

کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش برای کنترل سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیک

محمدرضا سلطانیپور

پژوهشگران از روش‌های کنترل فیدبکی برای کنترل ژيروسکوپ‌های ارتعاشی میکروالکترومکانیکی استفاده کرده‌اند [۵] تا [۹]. در [۵] نویسندگان یک کنترل‌کننده دفع اغتشاش فعال برای کنترل ژيروسکوپ ارتعاشی طراحی نموده‌اند. در [۶] برای غلبه بر چالش‌های موجود، کنترل‌کننده تطبیقی^۳ ارائه گردیده است. در ادامه با ترکیب کنترل تطبیقی و جبران‌ساز فازی^۴، یک کنترل‌کننده تطبیقی مقاوم^۵ برای ارتقای عملکرد ژيروسکوپ‌های ارتعاشی میکروالکترومکانیکی طراحی شده است [۷]. همچنین پژوهشگران برای غلبه بر عدم قطعیت‌های^۶ پارامتری موجود در معادلات دینامیکی ژيروسکوپ‌ها از کنترل‌کننده‌های تطبیقی دیگری نیز استفاده نموده‌اند [۸] و [۹]. راهکارهای پیشنهادی، دارای مزایایی هستند که در زیر به آنها اشاره می‌شود:

- در کنترل‌کننده‌های پیشنهادی، فرایند تشخیص سرعت زاویه‌ای به خوبی انجام شده است و دقت اندازه‌گیری آن در محدوده قابل قبولی قرار دارد.
- کنترل‌کننده‌های پیشنهادی، فرایند تحریک سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی را در حضور عدم قطعیت‌های پارامتری و با دقت نسبتاً خوبی انجام می‌دهند.
- اگرچه راهکارهای ارائه‌شده، باعث ارتقای دقت و عملکرد این دسته از ژيروسکوپ‌ها گردیده‌اند اما راهکارهای پیشنهادی بدون نقص نبوده و مشکلات آنها به قرار زیر است:
- کنترل‌کننده‌های پیشنهادی، فرایند تشخیص سرعت زاویه‌ای را در زمان طولانی انجام می‌دهند. بنابراین استفاده از راهکارهای پیشنهادی به همراه سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی برای تشخیص سرعت زاویه‌ای سیستم‌های دینامیکی که دارای پاسخ زمانی سریعی هستند، به عملکردی مطلوب منجر نخواهد شد.
- راهکارهای پیشنهادی در غلبه بر عدم قطعیت‌های ساختاری^۷ موجود در معادلات دینامیکی سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی توانمند هستند اما در صورت بروز اغتشاش خارجی یا دینامیک مدل‌نشده، پایداری سیستم حلقه بسته را نمی‌توانند تضمین نمایند.
- در ساختار کنترل‌کننده‌های پیشنهادی برای تخمین‌زدن هر کدام از پارامترهای سیستم ژيروسکوپ از یک قانون تطبیقی^۸ استفاده می‌شود. بنابراین در راهکارهای پیشنهادی به تعداد پارامترهای سیستم ژيروسکوپ، قوانین تطبیقی وجود دارد که باید در فرایند کنترل به طور هم‌زمان محاسبات مربوط به تخمین پارامترها را

چکیده: در این مقاله، یک کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش برای فرایند تشخیص و کنترل فرایند تحریک سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیک پیشنهاد می‌شود. بدین منظور در ابتدا معادلات دینامیکی سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی بیان می‌گردد. در ادامه معادلات دینامیکی این سیستم به حوزه معادلات حالت و سپس به حوزه خطای ردگیری انتقال داده می‌شود. پس از آن ساختار دینامیکی رؤیتگر اغتشاش زمان محدود ارائه می‌گردد. سپس روش طراحی کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش زمان محدود بیان می‌شود. راهکار پیشنهادی کنترل فرایند تحریک را در حضور عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری موجود در معادلات دینامیکی سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیکی انجام می‌دهد و فرایند تشخیص از طریق تنها یک قانون تطبیقی انجام می‌گردد. اثبات ریاضی نشان می‌دهد که سیستم حلقه بسته با کنترل پیشنهادی و در حضور عدم قطعیت‌های موجود، دارای پایداری مجانبی سراسری زمان محدود است. حضور رؤیتگر اغتشاش در ساختار کنترل پیشنهادی باعث می‌شود تا نقش عدم قطعیت‌های غیر ساختاری در فرایند کنترل سیستم ژيروسکوپ را تضعیف نماید و دامنه ورودی کنترل را نیز کاهش دهد. برای بررسی عملکرد کنترل پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی در ۳ مرحله بر روی سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی الکترومکانیک پیاده‌سازی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی‌ها، عملکرد مطلوب راهکار پیشنهادی را تأیید می‌نمایند.

کلیدواژه: سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی الکترومکانیک، عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری، کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی، رؤیتگر اغتشاش زمان محدود.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیکی^۱ به دلیل سائز کوچک، قیمت و توان مصرفی پایین و حساسیت بالا برای اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای به کار رفته و به همین دلایل کاربردهای فراوانی در سیستم‌های کنترل در حوزه‌های صنعتی، هوافضا، نظامی و غیره دارند [۱] تا [۴]. ضعف‌های تکنولوژیکی که خطاهای پارامتری را به دنبال دارد به همراه بروز اغتشاشات^۲ خارجی، عواملی هستند که باعث تضعیف عملکرد سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی می‌گردند. به همین دلیل پژوهشگران برای بهبود عملکرد سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیکی از روش‌های کنترلی پیشرفته استفاده نموده‌اند. در خلال سال‌های گذشته و با رشد چشم‌گیر تئوری‌های علم کنترل،

این مقاله در تاریخ ۲۶ آذر ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۲۸ تیر ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد.

محمدرضا سلطانیپور (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران، (email: soltanpour@ssau.ac.ir).

1. Microelectromechanical Systems
2. Disturbances

3. Adaptive Control
4. Fuzzy
5. Robust Adaptive Control
6. Uncertainties
7. Structure Uncertainties
8. Adaptive Law

- حضور تابع ناپیوسته در ساختار کنترل مد لغزشی، بروز لرزش^۵ در ورودی کنترل را امری اجتناب‌ناپذیر نموده و این امر عمر محرکه‌های سیستم ژيروسکوپ را کوتاه می‌نماید.
- در روش طراحی کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی برای اجتناب از بروز لرزش در ورودی کنترل و اثبات پایداری سیستم حلقه بسته، از قوانین تطبیقی استفاده می‌گردد. اگرچه راهکار پیشنهادی از بروز لرزش در ورودی کنترل جلوگیری می‌نماید ولی حضور قوانین متعدد تطبیقی، حجم محاسبات ورودی کنترل را افزایش می‌دهد و این امر پیاده‌سازی عملی این روش‌های کنترلی را برای کنترل سیستم ژيروسکوپ با مشکل مواجه می‌کند.
- در طراحی سیستم‌های فازی، محققین باید پایگاه قواعد فازی^۶ مناسبی را ارائه نمایند. از آنجا که سیستم‌های فازی ارائه‌شده، چندورودی-چندخروجی هستند، این امر تعداد قواعد فازی را افزایش می‌دهد و طراحی آن را برای محققین بسیار مشکل می‌نماید.
- اخیراً پژوهشگران برای کنترل سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیکی از ترکیب کنترل مد لغزشی و کنترل تطبیقی نیز استفاده نموده‌اند [۲۳] تا [۲۶]. در این ساختار کنترلی هر کدام از این کنترل‌کننده‌ها وظیفه ویژه‌ای را بر عهده دارند. به صورتی که تخمین پارامترهای سیستم ژيروسکوپ، توسط کنترل تطبیقی انجام می‌شود و غلبه بر عدم قطعیت‌های غیر ساختاری و اغتشاشات خارجی بر عهده کنترل مد لغزشی است. تحلیل‌های ریاضی و نتایج شبیه‌سازی‌ها، عملکرد مطلوب کنترل‌کننده‌های پیشنهادی را نشان می‌دهند. اما در طراحی این دسته از کنترل‌کننده‌ها، مشکلاتی وجود دارد که در زیر به آنها اشاره شده است:
- در راهکارهای پیشنهادی، فرایند تشخیص سرعت زاویه‌ای در زمان طولانی انجام می‌شود.
- در کنترل‌کننده‌های پیشنهادی اگرچه زمان رسیدن متغیرهای حالت به سطح لغزش در زمانی محدود اتفاق می‌افتد، اما کنترل این زمان محدود و کم یا زیاد نمودن آن از طریق ضرایب کنترل‌کننده امکان‌پذیر نیست.
- از آنجا که ضرایب فزیت و ضرایب میرایی در سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی بسیار کوچک هستند، تنظیم قواعد تطبیقی که بتوانند این ضرایب را تخمین بزنند بسیار مشکل است.
- برای طراحی تخمین‌گرهای تطبیقی باید معادلات دینامیکی سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی به صورت معادلات رگرسیون^۷ پیاده‌سازی شود. شود. این امر فرایند طراحی تخمین‌گرهای تطبیقی را پیچیده و بسیار زمان‌بر می‌نماید.
- در ساختار کنترل‌کننده‌های مد لغزشی تطبیقی ارائه‌شده از قوانین تطبیقی متعددی استفاده شده است. این امر حجم محاسبات ورودی کنترل را افزایش داده و پیاده‌سازی این کنترل‌کننده‌ها را با مشکل مواجه می‌سازد.
- در دو سال گذشته پژوهشگران با ترکیب روش‌های کنترل مد لغزشی و شبکه عصبی، راهکاری برای کنترل سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیکی پیشنهاد نموده‌اند [۲۷]. اثبات ریاضی عملکرد مطلوب راهکار پیشنهادی را نشان می‌دهد اما نتایج شبیه‌سازی‌ها، خطای

انجام دهند. بنابراین در صورت بروز تأخیر در محاسبات ورودی کنترل، تضمین پایداری سیستم حلقه بسته امکان‌پذیر نخواهد بود. در ادامه پژوهشگران با ترکیب کنترل تطبیقی و کنترل‌کننده پسگام^۱، راهکارهای دیگری برای کنترل سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی ارائه نمودند [۱۰] و [۱۱]. در راهکارهای پیشنهادی به دلیل استفاده از روش پسگام، فرایند طراحی کنترل‌کننده مرحله به مرحله انجام می‌شود و این امر روش طراحی کنترل‌کننده را ساده‌تر می‌نماید. از طرف دیگر در کنترل‌کننده‌های پیشنهادی از تعداد قوانین تطبیقی نیز کاسته شده است. اما مشکل غلبه بر عدم قطعیت‌های غیر ساختاری^۲ موجود در معادلات دینامیکی سیستم ژيروسکوپ همچنان باقی است.

کنترل مد لغزشی^۳، یکی از تکنیک‌های کنترل ساختار متغیر است که از آن برای کنترل سیستم‌های خطی و غیر خطی دارای عدم قطعیت استفاده می‌شود [۱۲] و [۱۳]. تا کنون محققین از کنترل مد لغزشی برای کنترل سیستم‌های غیر خطی متعددی استفاده نموده‌اند. نتایج ارائه‌شده، موفقیت این روش کنترلی را در غلبه بر عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری موجود در این سیستم‌ها نشان می‌دهند [۱۴] تا [۱۶]. در این تکنیک، کنترل‌کننده با سوئیچ‌نمودن به موقع از ساختاری به ساختاری دیگر، متغیرهای حالت سیستم را وادار می‌نماید که به سمت سطح لغزش که تابعی از متغیرهای حالت یا خطاهای ردگیری سیستم است همگرا شوند. در مراحل طراحی کنترل مد لغزشی، تابع لیاپانوفی ارائه می‌گردد که پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین می‌نماید. در این روش کنترلی، زمانی که متغیرهای حالت سیستم به سطح لغزش می‌رسند، درجه سیستم کاهش می‌یابد و به همین دلیل سیستم حلقه بسته در برابر عدم قطعیت‌های ساختاری، غیر ساختاری و اغتشاشات موجود مقاوم شده و دینامیک سیستم سریع‌تر می‌گردد [۱۷]. از طرف دیگر طراحی کنترل مد لغزشی بسیار ساده است و از حجم محاسباتی پایینی نیز برخوردار است، بنابراین پیاده‌سازی عملی آن به سادگی امکان‌پذیر است. این عوامل باعث گردیده که استفاده از کنترل مد لغزشی در بین محققین از جذابیت بالایی برخوردار باشد [۱۷] تا [۱۹].

تا کنون پژوهشگران از کنترل مد لغزشی برای کنترل سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیکی استفاده نموده‌اند [۱۸] و [۱۹]. در این مقالات، راهکار و چگونگی پیاده‌سازی این روش کنترلی بر روی سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی ارائه شده است. در ادامه محققین برای ارتقای عملکرد کنترل مد لغزشی، آن را با روش‌هایی نظیر کنترل فازی ترکیب کرده‌اند [۲۰] و [۲۱]. حاصل این ترکیب، ارائه کنترل مد لغزشی فازی و کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی^۴ است. در سال‌های اخیر محققین از کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی برای کنترل سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیکی استفاده نموده‌اند [۲۱] و [۲۲]. اگرچه راهکارهای ارائه شده دارای عملکرد مطلوبی هستند، اما با این وجود دارای نقاط ضعفی هم هستند که در زیر به آنها اشاره شده است:

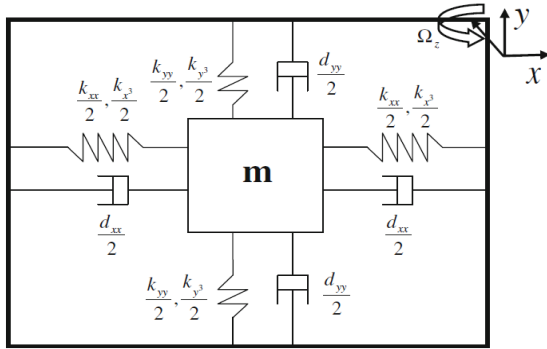
- اگرچه در سیستم‌های غیر خطی، طراحی کنترل مد لغزشی دارای اثبات پایداری بسیار قوی است، اما ترکیب این تکنیک کنترلی با سیستم فازی که منجر به پیدایش کنترل مد لغزشی فازی می‌شود، اثبات پایداری سیستم حلقه بسته را تضعیف می‌نماید.

1. Back-Stepping Control
2. Un-Structure Uncertainties
3. Sliding Mode Control
4. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control

5. Chattering

6. Fuzzy Rule Base

7. Regression Equations



شکل ۱: ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیک محور z دارای فنرهای غیر خطی [۲۵].

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= -\frac{1}{m\omega} (d_{xx} \frac{\dot{x}}{q} + d_{xy} \frac{\dot{y}}{q}) + \frac{\tau}{\omega} \Omega_z^* \frac{\dot{y}}{q} + \frac{\Omega_z^{*\tau}}{m\omega} \frac{x}{q} - \\ &\frac{1}{m\omega^\tau} (k_{xx} \frac{x}{q} + k_{xy} \frac{y}{q}) - \frac{q^\tau k_{x\tau}}{m\omega^\tau} (\frac{x}{q})^\tau + \frac{u_x^*}{m\omega^\tau q} \\ \ddot{y} &= -\frac{1}{m\omega} (d_{xy} \frac{\dot{x}}{q} + d_{yy} \frac{\dot{y}}{q}) - \frac{\tau}{\omega} \Omega_z^* \frac{\dot{x}}{q} + \frac{\Omega_z^{*\tau}}{m\omega} \frac{y}{q} - \\ &\frac{1}{m\omega} (k_{xy} \frac{x}{q} + k_{yy} \frac{y}{q}) - \frac{q^\tau k_{y\tau}}{m\omega^\tau} (\frac{y}{q})^\tau + \frac{u_y^*}{m\omega^\tau q} \end{aligned} \quad (2)$$

با تعریف

$$u_\tau = \frac{u_x^*}{m\omega^\tau q}, \quad u_\tau = \frac{u_y^*}{m\omega^\tau q}$$

$$\frac{x}{q} = x_\tau, \quad \frac{\dot{x}}{q} = \dot{x}_\tau, \quad \frac{y}{q} = x_\tau, \quad \frac{\dot{y}}{q} = \dot{x}_\tau$$

معادلات دینامیکی سیستم ژيروسکوپ به فرم فضای حالت زیر خواهد بود

$$\begin{aligned} \dot{x}_\tau &= x_\tau, \quad \dot{x}_\tau = x_\tau \\ \dot{x}_\tau &= -\frac{1}{m\omega} (d_{xx} x_\tau + d_{xy} x_\tau) + \frac{\tau}{\omega} \Omega_z^* x_\tau + \frac{\Omega_z^{*\tau}}{m\omega} x_\tau - \\ &\frac{1}{m\omega^\tau} (K_{xx} x_\tau + K_{xy} x_\tau) - \frac{q^\tau K_{x\tau}}{m\omega^\tau} (x_\tau)^\tau + u_\tau \\ \dot{x}_\tau &= -\frac{1}{m\omega} (d_{xy} x_\tau + d_{yy} x_\tau) - \frac{\tau}{\omega} \Omega_z^* x_\tau + \frac{\Omega_z^{*\tau}}{m\omega} x_\tau - \\ &\frac{1}{m\omega^\tau} (K_{xy} x_\tau + K_{yy} x_\tau) - \frac{q^\tau K_{y\tau}}{m\omega^\tau} (x_\tau)^\tau + u_\tau \end{aligned} \quad (3)$$

در ادامه تعاریف زیر ارائه می‌شود

$$f_\tau(x_\tau, \dots, x_\tau) = -\frac{1}{m\omega} (d_{xx} x_\tau + d_{xy} x_\tau) + \frac{\Omega_z^{*\tau}}{m\omega} x_\tau -$$

$$\frac{1}{m\omega^\tau} (k_{xx} x_\tau + k_{xy} x_\tau) - \frac{q^\tau k_{x\tau}}{m\omega^\tau} x_\tau^\tau \quad (4)$$

$$f_\tau(x_\tau, \dots, x_\tau) = -\frac{1}{m\omega} (d_{xy} x_\tau + d_{yy} x_\tau) - \frac{\tau}{\omega} \Omega_z^* x_\tau +$$

$$\frac{\Omega_z^{*\tau}}{m\omega} x_\tau - \frac{1}{m\omega^\tau} (k_{xy} x_\tau + k_{yy} x_\tau) - \frac{q^\tau k_{y\tau}}{m\omega^\tau} x_\tau^\tau$$

معادلات (۴) در (۳) جایگذاری می‌گردد

$$\begin{aligned} \dot{x}_\tau &= x_\tau, \quad \dot{x}_\tau = x_\tau \\ \dot{x}_\tau &= f_\tau(x_\tau, \dots, x_\tau) + \frac{\tau}{\omega} \Omega_z^* x_\tau + u_\tau + d_\tau(t) \\ \dot{x}_\tau &= f_\tau(x_\tau, \dots, x_\tau) + u_\tau + d_\tau(t) \end{aligned} \quad (5)$$

تخمین عدم قطعیت‌ها و دامنه‌های ورودی کنترل را بسیار بزرگ نشان می‌دهد و این امر پیاده‌سازی عملی راهکار پیشنهادی را با مشکل مواجه می‌سازد. در مقاله‌ای دیگر محققین با ترکیب روش کنترل مد لغزشی مرتبه کسری و کنترل تطبیقی، راهی را برای کنترل این دسته از ژيروسکوپ‌ها ارائه می‌نمایند [۲۸]. در راهکار پیشنهادی اگرچه مقاومت کنترل‌کننده در برابر اغتشاشات خارجی افزایش یافته است اما تعدد قوانین تطبیقی حجم محاسبات ورودی کنترل را بسیار افزایش داده است. هدف از ارائه این مقاله، پیشنهاد کنترل‌کننده‌ای است که دارای نوآوری‌های زیر است:

- فرایند تشخیص و کنترل فرایند تحریک سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیک به صورت هم‌زمان و در حضور عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری انجام می‌شود.
- با استفاده از یک رویتگر زمان محدود، تخمین دقیقی از اغتشاشات خارجی وارد بر سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی به دست می‌آید تا به راحتی از طریق ورودی کنترل بتوان بر آن غلبه نمود.
- اثبات پایداری سیستم حلقه بسته در حضور رویتگر اغتشاشات خارجی انجام می‌شود و دارای پایداری مجانبی سراسری زمان محدود است.
- کنترل پیشنهادی از حجم محاسبات پایینی برخوردار است.
- ورودی کنترل نرم، بدون لرزش و دارای ماکزیمم دامنه قابل قبولی است. در این صورت کنترل پیشنهادی را به راحتی می‌توان پیاده‌سازی عملی نمود.

۲- دینامیک ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیک

در این بخش از مقاله، معادلات دینامیکی ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیک محور z بیان می‌شود. برای به دست آوردن معادلات دینامیکی فرضیات زیر باید برقرار باشند [۲۴] تا [۲۶]:

- فرض می‌گردد که ژيروسکوپ دارای حرکتی با سرعت خطی ثابت است.
 - سرعت زاویه‌ای ژيروسکوپ نیز مقداری ثابت است.
 - حرکت دورانی ژيروسکوپ حول محور z اتفاق می‌افتد.
- در شکل ۱، یک ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیک محور z نشان داده شده است. معادلات دینامیکی غیر خطی این سیستم ژيروسکوپ به صورت زیر است [۲۵]

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + d_{xx}\dot{x} + (d_{xy} - \tau m \Omega_z^*)\dot{y} + \\ (k_{xx} - m \Omega_z^{*\tau})x + k_{xy}y + k_{x\tau}x^\tau = u_x^* \\ m\ddot{y} + d_{yy}\dot{y} + (d_{xy} + \tau m \Omega_z^*)\dot{x} + \\ (k_{yy} - m \Omega_z^{*\tau})y + k_{xy}x + k_{y\tau}y^\tau = u_y^* \end{aligned} \quad (1)$$

که x و y مختصات جرم نسبت به دستگاه قاب، m جرم متمرکز و پارامترهای $k_{xy}, k_{yx}, k_{xx}, k_{yy}, k_{x\tau}, k_{y\tau}$ ضرایب ماتریس فنریت هستند. پارامترهای $d_{xy}, d_{yx}, d_{xx}, d_{yy}$ ضرایب میرایی، و u_x^*, u_y^* نیروهای تحریک الکترواستاتیکی و Ω_z^* سرعت زاویه‌ای ورودی است.

با استفاده از زمان بی‌بعد $\tau = \omega t$ و تقسیم دو طرف (۱) بر $m\omega^\tau$ که در آن فرکانس مبنا است، فرم بی‌بعد معادلات به صورت زیر خواهد بود [۲۵]

که $\lambda_i > 0, (i=0, 1, \dots, r)$ ضرایب رؤیتگر و $\hat{d}, \hat{x}, \dots, \hat{d}^{[r-1]}$ به ترتیب تخمینی از $d, x, \dots, d^{[r-1]}$ هستند. با ترکیب (۸) و (۹)، معادلات خطای رؤیتگر به صورت زیر است [۲۹]

$$\begin{cases} \dot{e}_0 = -\lambda_0 z L^{\frac{1}{r+1}} |e_0|^{\frac{r}{r+1}} \text{sign}(e_0) + e_1 \\ \dot{e}_1 = -\lambda_1 L^{\frac{1}{r}} |e_1 - \dot{e}_0|^{\frac{r-1}{r}} \text{sign}(e_1 - \dot{e}_0) + e_2 \\ \vdots \\ \dot{e}_{r-1} = -\lambda_{r-1} L^{\frac{1}{2}} |e_{r-1} - \dot{e}_{r-2}| \text{sign}(e_{r-1} - \dot{e}_{r-2}) + e_r \\ \dot{e}_r \in -\lambda_r L \text{sign}(e_r - \dot{e}_{r-1}) + [-L, L] \end{cases} \quad (10)$$

که در آن $e_{r-1} = z_{r-1} - d^{[r-1]}, \dots, e_1 = z_1 - d, e_0 = z_0 - x_0$ و خطاهای تخمین هستند.

در [۲۹] اثبات گردیده که (۱۰) در زمان محدودی پایدار می‌شود. به عبارت دیگر در این مرجع نشان داده شده که در زمان محدود و ثابت $t_f > t$ خطاهای تخمین $e_i(t)$ برای $i=0, 1, \dots, r$ به سمت صفر همگرا می‌شوند و در نتیجه برای زمان $t > t_f$ ، $\hat{x}_i(t) = x_i(t)$ ، $\hat{d}(t) = d(t)$ ، \dots ، $\hat{d}^{[r-1]}(t) = d^{[r-1]}(t)$ می‌گردند.

نکته ۲. در [۲۹] جزئیات طراحی رؤیتگر و نحوه تنظیم ضرایب آن به صورت کامل بیان شده است. لازم به ذکر است که در این مرجع تأثیر ضرایب رؤیتگر بر سرعت تخمین آن نیز آمده است.

۵- طراحی کنترل کننده مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش زمان محدود

در این بخش از مقاله، طراحی کنترل کننده پیشنهادی ارائه می‌شود. قضیه ۱. در معادلات دینامیکی (۷) در صورتی که ورودی کنترل u_1 برابر با معادله زیر انتخاب شود، آن گاه خطاهای ردگیری e_1 و e_r با هر شرایط اولیه‌ای و در زمانی محدود به سمت صفر همگرا می‌گردند

$$u_1 = -[f_1 + \frac{\gamma}{\omega} \hat{\Omega}_2^* + \hat{d}_1 + \beta_1 \frac{q_1}{p_1} (e_r)^{\frac{\gamma-p_1}{q_1}} + K_1 \text{sign}(s_1) |s_1|^{\alpha_1} - \dot{x}_{d_1}] \quad (11)$$

که β_1 و K_1 ثابت‌هایی مثبت و q_1 و p_1 ضرایبی فرد، مثبت و صحیح می‌باشند که باید در شرط $1 < p_1/q_1 < 2$ صدق نمایند. $0 < \alpha_1 < 1$ ، f_1 و $\hat{\Omega}_2^*$ به ترتیب دینامیک‌های معلوم f_1 و $\hat{\Omega}_2^*$ بوده و \hat{d}_1 تخمینی از اغتشاش خارجی d_1 است که با استفاده از رؤیتگر اغتشاش زمان محدود بخش قبل به دست می‌آید.

اثبات: برای اثبات قضیه فوق، سطح لغزش زیر ارائه می‌شود

$$s_1 = e_1 + \frac{1}{\beta_1} e_r^{\frac{p_1}{q_1}} \quad (12)$$

از سطح لغزش فوق نسبت به زمان مشتق‌گیری می‌شود

$$\dot{s}_1 = \dot{e}_1 + \frac{1}{\beta_1} \frac{p_1}{q_1} e_r^{\frac{p_1-1}{q_1}} \dot{e}_r \quad (13)$$

معادله (۷) در (۱۳) جایگذاری می‌گردد

$$\dot{s}_1 = \dot{e}_1 + \frac{1}{\beta_1} \frac{p_1}{q_1} e_r^{\frac{p_1-1}{q_1}} (f_1 + \frac{\gamma}{\omega} \hat{\Omega}_2^* x_r - \dot{x}_{d_1} + d_1 + u_1) \quad (14)$$

معادله (۱۱) در (۱۴) جایگذاری و به صورت زیر مرتب می‌شود

که $d_1(t)$ و $d_r(t)$ اغتشاشات خارجی هستند. نکته ۱. در طراحی کنترل کننده فرض بر آن است که اگرچه اغتشاشات خارجی $d_1(t)$ و $d_r(t)$ کاملاً مشخص نیستند اما کران بالایی آنها معلوم است. به عبارت دیگر $|d_1(t)| \leq D_1$ و $|d_r(t)| \leq D_r$ که D_1 و D_r ثابت‌های مثبتی هستند [۲۴] و [۲۶].

۳- انتقال معادلات دینامیکی ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیک به حوزه خطا

برای انتقال معادلات سیستم ژيروسکوپ به حوزه خطا، تعاریف زیر ارائه می‌شود

$$\begin{aligned} e_1 &= x_1 - x_{d_1} \\ e_r &= x_r - x_{d_r} \\ e_r &= x_r - x_{d_r} \\ e_r &= x_r - x_{d_r} \end{aligned} \quad (6)$$

که x_{d_1} تا x_{d_r} مسیرهای مطلوبی هستند که باید توسط متغیرهای حالت طی شوند. از (۶) نسبت به زمان مشتق‌گیری می‌شود و (۵) در آن جایگذاری می‌گردد. بنابراین معادلات سیستم ژيروسکوپ در حوزه خطا به صورت زیر خواهند بود

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{x}_{d_1} = x_r - \dot{x}_{d_1} \\ \dot{e}_r &= \dot{x}_r - \dot{x}_{d_r} = f_1(x_1, x_r, x_r, x_r) + \frac{\gamma}{\omega} \Omega_2^* x_r + u_1 + d_1(t) - \dot{x}_{d_1} \\ \dot{e}_r &= \dot{x}_r - \dot{x}_{d_r} = x_r - \dot{x}_{d_r} \\ \dot{e}_r &= \dot{x}_r - \dot{x}_{d_r} = f_r(x_1, x_r, x_r, x_r) + u_r + d_r(t) - \dot{x}_{d_r} \end{aligned} \quad (7)$$

در ادامه مقاله، به منظور اختصارنویسی به جای $f_1(x_1, x_r, x_r, x_r)$ ، $f_r(x_1, x_r, x_r, x_r)$ و $d_1(t)$ و $d_r(t)$ به ترتیب از f_1 ، f_r ، d_1 و d_r استفاده می‌گردد.

۴- طراحی رؤیتگر اغتشاش زمان محدود

سیستم غیر خطی یک‌ورودی-یک‌خروجی زیر را که اغتشاش خارجی آن تا مرتبه r مشتق‌پذیر بوده و مشتق r ام اغتشاش دارای ثابت لپشیتز L است در نظر بگیرد

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_r \\ \dot{x}_r &= f(x_1, x_r) + g(x_1, x_r)u + d(t) \end{aligned} \quad (8)$$

برای سیستم فوق می‌توان یک رؤیتگر اغتشاش زمان محدود با معادله زیر پیشنهاد نمود [۲۹]

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = v_1 + x_r, \dot{z}_1 = v_1, \dots, \dot{z}_{r-1} = v_{r-1}, \dot{z}_r = v_r \\ v_r = -\lambda_r L^{\frac{1}{r+1}} |z_r - x_r|^{\frac{r}{r+1}} \text{sign}(z_r - x_r) + z_1 \\ v_{r-1} = -\lambda_{r-1} L^{\frac{1}{r}} |z_{r-1} - v_r|^{\frac{r-1}{r}} \text{sign}(z_{r-1} - v_r) + z_r \\ \vdots \\ v_{r-1} = -\lambda_{r-1} L^{\frac{1}{2}} |z_{r-1} - v_{r-2}| \text{sign}(z_{r-1} - v_{r-2}) + z_r \\ v_r = -\lambda_r L \text{sign}(z_r - v_{r-1}) \\ \hat{x}_1 = z_1, \hat{d} = z_r, \dots, \hat{d}^{[r-1]} = z_r \end{cases} \quad (9)$$

معادله (۲۳) در (۲۲) جایگذاری می‌شود

$$\dot{V}_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) = s_1 \frac{1}{\beta_1} \frac{P_1}{q_1} e^{\frac{P_1-1}{q_1}} (\Delta f_1 + \Delta d_1 - K_1 \text{sign}(s_1) |s_1|^{\alpha_1}) \quad (24)$$

معادله فوق به صورت زیر بازنویسی و مرتب می‌گردد

$$\dot{V}_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) = \frac{1}{\beta_1} \frac{P_1}{q_1} e^{\frac{P_1-1}{q_1}} (s_1 \Delta f_1 + s_1 \Delta d_1 - K_1 |s_1|^{\alpha_1}) \quad (25)$$

در معادله فوق، شرط انتخاب ضرایب P_1 و q_1 به گونه‌ای است که باعث می‌شود تا $e^{\frac{P_1-1}{q_1}} > 0$ باشد. بنابراین اگر $K_1 > (|\Delta f_1| + \sigma)$ انتخاب گردد آن گاه داریم

$$\dot{V}_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) \leq 0 \quad (26)$$

نکته ۴. معادله (۲۵) نشان می‌دهد که با انتخاب مناسب ضریب K_1 ، $\dot{V}_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) \leq 0$ می‌شود. بنابراین بر اساس قضیه باربالت [۳۰] نتیجه می‌شود که سیستم حلقه بسته با کنترل پیشنهادی و در حضور عدم قطعیت‌های موجود، دارای پایداری مجانبی سراسری می‌گردد. اما این نکته زمانی برقرار است که از ابتدای فرایند کنترل، قدر مطلق خطای اولیه رویتگر اغتشاش $|\Delta d_1| < \sigma$ باشد.

در صورتی که خطای اولیه رویتگر اغتشاش بزرگ باشد، از (۲۵) و (۲۶) نتیجه می‌شود

$$\dot{V}_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) \leq \sigma |s_1| \quad (27)$$

از معادله فوق نتیجه می‌شود که

$$\left. \begin{aligned} \text{if } |s_1| \geq 1 \rightarrow \dot{V}_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) \leq 2\sigma V_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) \\ \text{if } |s_1| < 1 \rightarrow \dot{V}_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) \leq \sigma \end{aligned} \right\} \Rightarrow \dot{V}_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) \leq 2\sigma V_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) + \sigma \quad (28)$$

از رابطه فوق نتیجه می‌گیریم مشتق تابع لیاپانوف مثبت، اما مقدار آن محدود است، بنابراین در زمان محدودی سطح لغزش s_1 بی‌نهایت نمی‌شود. از آنجا که رویتگر اغتشاش زمان محدود است، به همین دلیل در این زمان محدود، خطای رویتگر یعنی Δd_1 به سمت صفر همگرا می‌شود. بنابراین به محض این که $|\Delta d_1| < \sigma$ شود، چون $K_1 > (|\Delta f_1| + \sigma)$ انتخاب شده است، بنابراین مشتق تابع لیاپانوف $\dot{V}_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) \leq 0$ گردیده و خطاهای ردگیری e_1 و e_r با هر شرایط اولیه‌ای و در زمانی محدود به سمت صفر همگرا می‌شوند و قضیه ۱ اثبات می‌گردد [۳۰].

نکته ۵. نحوه عملکرد کنترل پیشنهادی در مراحل زیر خلاصه می‌شود: مرحله اول $(t \leq t \leq t_f)$: در این مرحله عملکرد رویتگر اغتشاش بسیار مؤثر است. اثبات ریاضی نشان می‌دهد که در این مرحله خطای رویتگر به سمت صفر همگرا می‌شود و در نتیجه برای $t \geq t_f$ تخمین اغتشاش با مقدار واقعی آن برابر می‌گردد $(\hat{d}_1 = d_1)$ [۲۹].

مرحله دوم $(t_f < t \leq t_f + t_r)$: در این مرحله سطح لغزش برابر با $s_1 = e_1 + (1/\beta_1) e_r^{\frac{P_1}{q_1}}$ است و کنترل پیشنهادی این سطح لغزش را به سمت صفر همگرا می‌نماید. در نتیجه برای $t \geq t_f + t_r$ ، $s_1 = 0$ می‌شود.

مرحله سوم $(t_f + t_r < t \leq t_f + t_r + t_s)$: در این مرحله فاز لغزش اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر در این مرحله کنترل پیشنهادی، سطح

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 = \dot{e}_1 + \frac{1}{\beta_1} \frac{P_1}{q_1} e^{\frac{P_1-1}{q_1}} (f_1 + \frac{2}{\omega} \Omega_z^* x_r - \ddot{x}_{d_1} + \\ d_1(t) - \hat{f}_1 - \frac{2}{\omega} \hat{\Omega}_z^* x_r - \hat{d}_1 - \beta_1 \frac{q_1}{P_1} (e_r)^{\frac{P_1}{q_1}} - \\ K_1 \text{sign}(s_1) |s_1|^{\alpha_1} + \ddot{x}_{d_1}) \end{aligned} \quad (15)$$

برای ساده‌سازی معادله فوق از تعاریف $f_1 - \hat{f}_1 = \Delta f_1$ ، $d_1 - \hat{d}_1 = \Delta d_1$ و $\Delta\Omega_z^* = \Omega_z^* - \hat{\Omega}_z^*$ استفاده می‌گردد

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 = \dot{e}_1 - e^{\frac{P_1-1+2-P_1}{q_1}} + \\ \frac{1}{\beta_1} \frac{P_1}{q_1} e^{\frac{P_1-1}{q_1}} (\Delta f_1 + \frac{2}{\omega} \Delta\Omega_z^* x_r + \Delta d_1 - K_1 \text{sign}(s_1) |s_1|^{\alpha_1}) \end{aligned} \quad (16)$$

نکته ۳. در (۱۶)، Δf_1 دینامیک نامعلوم، $\Delta\Omega_z^*$ خطای تخمین سرعت زاویه‌ای و Δd_1 خطای تخمین رویتگر اغتشاش زمان محدود است. اگرچه Δf_1 معلوم و مشخص نیست اما در ادامه فرض می‌شود که کران بالای آن معلوم است و همچنین خطای تخمین رویتگر $|\Delta d_1| < \sigma$ می‌باشد. با ساده‌سازی (۱۶)، معادله زیر به دست می‌آید

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 = \frac{1}{\beta_1} \frac{P_1}{q_1} e^{\frac{P_1-1}{q_1}} (\Delta f_1 + \frac{2}{\omega} \Delta\Omega_z^* x_r + \\ \Delta d_1 - K_1 \text{sign}(s_1) |s_1|^{\alpha_1}) \end{aligned} \quad (17)$$

در ادامه تابع کاندیدای لیاپانوف زیر پیشنهاد می‌شود

$$V_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) = \frac{1}{2} s_1^2 + \frac{1}{2\gamma_1} (\Delta\Omega_z^*)^2 \quad (18)$$

که γ_1 ضریب ثابت و مثبتی است. از معادله فوق نسبت به زمان مشتق‌گیری می‌گردد

$$\dot{V}_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) = s_1 \dot{s}_1 + \frac{1}{\gamma_1} \Delta\Omega_z^* \dot{\Delta\Omega}_z^* \quad (19)$$

از تعریف $\Delta\Omega_z^*$ نتیجه می‌شود که (۱۹) را می‌توان به صورت زیر بیان نمود

$$\dot{V}_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) = s_1 \dot{s}_1 - \frac{1}{\gamma_1} \Delta\Omega_z^* \dot{\Delta\Omega}_z^* \quad (20)$$

معادله (۱۷) در (۲۰) جایگذاری می‌گردد

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) = s_1 \frac{1}{\beta_1} \frac{P_1}{q_1} e^{\frac{P_1-1}{q_1}} (\Delta f_1 + \frac{2}{\omega} \Delta\Omega_z^* x_r + \\ \Delta d_1 - K_1 \text{sign}(s_1) |s_1|^{\alpha_1}) - \frac{1}{\gamma_1} \Delta\Omega_z^* \dot{\Delta\Omega}_z^* \end{aligned} \quad (21)$$

معادله فوق به صورت زیر بازنویسی و مرتب می‌شود

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(s_1, \Delta\Omega_z^*) = s_1 \frac{1}{\beta_1} \frac{P_1}{q_1} e^{\frac{P_1-1}{q_1}} \times \\ (\Delta f_1 + \Delta d_1 - K_1 \text{sign}(s_1) |s_1|^{\alpha_1}) + \end{aligned} \quad (22)$$

$$s_1 \frac{1}{\beta_1} \frac{P_1}{q_1} e^{\frac{P_1-1}{q_1}} \frac{2}{\omega} \Delta\Omega_z^* x_r - \frac{1}{\gamma_1} \Delta\Omega_z^* \dot{\Delta\Omega}_z^*$$

در ادامه قانون تطبیقی زیر پیشنهاد می‌گردد

$$\dot{\Delta\Omega}_z^* = s_1 \frac{\gamma_1}{\beta_1} \frac{P_1}{q_1} e^{\frac{P_1-1}{q_1}} \frac{2}{\omega} x_r \quad (23)$$

جدول ۱: پارامترهای سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیکی.

m	$0.57e^{-6}$ kg
d_{xx}	$0.429e^{-6}$ Ns/m
d_{xy}	$0.429e^{-6}$ Ns/m
d_{yy}	$0.687e^{-6}$ Ns/m
k_{xx}	80.98 N/m
k_{xy}	5 N/m
k_{yy}	71.62 N/m
ω	1 kHz
q	10^{-6} m

در طراحی کنترل پیشنهادی، تنها از یک قانون تطبیقی استفاده شده است و برای پیاده‌سازی آن نیازی به انتقال معادلات دینامیکی سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی به شکل معادلات رگرسیون نیست. بنابراین طراحی و پیاده‌سازی آن بسیار ساده است و از حجم محاسبات پایینی نیز برخوردار می‌باشد.

در طراحی کنترل کننده از روش کنترل مد لغزشی ترمینال بدون تکینگی استفاده شده است. از آنجا که مقادیر ضرایب α_1 و α_2 کوچک‌تر از یک انتخاب می‌شوند، به همین دلیل و بر اساس شکل ۲ تا حد زیادی از بروز لرزش در ورودی کنترل جلوگیری می‌گردد. از طرف دیگر سیستم حلقه بسته با کنترل پیشنهادی و در حضور عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری، دارای پایداری مجانبی سراسری زمان محدود است.

افزودن رؤیتگر اغتشاش زمان محدود به ساختار کنترل پیشنهادی، باقیمانده پدیده لرزش در ورودی کنترل را به طور کلی حذف می‌نماید. رؤیتگر با تخمین دقیق اغتشاش خارجی، نقش عدم قطعیت‌های غیر ساختاری را در فرایند کنترل بسیار تضعیف نموده و دامنه ورودی کنترل را نیز کاهش می‌دهد.

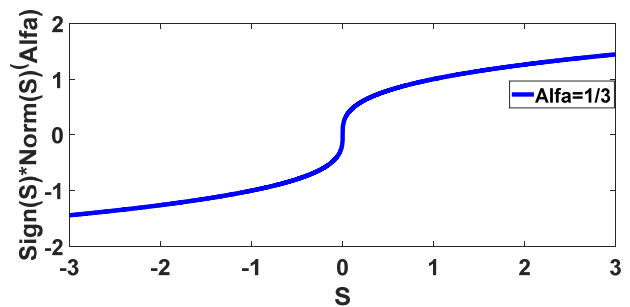
در اثبات قضایای ۱ و ۲، نقش رؤیتگرهای اغتشاش در نظر گرفته شده و بنابراین اثبات پایداری سیستم حلقه بسته با حضور رؤیتگرهای اغتشاش انجام شده است. بنابراین راهکار پیشنهادی قابلیت پیاده‌سازی عملی را دارد.

۸- شبیه‌سازی

در این بخش از مقاله برای بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، شبیه‌سازی‌هایی بر روی یک سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیکی پیاده‌سازی می‌شود. پارامترهایی که برای سیستم ژيروسکوپ در نظر گرفته شده‌اند در جدول ۱ آورده شده است که از [۲۵] انتخاب گردیده‌اند. ورودی ثابت با زمان $\Omega^* = 5$ به عنوان ورودی سامانه تحریک انتخاب شده است. موقعیت‌های مطلوب در راستای x و y به صورت $x_d(t) = 10^{-6} \sin(\omega_1 t)$ و $y_d(t) = 1.2 \times 10^{-6} \sin(\omega_2 t)$ و $\omega_1 = 4.17 \text{ Hz}$ و $\omega_2 = 5.11 \text{ Hz}$ تنظیم گردیدند. شرایط اولیه $(x(0), y(0))$ برابر با $(0.8e^{-6}, 1.2e^{-6})$ انتخاب شد.

مرحله اول شبیه‌سازی

در این بخش از شبیه‌سازی، کنترل مد لغزشی پیشنهادی بدون استفاده از رؤیتگر اغتشاش به سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیکی اعمال گردید. برای اعمال عدم قطعیت‌های ساختاری، به ترتیب فرض بر آن است که مقادیر پارامترهای سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی ۸۰٪ جدول ۱



شکل ۲: نمودار $\text{sign}(s)|s|^{-\alpha}$ بر حسب تغییرات s و به ازای $\alpha = 1/3$.

لغزش را در مقدار صفر تثبیت می‌نماید. بنابراین برای $t \geq t_f + t_r + t_s$ خطاهای ردگیری e_1 و e_2 در این زمان محدود برابر با صفر می‌شوند.

قضیه ۲. در معادلات دینامیکی (۷) در صورتی که ورودی کنترل u_r برابر با معادله زیر انتخاب شود، آن گاه خطاهای ردگیری e_1 و e_2 با هر شرایط اولیه‌ای و در زمانی محدود به سمت صفر همگرا می‌گردند

$$u_r = -[\hat{f}_r + \hat{d}_r + \beta_r \frac{q_r}{p_r} (e_r)^{\frac{r-p_r}{q_r}} + K_r \text{sign}(s_r) |s_r|^{\alpha_r} - \dot{x}_{d_r}] \quad (29)$$

که β_r و K_r ثابت‌هایی مثبت، p_r و q_r ضرایبی فرد، مثبت و صحیح می‌باشند که باید در شرط $1 < p_r/q_r < 2$ صدق نمایند. $0 < \alpha_r < 1$ ، \hat{f}_r دینامیک‌های معلوم f_r بوده و \hat{d}_r تخمینی از اغتشاش خارجی d_r است که با استفاده از رؤیتگر اغتشاش زمان محدود به دست می‌آید.

اثبات: اثبات این قضیه عیناً مطابق با روش اثبات قضیه ۱ است و سطح لغزش و تابع کاندیدای لیاپانوف پیشنهادی آن در زیر آمده است. بنابراین در این بخش از ارائه روش اثبات قضیه ۲ پرهیز می‌گردند

$$s_r = e_r + \frac{1}{\beta_r} e_r^{\frac{p_r}{q_r}} \quad (30)$$

$$V_r(s_r) = \frac{1}{p_r} s_r^{\frac{p_r}{q_r}}$$

۶- اثبات پایداری سیستم حلقه بسته

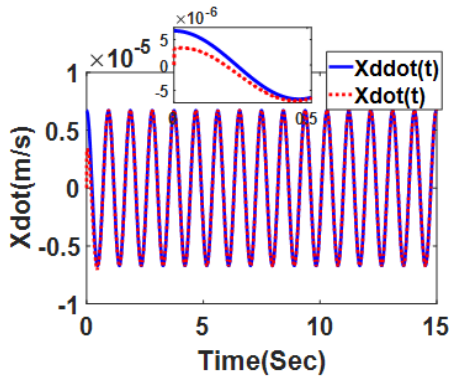
در معادلات دینامیکی (۷) در صورتی که ورودی‌های کنترلی u_1 و u_2 به ترتیب برابر با (۱۱) و (۲۹) انتخاب شوند، قضایای ۱ و ۲ برقرار گردیده و در نهایت سیستم حلقه بسته در حضور عدم قطعیت‌های موجود دارای پایداری مجانبی سراسری می‌شود.

نکته ۶. در صورتی که سیستم ژيروسکوپ در معرض اغتشاشات خارجی نباشد، آن گاه از معادلات خطای رؤیتگر نتیجه می‌شود که $e_1(t) = e_2(t) = \dots = e_r(t) = 0$ می‌گردند. در این صورت اگر شرایط اولیه متغیرهای حالت رؤیتگر برابر با $z_1(t) = x_1(t)$ و $z_r(t) = 0$ تنظیم شوند، آن گاه کنترل کننده‌های پیشنهادی (۱۱) و (۲۹) به کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی تبدیل می‌گردند.

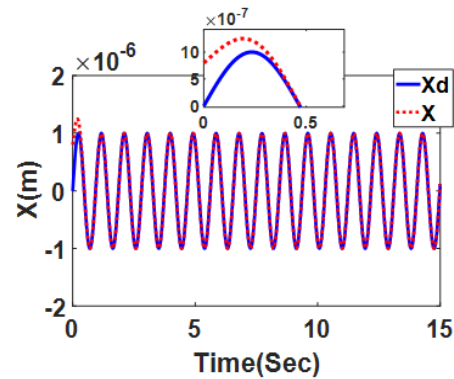
۷- مزایای کنترل پیشنهادی

در طراحی کنترل پیشنهادی نوآوری و خلاقیتی نهفته است که به صورت خلاصه در زیر به آنها اشاره می‌شود:

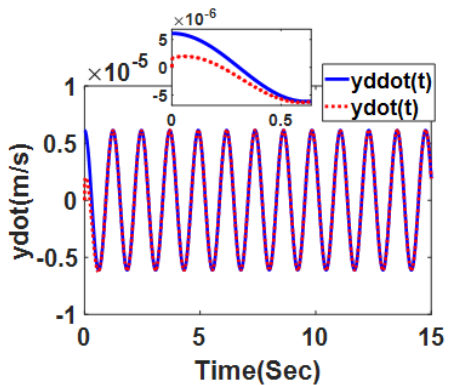
- در راهکار پیشنهادی، فرایند تشخیص به همراه کنترل فرایند تحریک به صورت هم‌زمان و در زمانی محدود انجام می‌شود.



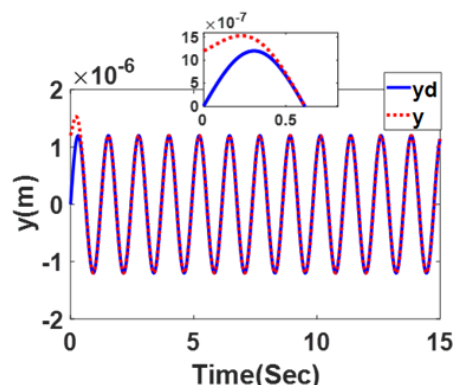
شکل ۲: ردگیری دقیق سرعت \dot{x} با اعمال کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکنیکی و بدون حضور رویتگر اغتشاش.



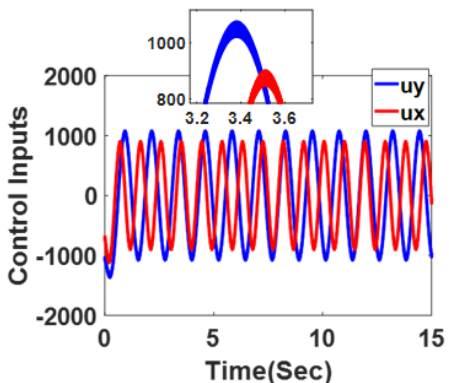
شکل ۳: ردگیری دقیق موقعیت x با اعمال کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکنیکی و بدون حضور رویتگر اغتشاش.



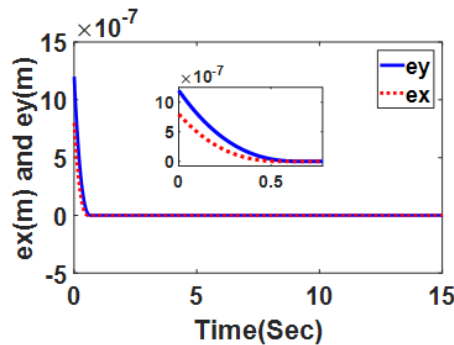
شکل ۴: ردگیری دقیق موقعیت y با اعمال کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکنیکی و بدون حضور رویتگر اغتشاش.



شکل ۵: بردار خطاهای ردگیری با اعمال کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکنیکی و بدون حضور رویتگر اغتشاش.



شکل ۶: ورودی‌های کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکنیکی و بدون حضور رویتگر اغتشاش.



شکل ۷: ورودی‌های کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکنیکی و بدون حضور رویتگر اغتشاش.

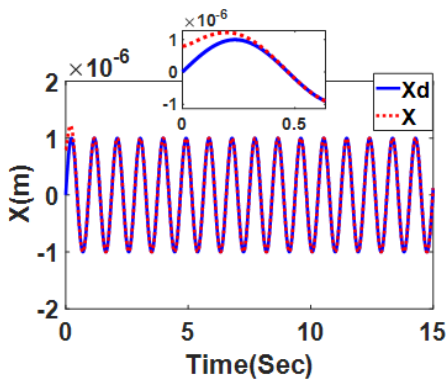
ضرایب کنترل کننده برابر $\beta_1 = \beta_2 = 10$ ، $p_1 = p_2 = 5$ ، $q_1 = q_2 = 3$ ، $\alpha_1 = \alpha_2 = 1/3$ و $\gamma_1 = \gamma_2 = 2.5$ و $k_1 = k_2 = 11$ تنظیم گردید. پس از اجرای شبیه‌سازی، مطابق شکل‌های ۳ و ۴ می‌بینیم که موقعیت‌های x و y از شرایط اولیه شروع و در زمانی برابر با ۰٫۵ ثانیه به سمت مقادیر مطلوب خود همگرا شده‌اند. شکل ۵ نیز نتایج شکل‌های ۳ و ۴ را تأیید نموده و نشان می‌دهد که خطاهای ردگیری موقعیت e_x و e_y در ۰٫۵ ثانیه صفر شده‌اند. در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌گردد که تغییرات موقعیت یعنی \dot{x} و \dot{y} نیز به خوبی و در زمان مورد نظر به سمت مقادیر مطلوب خود همگرا شده‌اند. مطابق شکل ۸ می‌بینیم که عملکرد خوب کنترل مد لغزشی، با دامنه‌ای در حدود ۱۰۰۰ نیوتن بر متر و با بروز لرزش در ورودی‌های کنترل همراه است. از آنجا که دامنه این لرزش‌ها کم است، این امر پیاده‌سازی عملی این کنترل کننده را امکان‌پذیر می‌نماید اما این پدیده نامطلوب به مرور زمان باعث کوتاه‌شدن عمر محرکه‌های مد

است و برای اعمال دینامیک مدل‌نشده و اغتشاشات خارجی، از دینامیک‌های زیر استفاده شد

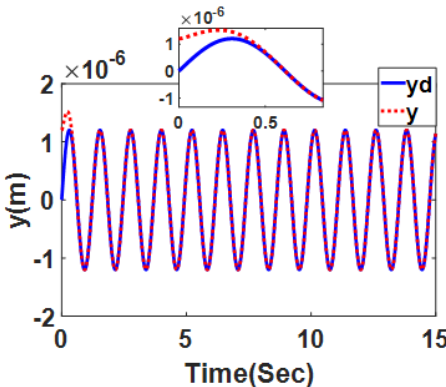
$$d_1(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 2 \\ 6, & 2 \leq t < 5 \\ 6 + 2 \sin(\pi t), & 5 \leq t < 8 \\ 0, & 8 \leq t < 10 \\ 8 + 2 \sin(\pi t), & 10 \leq t < 15 \end{cases} \quad (31)$$

$$d_2(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 3 \\ 8, & 3 \leq t < 6 \\ 8 + 2 \sin(2\pi t), & 6 \leq t < 10 \\ 6 + \sin(\pi t), & 10 \leq t < 15 \end{cases} \quad (32)$$

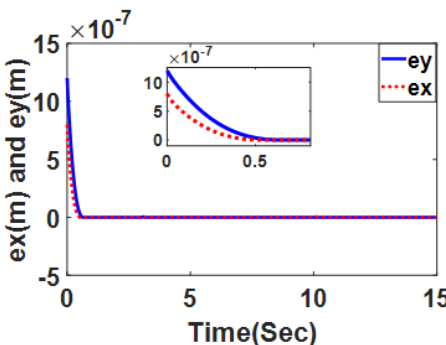
بنابراین در این بخش از شبیه‌سازی، عملکرد کنترل کننده در حضور عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری بررسی می‌شود. در این بخش



شکل ۱۲: ردگیری دقیق موقعیت x با اعمال کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش.

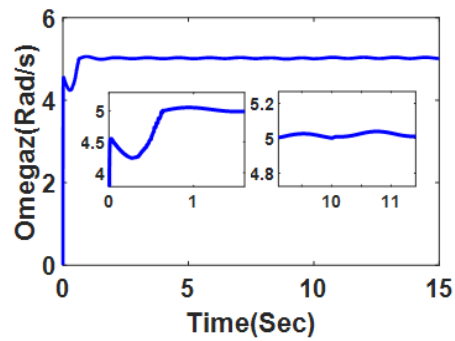


شکل ۱۳: ردگیری دقیق موقعیت y با اعمال کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش.

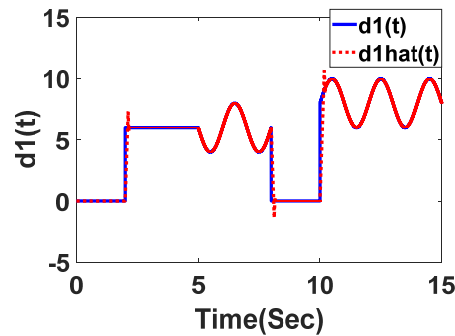


شکل ۱۴: بردار خطاهای ردگیری با اعمال کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش.

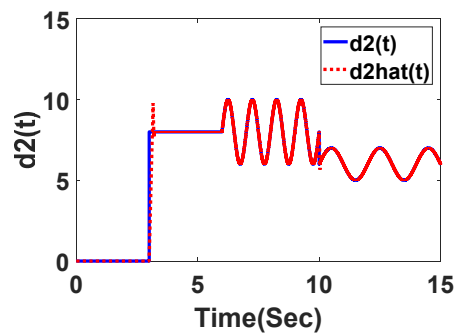
ضرایب رؤیتگرهای اغتشاش برابر با $\lambda_1 = 3$ ، $\lambda_2 = 1.5$ ، $\lambda_3 = 1.5$ ، $\lambda_4 = 1.5$ ، $\lambda_5 = 1.5$ و $l = 40$ انتخاب شدند. پس از اجرای شبیه‌سازی، از شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نتیجه می‌شود که رؤیتگرهای اغتشاش به خوبی عمل نموده و اغتشاشات خارجی $d_1(t)$ و $d_2(t)$ را در زمانی بسیار کوتاه و با دقت بالایی تخمین زده‌اند. مطابق شکل ۱۲، موقعیت x از شرایط اولیه شروع و در زمانی برابر با ۰/۵ ثانیه به سمت مقدار مطلوب خود همگرا شده است. از شکل ۱۳ نتیجه می‌شود که عملکرد کنترل پیشنهادی در مورد موقعیت y نیز به خوبی عمل نموده و آن را در ۰/۵ ثانیه به مقدار مطلوب خود می‌رساند. شکل ۱۴ نتایج شکل‌های ۱۲ و ۱۳ را تأیید نموده و نحوه همگرا شدن بردار خطاهای ردگیری را به خوبی نمایش می‌دهد. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود که عملکرد کنترل پیشنهادی در برابر عدم قطعیت‌های موجود بسیار خوب بوده و توانسته است که سرعت‌های \dot{x} و \dot{y} را در زمان مورد نظر به سمت مقادیر مطلوب خود



شکل ۹: تعیین سرعت زاویه‌ای Ω_2^* با اعمال کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و بدون حضور رؤیتگر اغتشاش.



شکل ۱۰: تخمین اغتشاش خارجی $d_1(t)$ با اعمال کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش.



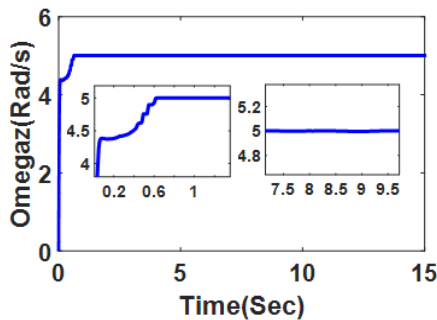
شکل ۱۱: تخمین اغتشاش خارجی $d_2(t)$ با اعمال کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش.

تحریک سیستم ژيروسکوپ می‌شود. در شکل ۹ مشاهده می‌شود که قانون تطبیقی به خوبی عمل نموده و مقدار سرعت زاویه‌ای را در زمان ۰/۵ ثانیه برابر با ۵ رادیان بر ثانیه تعیین می‌نماید.

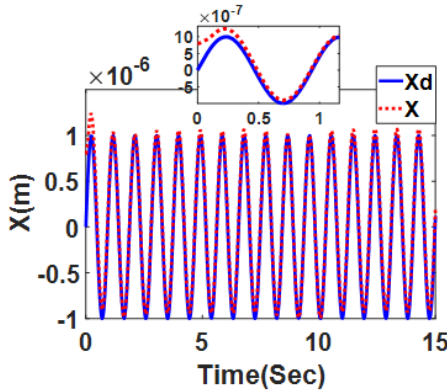
نکته ۷. لازم به ذکر است که به دلیل متغیر بودن اغتشاشات خارجی، مقدار سرعت زاویه‌ای دارای نوسانات بسیار کمی است. اما این نوسانات به اندازه‌ای کوچک است که باعث کاهش دقت اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای نمی‌گردد.

مرحله دوم شبیه‌سازی

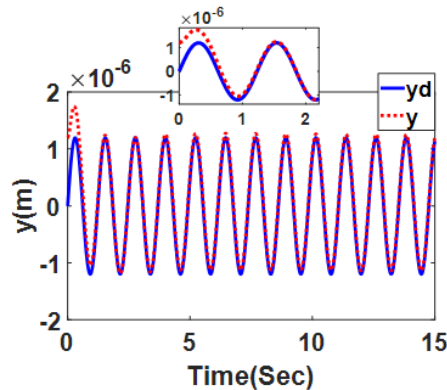
در این مرحله از شبیه‌سازی، عملکرد کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش در مواجهه با عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری موجود در معادلات دینامیکی سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیکی بررسی می‌شود. شرایط حاکم بر این مرحله از شبیه‌سازی، عیناً مطابق مرحله اول شبیه‌سازی است. ضرایب کنترل‌کننده پیشنهادی، مطابق با $\beta_1 = \beta_2 = 10$ ، $p_1 = p_2 = 5$ ، $q_1 = q_2 = 3$ ، $\gamma_1 = 2.5$ و $k_1 = k_2 = 11$ تنظیم گردید.



شکل ۱۸: تعیین سرعت زاویه‌ای Ω_g^* با اعمال کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش.



شکل ۱۹: ردگیری دقیق موقعیت x با اعمال کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی با سطح لغزش مجانبی.



شکل ۲۰: ردگیری دقیق موقعیت y با اعمال کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی با سطح لغزش مجانبی.

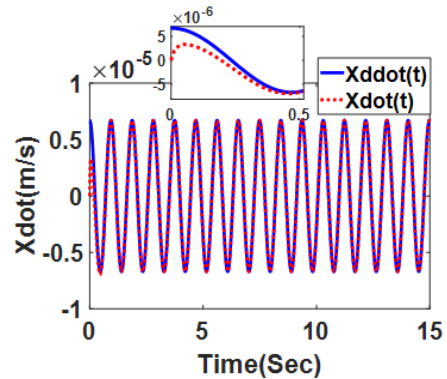
$$\lambda = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$$

$$\xi = \begin{bmatrix} 2, 3 \\ 4, 1 \end{bmatrix}$$

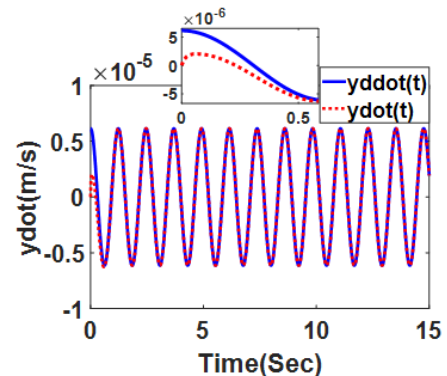
$$\gamma = \begin{bmatrix} 2 \\ 5, 5 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 11 & 0 \\ 0 & 11 \end{bmatrix}$$

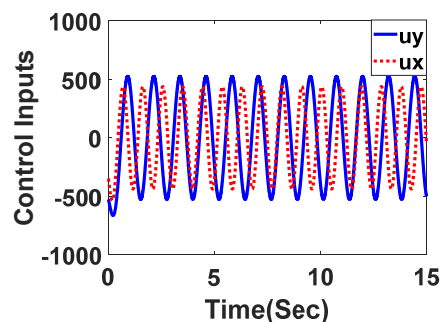
پس از اجرای شبیه‌سازی، مطابق شکل ۱۹، موقعیت x از شرایط اولیه شروع و در زمانی برابر با ۱/۵ ثانیه به سمت مقدار مطلوب خود همگرا شده است. از شکل ۲۰ نتیجه می‌شود که عملکرد کنترل پیشنهادی در مورد موقعیت y بدتر عمل نموده و در ۲ ثانیه آن را به مقدار مطلوب خود رسانده است. شکل ۲۱ نتایج شکل‌های ۱۹ و ۲۰ را تأیید می‌نماید. با دقت



شکل ۱۵: ردگیری دقیق سرعت \dot{x} با اعمال کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش.



شکل ۱۶: ردگیری دقیق سرعت \dot{y} با اعمال کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش.

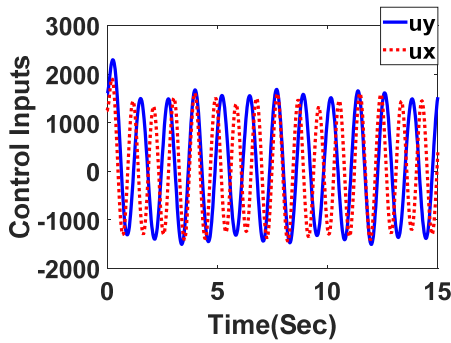


شکل ۱۷: ورودی‌های کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش.

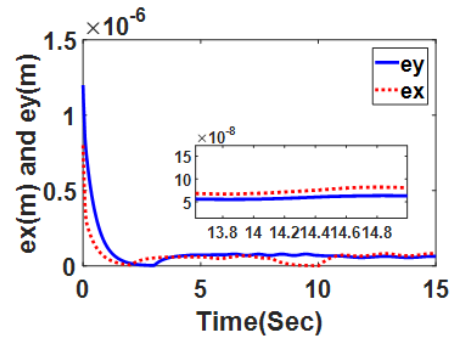
همگرا نماید. از شکل ۱۷ نتیجه می‌شود که رؤیتگرهای اغتشاش به خوبی عمل نموده و در حضور عدم قطعیت‌های موجود، پدیده نامطلوب لرزش در ورودی کنترل را به طور کلی حذف نموده‌اند و دامنه ورودی‌های کنترل را نیز تا مقدار ۵۰۰ نیوتن بر متر کاهش داده‌اند. با دقت در این شکل می‌بینیم که دامنه‌های ورودی u_x و u_y نرم و پیوسته هستند. در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که قانون تطبیقی پیشنهادی، سرعت زاویه‌ای را در ۰/۶ ثانیه و بدون هیچ نوسانی تخمین زده است.

مرحله سوم شبیه‌سازی

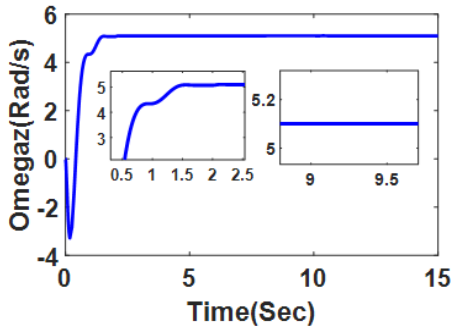
در این مرحله از شبیه‌سازی برای مقایسه عملکرد کنترل پیشنهادی، کنترل‌کننده مد لغزشی فازی تطبیقی با سطح لغزش مجانبی بر روی سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیک پیاده‌سازی می‌شود [۲۱]. شرایط حاکم بر این مرحله از شبیه‌سازی، مطابق مراحل اول و دوم شبیه‌سازی است. ضرایب کنترل‌کننده پیشنهادی، مطابق با مقادیر زیر تنظیم گردید



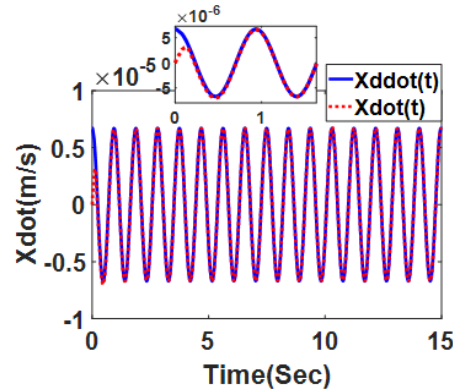
شکل ۲۰: بردار ورودی کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی با سطح لغزش مجانبی.



شکل ۲۱: بردار خطاهای ردگیری با اعمال کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی با سطح لغزش مجانبی.



شکل ۲۲: تعیین سرعت زاویه‌ای Ω_g^* با اعمال کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی با سطح لغزش مجانبی.



شکل ۲۳: ردگیری دقیق سرعت \dot{x} با اعمال کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی با سطح لغزش مجانبی.

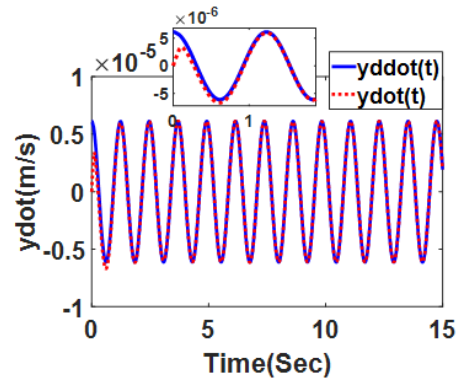
۹- جمع‌بندی نتایج شبیه‌سازی‌ها

با دقت در نتایج شبیه‌سازی‌های ارائه‌شده، نتیجه می‌شود که کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و بدون حضور رؤیتگر اغتشاش، دارای سرعت همگرایی بالایی بوده و خطاهای ردگیری را در ۰/۵ ثانیه به سمت صفر همگرا نموده است. دقت و سرعت همگرایی این کنترل‌کننده در نتایج مربوط به سرعت‌های \dot{x} و \dot{z} نیز به خوبی قابل مشاهده است. اما این عملکرد عالی، مطابق شکل ۸ با بروز لرزش در دامنه ورودی کنترل همراه است که این امر باعث کوتاه‌شدن عمر محرکه‌های مد تحریک سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیک می‌شود.

کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش، دارای عملکردی به خوبی و با سرعت همگرایی کنترل مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و بدون حضور رؤیتگر اغتشاش است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که حضور رؤیتگرهای اغتشاش

در کنترل پیشنهادی، مزایای زیر را به دنبال دارند:

- پدیده نامطلوب لرزش در ورودی کنترل را به طور کلی حذف نموده و باعث شده‌اند که ورودی‌های کنترل نرم و پیوسته شوند.
 - دامنه ورودی‌های کنترل را تا ۵۰٪ کاهش داده است زیرا رؤیتگرها با دقت بالایی اغتشاشات خارجی را تخمین می‌زنند، بنابراین می‌توان اثر آنها را از طریق ورودی کنترل تضعیف نمود و این امر دامنه ورودی‌های کنترل را بسیار کاهش می‌دهد.
 - تخمین درست و دقیق اغتشاشات خارجی، دقت تخمین سرعت زاویه‌ای Ω_g^* را افزایش داده و از نوسانات آن جلوگیری می‌نماید.
- کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی با سطح لغزش مجانبی، سرعت همگرایی خطای ردگیری e_x را به اندازه ۱ ثانیه نسبت به عملکرد کنترل پیشنهادی افزایش داده است. اما عملکرد آن در مورد خطای e_y بدتر بوده و زمان همگرایی آنها را به اندازه ۱/۵ ثانیه افزایش داده است. از طرف دیگر خطاهای ردگیری e_x و e_y با بروز خطای حالت ماندگار نیز مواجه



شکل ۲۴: ردگیری دقیق سرعت \dot{z} با اعمال کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی با سطح لغزش مجانبی.

در این شکل متوجه می‌شویم که ردگیری موقعیت‌های x و y با خطای حالت ماندگار همراه هستند. در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ مشاهده می‌شود که عملکرد کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی با سطح لغزش مجانبی در برابر عدم قطعیت‌های موجود بسیار خوب بوده و توانسته است که سرعت‌های \dot{x} و \dot{z} را به سمت مقادیر مطلوب خود همگرا نماید. از شکل ۲۴ نتیجه می‌شود که عملکرد تقریبی پیشنهادی و عمل انتگرال‌گیری مناسب بوده و ورودی‌های کنترل با دامنه‌ای نرم، پیوسته و عاری از هرگونه لرزشی همراه است. لازم به ذکر است که این نرم‌بودن ورودی‌های کنترل با دامنه‌ای در حدود ۲۰۰۰ نیوتن بر متر همراه است. به عبارت دیگر دامنه‌های ورودی کنترل، تقریباً ۴ برابر دامنه‌های ورودی کنترل پیشنهادی است. در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود که سرعت زاویه‌ای Ω_g^* در زمانی برابر با ۲/۵ ثانیه تعیین می‌شود و این مقدار با خطایی برابر با ۰/۱ رادیان همراه است.

- [9] M. Zareh and S. A. Soheili, "Modified model reference adaptive control with application to MEMS gyroscope," *J. Mech. Sci. and Tech.*, vol. 25, no. 8, pp. 2061-2066, Sept. 2011.
- [10] Y. Fang, J. Fei, Y. Yang, and M. Hua, "Adaptive control of MEMS gyroscope using backstepping approach," in *Proc. Int. Conf. on Cont.*, pp. 361-366, Seoul, South Korea, 22-25 Oct. 2014.
- [11] C. Lu and J. Fei, "Backstepping control of MEMS gyroscope using adaptive neural observer," *Int. J. Mach. Lear. and Cyb.*, vol. 8, no. 6, pp. 1863-1873, Jul. 2017.
- [12] V. Utkin, *Sliding Modes in Control and Optimization*, Springer, Berlin, 1992.
- [13] V. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes," *IEEE Trans. on Auto. Cont.*, vol. 22, no. 2, pp. 212-222, Apr. 1977.
- [14] M. H. Khooban and M. R. Soltanpour, "Swarm optimization tuned fuzzy sliding mode control design for a class of nonlinear systems in presence of uncertainties," *J. Intel. and Fuzz. Sys.*, vol. 24, no. 2, pp. 383-394, Mar. 2013.
- [15] M. R. Soltanpour, B. Zolfaghari, M. Soltani, and M. H. Khooban, "Fuzzy sliding mode control design for a class of nonlinear systems with structured and unstructured uncertainties," *Int. J. Inn. Com. Inf. and Cont.*, vol. 9, no. 7, pp. 2713-2726, Jun. 2013.
- [16] M. R. Soltanpour, M. H. Khooban, and M. Soltani, "Robust fuzzy sliding mode control for tracking the robot manipulator in joint space and in presence of uncertainties," *J. of Rob.*, vol. 32, no. 3, pp. 433-446, Aug. 2014.
- [17] M. Veysi and M. R. Soltanpour, "Voltage-base control of robot manipulator using adaptive fuzzy sliding mode control," *Int. J. Fuzz. Sys.*, vol. 19, no. 5, pp. 1430-1443, Aug. 2017.
- [18] J. Fei and Z. Yuan, "Dynamic sliding mode control of MEMS gyroscope," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Cont. App.*, pp. 437-442, Hyderabad, India, 28-30 Aug. 2013.
- [19] C. Batur, T. Sreeramreddy, and Q. Khasawneh, "Sliding mode control of a simulated MEMS gyroscope," *ISA Trans.*, vol. 45, no. 1, pp. 99-108, Jan. 2006.
- [20] C. L. Kuo, H. T. Yau, C. H. Lin, and C. K. Tsui, "Fuzzy sliding mode control for a gyroscope system," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Mech. and Auto.*, pp. 133-137, Chengdu, China, 5-8, Aug. 2012.
- [21] J. Ren, R. Zhang, and B. Xu, "Adaptive fuzzy sliding mode control of MEMS gyroscope with finite time convergence," *J. of Sen.*, vol. 12, no. 4, pp. 20-28, Oct. 2016.
- [22] X. Liang, J. Fei, and Y. Xue, "Adaptive fuzzy control of MEMS gyroscope using global fast terminal sliding mode approach," in *Int. Conf. on Cont. and Rob. Eng.*, pp. 109-112, Bangkok, Thailand, 1-3 Apr. 2017.
- [23] J. Fei and F. Chowdhury, "Robust adaptive sliding mode controller for triaxial gyroscope," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Deci. and Cont.* pp. 5574-5579, Shanghai, China, 15-18 Dec. 2009.
- [24] J. Fei, "Robust adaptive vibration tracking control for a MEMS vibratory gyroscope with bound estimation," *IET Cont. Theo. App.*, vol. 4, no. 6, pp. 1019-1026, Jun. 2010.
- [25] S. Wang and J. Fei, "Robust adaptive sliding mode control of MEMS gyroscope using T-S fuzzy model," *Non. Dyn.*, vol. 5, no. 10, pp. 72-83, Jun. 2014.
- [26] Y. Chu and J. Fei, "Adaptive global sliding mode control for MEMS gyroscope using RBF neural network," *Math. Prob. in Eng.*, vol. 10, no. 4, pp. 123-132, Mar. 2015.
- [27] R. Zhang, T. Shao, W. Zhao, A. Li, and B. Xu, "Sliding mode control of MEMS gyroscopes using composite learning," *Neurocomputing*, vol. 275, no. 4, pp. 2555-2564, Jan. 2018.
- [28] M. Rahmani and M. Habibur Rahman, *A New Adaptive Fractional Sliding Mode Control of a MEMS Gyroscope*, Microsystem Technologies, <https://doi.org/10.1007/s00542-018-4212-8>, 2018.
- [29] Y. B. Shtessel, I. A. Shkolnikov, and A. Levant, "Smooth second-order sliding modes: missile guidance application," *Automatica*, vol. 43, no. 8, pp. 1470-1476, Aug. 2007.
- [30] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, USA, 2002.

محمدرضا سلطانیپور در سال ۱۳۷۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق-مخابرات خود را از دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری و در سال ۱۳۸۲ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق-کنترل خود را از دانشگاه صنعتی شاهرود دریافت نمود. از سال ۱۳۸۳ نامبرده به عنوان هیأت علمی در مرتبه مربی در دانشکده برق دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری به کار مشغول بود و در سال ۱۳۸۷ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق-کنترل از دانشگاه صنعتی شاهرود گردید. دکتر سلطانیپور اینک نیز عضو هیأت علمی دانشکده برق دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری با مرتبه دانشیاری می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند رباتیک، کنترل مقاوم غیرخطی و کنترل فازی می‌باشد.

هستند. اما از شکل ۲۴ نتیجه می‌شود که ترکیب تقریبگر فازی تطبیقی و عمل انتگرال‌گیری به خوبی عمل نموده و ورودی‌های کنترل بسیار نرم و پیوسته ولی دارای دامنه‌ای بسیار بزرگ هستند. اگرچه این کنترل‌کننده، سرعت همگرایی حالت‌ها را خیلی کند نموده است اما اگر منصفانه به این مسئله نگاه کنیم نتیجه می‌گیریم که این کنترل‌کننده نیز قابلیت پیاده‌سازی عملی روی سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیک را دارد.

نکته ۸. اگرچه کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی با سطح لغزش مجانبی قابلیت پیاده‌سازی عملی را دارد، اما کمترین زمان همگرایی خطای ردگیری e_p در آن ۲ ثانیه است که این زمان را نمی‌توان حتی با افزایش ضرایب ورودی کنترل نیز کاهش داد.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال تطبیقی بدون تکینگی و مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش پیشنهاد گردید که قادر است تا فرایند تشخیص و کنترل فرایند تحریک سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیکی را در حضور عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری موجود انجام دهد. برای طراحی کنترل پیشنهادی نیازی به انتقال معادلات دینامیکی سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی به شکل معادلات رگرسیون نیست، بنابراین مراحل طراحی و پیاده‌سازی آن بسیار ساده است. از آنجا که فرایند تشخیص سیستم ژيروسکوپ از طریق فقط یک قانون تطبیقی انجام می‌شود، بنابراین حجم محاسبات ورودی کنترل پیشنهادی پایین است. در ساختار کنترل پیشنهادی از روش کنترل مد لغزشی ترمینال بدون تکینگی به همراه رؤیتگر اغتشاش زمان محدود استفاده گردید. به همین دلیل سیستم حلقه بسته با کنترل پیشنهادی و در حضور عدم قطعیت‌های موجود، دارای پایداری مجانبی زمان محدود است. حضور رؤیتگر باعث شد تا تخمین دقیقی از اغتشاش خارجی در دسترس باشد، این امر وجود پدیده نامطلوب لرزش در ورودی کنترل را برطرف نموده و دامنه ورودی کنترل را کاهش می‌دهد. در ساختار راهکار پیشنهادی نوآوری‌هایی نهفته است که با جزئیات در مقاله تشریح گردید. شبیه‌سازی‌های ۳ مرحله‌ای ارائه‌شده، عملکرد مطلوب راهکار پیشنهادی را در فرایند تشخیص و کنترل فرایند تحریک سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی الکترومکانیکی نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] N. Barbour and G. Schmidt, "Inertial sensors technology trends," in *Proc. of IEEE. on Auto. Underwater Vehi.*, pp. 55-62, Cambridge, MA, USA, 21-21 Aug. 1998.
- [2] C. Acar, *Four Degrees of Freedom Micromachined Gyroscope*, Tech. Rep. MSL-01003, University of California, 2001.
- [3] C. Acar and A. Shkel, *MEMS Vibratory Gyroscopes: Structural Approaches to Improve Robustness*, Springer, USA, 2009.
- [4] C. C. Painter and A. M. Shkel, "Active structural error suppression in MEMS vibratory rate integrating gyroscopes," *IEEE Sen. J.*, vol. 3, no. 5, pp. 595-606, Oct. 2003.
- [5] Q. Zheng, L. Dong, D. H. Lee, and Z. Gao, "Active disturbance rejection control for MEMS gyroscopes," *IEEE Trans. on Cont. Sys. Tech.*, vol. 17, no. 6, pp. 1432-1438, Apr. 2009.
- [6] R. P. Leland, "Adaptive control of a MEMS gyroscope using Lyapunov methods," *IEEE Trans. on Cont. Sys. Tech.*, vol. 14, no. 2, pp. 278-283, Mar. 2006.
- [7] J. Fei and J. Zhou, "Robust adaptive control of MEMS triaxial gyroscope using fuzzy compensator," *IEEE Trans. on Sys. Man and Cyb. Part B*, vol. 42, no. 6, pp. 1599-1607, May 2012.
- [8] Z. Song, H. Li, and K. Sun, "Adaptive dynamic surface control for MEMS triaxial gyroscope with nonlinear inputs," *Non. Dyn. J.*, vol. 78, no. 1, pp. 173-182, May 2014.