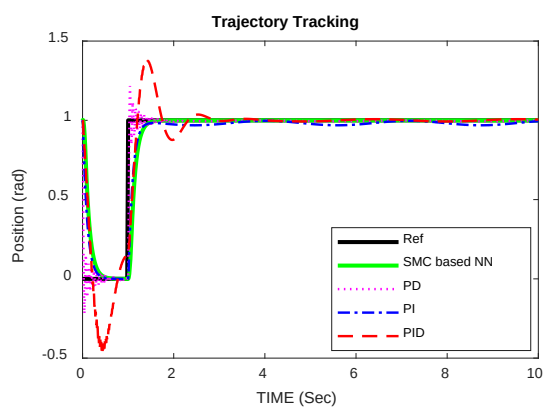


شکل ۷: سیگنال اغتشاش وارد بر سیستم بر حسب زمان

۵- نتیجه گیری

اکثر سیستم‌ها در دنیای واقعی، دارای دینامیک غیرخطی می‌باشند و جلوگیری از اثرات مخرب نویز و اغتشاش‌های خارجی غیرقابل پیش‌بینی اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. نامعینی‌های غیرخطی دینامیک ژيروسکوپ و اغتشاش‌های خارجی غیرقابل پیش‌بینی، چالش بزرگ در طراحی کنترل‌کننده می‌باشند. شبکه‌های عصبی ابزار دقیق برای تخمین دینامیک غیرخطی با پارامترهای نامعین و توابع غیرخطی پیچیده می‌باشند.

هدف اصلی از کنترل ژيروسکوپ، دستیابی به عملکرد مناسب سیستم در حضور نامعینی‌ها، نویز، اغتشاشات خارجی وارد بر سیستم می‌باشد. در این مقاله با استفاده از کنترل‌کننده مد لغزشی مبتنی بر شبکه عصبی، یک کنترل‌کننده بهینه برای کنترل سیستم غیرخطی ژيروسکوپ طراحی می‌شود. طرح

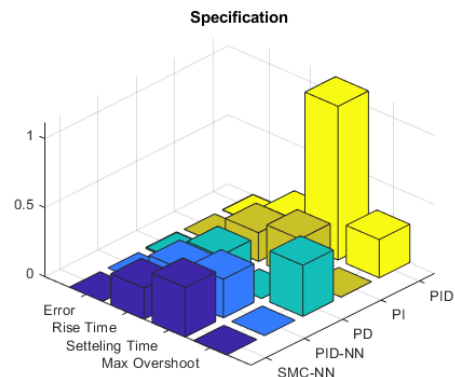


شکل ۱۰: نمودار ردیابی مسیر در کنترل‌کننده‌های مختلف

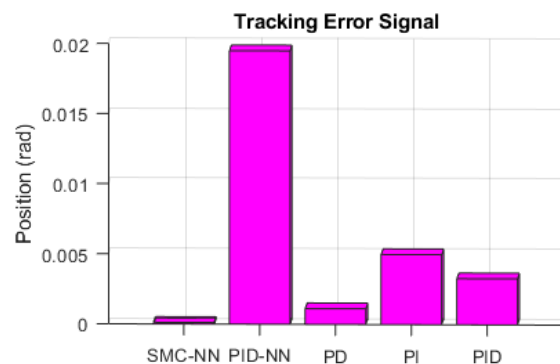
کنترلی پیشنهادی نه تنها منجر به پایداری سیستم غیرخطی ژيروسکوپ شد، بلکه بدون استفاده از دینامیک سیستم عملکرد مطلوبی در حضور اغتشاشات خارجی و نویز ارائه نمود.

control," *Physics Letters A*, vol. 343, no. 1, pp. 153-158, 2005.

- [4] Z. M. Ge, H. K. Chen, and H. H. Chen, "The regular and chaotic motions of a symmetric heavy gyroscope with harmonic excitation," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 198, no. 2, pp. 131-147, 1996.
- [5] X. Tong and N. Mrad, "Chaotic motion of a symmetric gyro subjected to a harmonic base excitation," *J. Appl. Mech.*, vol. 68, no. 4, pp. 681-684, 2001.
- [6] L. Xue, C. Jiang, L. Wang, J. Liu, and W. Yuan, "Noise reduction of MEMS gyroscope based on direct modeling for an angular rate signal," *Micromachines*, vol. 6, no. 2, pp. 266-280, 2015.
- [7] J. Sun, S. Fan, H. Shi, W. Xing, C. Zhao, and C. Li, "Design and optimization of a resonant output frequency gyroscope for robust sensitivity and bandwidth performance," *Microsystem Technologies*, vol. 22, no. 10, pp. 2565-2586, 2016.
- [8] Z. Isakov and K. Bissembayev, "The nonlinear vibrations of a vertical hard gyroscopic rotor with nonlinear characteristics," *Mechanical Sciences*, vol. 10, no. 2, pp. 529-544, 2019.
- [9] C. H. Miwadinou, A. V. Monwanou, L. A. Hinvi, A. A. Koukpedjji, C. Ainamon, and J. B. C. Orou, "Melnikov Chaos in a Modified Rayleigh–Duffing Oscillator with ϕ_6 Potential," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 26, no. 05, p. 1650085, 2016.
- [10] J. J. Yan, M.-L. Hung, and T. L. Liao, "Adaptive sliding mode control for synchronization of chaotic gyros with fully unknown parameters," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 298, pp. 298-306, 2006.
- [11] M. Roopaei, M. Z. Jahromi, R. John, and T.-C. Lin, "Unknown nonlinear chaotic gyros synchronization using adaptive fuzzy sliding mode control with unknown dead-zone input," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 15, no. 9, pp. 2536-2545, 2010.
- [12] J. Montoya-Cháirez, V. Santibáñez, and J. Moreno-Valenzuela, "Adaptive control schemes applied to a control moment gyroscope of 2



شکل ۱۱: معیارهای کارایی با کنترل کننده های مختلف



شکل ۱۲: نمودار مقایسه ای خطا در ردیابی سیستم ژيروسکوپ

تعارض منافع

"هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

مراجع

- [1] M. N. Armenise, C. Ciminelli, F. Dell'Olio, and V. M. N. Passaro, *Advances in gyroscope technologies*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [2] V. M. N. Passaro, A. Cuccovillo, L. Vaiani, M. De Carlo, and C. E. Campanella, "Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective," *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2284, 2017.
- [3] Y. Lei, W. Xu, and H. Zheng, "Synchronization of two chaotic nonlinear gyros using active



COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

- degrees of freedom," *Mechatronics*, vol. 57, pp. 73-85, 2019.
- [13] V. Nekoukar and A. Erfanian, "Adaptive fuzzy terminal sliding mode control for a class of MIMO uncertain nonlinear systems," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 179, no. 1, pp. 34-49, 2011.
- [14] C. Wang, "Fractional-order sliding mode synchronization for fractional-order chaotic systems," *Advances in Mathematical Physics*, vol. 2018, p. 3545083, 2018.
- [15] B. Naderi, H. Kheiri, and A. Heydari, "Anti-synchronization of complex chaotic t-system via optimal adaptive sliding-mode and its application in secure communication," *International Journal of Industrial Mathematics*, vol. 10, no. 2, pp. 181-192, 2018.
- [16] H. Delavari, "A novel fractional adaptive active sliding mode controller for synchronization of non-identical chaotic systems with disturbance and uncertainty," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 5, no. 1, pp. 102-114, 2017.
- [17] K. Rabah and S. Ladaci, "A fractional adaptive sliding mode control configuration for synchronizing disturbed fractional-order chaotic systems," *Circuits, Systems, and Signal Processing*, vol. 39, no. 3, pp. 1244-1264, 2020.
- [18] B. Bourouba and S. Ladaci, "Robust fuzzy adaptive sliding mode stabilization for fractional-order chaos," *Algorithms*, vol. 11, no. 7.
- [19] S. B. Fazeli Asl and S. S. Moosapour, "Fractional order fuzzy dynamic backstepping sliding mode controller design for triaxial MEMS gyroscope based on high-gain and disturbance observers," *IETE Journal of Research*, vol. 67, no. 6, pp. 799-816, 2021.
- [20] S. Ding, H. Li, C. Su, J. Yu, and F. Jin, "Evolutionary artificial neural networks: a review," *Artificial Intelligence Review*, vol. 39, no. 3, pp. 251-260, 2013.
- [21] H. K. Chen, "Chaos and chaos synchronization of a symmetric gyro with linear-plus-cubic damping," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 255, no. 4, pp. 719-740, 2002.