

کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال فضاپیمای انعطاف‌پذیر با استفاده از مشاهده‌گر تطبیقی مبتنی بر شبکه

عصبی توابع پایه شعاعی

مرضیه اقلیمی دژ^۱، میلاد عظیمی^{۲*}، علیرضا علیخانی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران. رایانامه: eghlimi@sun.ari.ac.ir

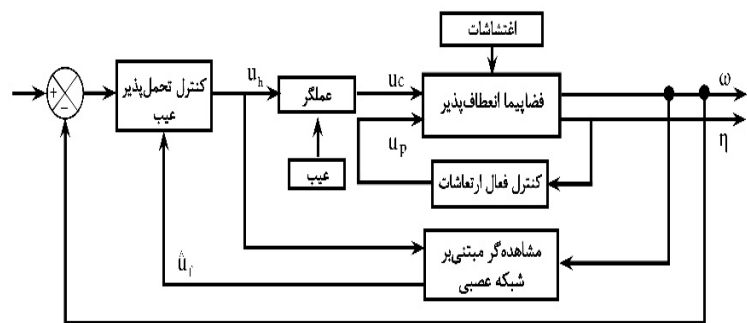
^{۲*} استادیار، پژوهشگاه هوافضا وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران رایانامه: azimi.m@ari.ac.ir

^۳ دانشیار پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران. رایانامه: aalikhani@ari.ac.ir

چکیده گرافیکی

برجسته‌ها

- توسعه مشاهده‌گر تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی توابع پایه شعاعی جهت تخمین عیب عملگر
- توسعه الگوریتم کنترل تحمل‌پذیر عیب مود لغزشی PID
- پیاده‌سازی الگوریتم کنترل تحمل‌پذیر عیب بر یک سیستم با دینامیک کاملاً کوپل صلب-انعطاف‌پذیر



چکیده

در این مقاله به طراحی و توسعه الگوریتم کنترل تحمل‌پذیر عیب مود لغزشی و مشاهده‌گر تطبیقی، جهت مقابله با نامعینی‌های سیستم، عیب عملگر و اغتشاشات خارجی برای یک فضاپیمای انعطاف‌پذیر پرداخته شده است. جهت تخمین عیب عملگرهای وضعیت، یک مشاهده‌گر تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی طراحی شده است. عملکرد این مشاهده‌گر با یک مشاهده‌گر یادگیری تکرارشونده مقایسه شده است. کنترل تحمل‌پذیر عیب پیشنهادی از یک سطح لغزش PID جهت افزایش عملکرد، قوام و پاسخ زمانی سریع برای یک فضاپیمای انعطاف‌پذیر با عیب عملگر بهره می‌برد. علاوه بر این، الگوریتم کنترل فعال ارتعاشات فیدبک نرخ کرنش جهت کاهش موثر ارتعاشات با استفاده از عملگرها و حسگرهای پیزوالکتریک نیز طراحی شده است. پایداری سیستم حلقه بسته با استفاده از قضیه لیاپانوف مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از ویژگی‌های کلیدی رویکرد پیشنهادی، سادگی آن و همچنین توانایی آن جهت پایدارسازی سیستم با در نظر گرفتن خطا و توانایی تخمین عیب عملگر با حداقل بار محاسباتی است. شبیه‌سازی‌ها در قالب یک مطالعه مقایسه‌ای، عملکرد، قوام و تحمل‌پذیری عیب رویکرد پیشنهادی، برای یک سیستم با دینامیک کاملاً کوپل صلب انعطاف‌پذیر را نمایش می‌دهد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷

کلید واژه‌ها:

دینامیک صلب-انعطاف‌پذیر

شبکه عصبی توابع پایه شعاعی

کنترل تحمل‌پذیر عیب مود لغزشی

کنترل فعال ارتعاشات

فضاپیمای انعطاف‌پذیر

مشاهده‌گر عیب عملگر تطبیقی

استاد: اقلیمی دژ مرضیه، عظیمی میلاد، علیخانی علیرضا. کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال فضاپیمای انعطاف‌پذیر با استفاده از مشاهده‌گر تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی توابع

پایه شعاعی. مکانیک هوافضا. (۱۴۰۴)؛ ۲۱(۲): ۳۷-۵۲. DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1476>

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع)

نویسندگان



۱- مقدمه

غیرخطی با امروزه سامانه‌های پیشرفته فضایی رفتاری پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی دارند و کنترل آن‌ها چالش برانگیز است. از طرف دیگر، انواع نامعینی‌ها، عیوب و اغتشاشات خارجی منجر به افزایش بیشتر پیچیدگی‌های سیستم می‌شوند، چرا که می‌توانند بر دینامیک سیستم تأثیر بگذارند. هدف توسعه تکنیک‌های کنترلی، قابلیت اطمینان بالا جهت تنظیم موثر رفتار سیستم‌های با دینامیک پیچیده مانده فضاپیماهای انعطاف‌پذیر است. چندین رویکرد کنترلی جهت مقابله با چالش‌های کنترل چنین سیستم‌هایی با نامعینی‌های مختلف (مانند دینامیک مدل نشده، تغییرات در پارامترهای سیستم، اغتشاشات داخلی و خارجی و عیوب عملگر) پیشنهاد شده‌اند [۱-۳].

فضاپیماهای انعطاف‌پذیر تحت شرایط عملیاتی مختلف و غیرقابل پیش‌بینی می‌توانند دچار عیب یا خرابی حسگرها و عملکرد نادرست عملگرها شوند. چنین عیوبی می‌تواند سیستم را از نظر عملکردی و ایمنی دچار مشکل کند. در نتیجه، پژوهشگران تلاش‌های قابل توجهی را برای توسعه تکنیک‌های کنترلی تحمل‌پذیر عیب اختصاص داده‌اند که پایداری، عملکرد و ایمنی سیستم را در صورت وجود خطا تضمین می‌کند [۴].

کنترل تحمل‌پذیر عیب، با توجه به قابلیت اطمینان و ایمنی بالا در سامانه‌های فضایی مورد توجه محققان قرار گرفته است. به طور کلی کنترل تحمل‌پذیر عیب می‌تواند به دو روش فعال و غیرفعال طبقه‌بندی شود. روش کنترل تحمل‌پذیر عیب غیرفعال تنها توانایی تحمل شرایط خاصی از عیب را داراست و به عنوان یک طرح کنترلی نسبتاً ضعیف در نظر گرفته می‌شود. از طرف دیگر، کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال می‌تواند به صورت مقاوم در برابر عیوب ناشناخته عملگر با انتخاب یا ایجاد یک ساختار کنترلی جدید، اثرات عیب را جبران نماید [۵]. کنترل تحمل‌پذیر عیب غیرفعال اثرات عیب را سریعتر از کنترلر فعال جبران می‌کند زیرا نیازی به بازخورد مقدار تخمینی عیب ندارد. بنابراین، به یک کنترلر با قوام بالا نیاز دارد تا بالاترین اثرات عیب را در سیستم کاهش دهد [۶].

یکی از رویکردهای کنترلی رایج مقاوم به نامعینی‌های سیستم، روش کنترل مود لغزشی است. از جمله ویژگی‌های منحصر به فرد کنترل مود لغزشی، تحمل‌پذیری آن نسبت

به عیب سیستم است [۷]. کنترل مود لغزشی کلاسیک در شرایطی که دینامیک سیستم ناقص و یا نامعین هستند، موثر و کاربردی می‌باشند [۸]. از طرف دیگر، کنترل مود لغزشی انتگرالی^۱ انحرافات منیفولد لغزشی^۲ را در طول فرآیند سوئیچینگ حذف می‌کند، که میزان گشتاور کنترلی اولیه را در مقایسه با کنترل مود لغزشی کلاسیک کاهش می‌دهد [۹]. الگوریتم کنترل مود لغزشی PID همه مزایایی را که در بالا مورد بحث قرار گرفت، از جمله پاسخ زمانی سریع، کاهش حساسیت به تغییرات پارامترهای سیستم و عدم نیاز به اطلاعات از اغتشاشات خارجی را ارائه می‌کند [۱۰، ۱۱]. این نکته حائز اهمیت است که کنترل مود لغزشی کلاسیک به دانش دقیقی از دینامیک و پارامترهای سیستم متکی است و هرگونه نامعینی یا تغییراتی در سیستم می‌تواند منجر به کاهش عملکرد شود.

در کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال، بخشی به نام تشخیص و جداسازی عیب ضروری است که طبق مطالعات اخیر، شامل رویکردهایی مانند فیلترها [۱۲]، مشاهده‌گرها^۳ [۱۳] و هوش مصنوعی [۱۴] است. بسیاری از محققان به منظور اطمینان از عملکرد سیستم، کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال را با استفاده از مشاهده‌گرها بررسی کرده‌اند. به عنوان نمونه می‌توان به کنترل مود لغزشی [۱۵، ۱۶]، کنترل پیش‌بین^۴ [۱۷] و کنترل تطبیقی [۱۸] اشاره نمود. لوزا و همکاران^۵ یک طرح کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال با استفاده از مشاهده‌گر مود لغزشی و کنترل پس‌گام^۶ توسعه داده‌اند [۱۹]. شن و همکاران^۷ از رویکرد کنترل تحمل‌پذیر عیب مود لغزشی فعال برای یک سیستم نامعین عیوب عملگر

استفاده کرده‌اند [۲۰]. گائو و همکاران^۸ نیز یک طرح کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال برای مقابله با اثرات نامطلوب عیوب حسگر بر روی یک فضاپیمای انعطاف‌پذیر پیشنهاد داده‌اند [۲۱]. با ظهور هوش مصنوعی و یادگیری ماشین^۹،

^۱ Integral sliding mode control^۲ Sliding manifold^۳ Observers^۴ Model predictive control^۵ Loza et al^۶ Backstepping control^۷ Shen et al^۸ Gao et al^۹ Machine learning

کنترل تطبیقی [۳۳] گزارش شده است. در میان روش‌های مذکور، روش فیدبک نرخ کرنش نسبت به روش‌های معرفی شده، علاوه بر ساختار ساده، ناحیه میرایی فعال گسترده‌تری داشته و توانایی پایداری بیش از یک مود ارتعاشی را دارد [۳۲].

در این مقاله، کنترل تحمل‌پذیر عیب مود لغزشی PID به همراه یک مشاهده‌گر تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی توابع پایه شعاعی و کنترل فعال ارتعاشات جهت پایداری‌سازی فضاپیماي انعطاف‌پذیر برای مقابله با اغتشاشات خارجی، نامعینی‌های سیستم و عیوب عملگر پیشنهاد شده است. اولین گام، توسعه مشاهده‌گر مبتنی بر شبکه عصبی جهت تخمین اختلاف گشتاور ناشی عیب عملگر است. طرح کنترل پیشنهادی علاوه بر ارائه یک رویکرد ساده و موثر برای تحمل‌پذیری عیب، دارای نکات بدیع زیر است:

الگوریتم به‌روزرسانی شبکه عصبی برای تخمین عیب عملگر در مقایسه با مشاهده‌گرهای مبتنی بر یادگیری موجود، پیشنهاد شده است. به طور معمول، مشاهده‌گرهای مبتنی بر یادگیری مقادیر تخمینی خود را بر اساس اطلاعات گذشته و فعلی به دست می‌آورند. در مقابل این الگوریتم‌ها، الگوریتم پیشنهادی مشاهده‌گر مبتنی بر شبکه عصبی به گونه‌ای توسعه داده شده است که می‌تواند سرعت زاویه‌ای را بر اساس مشاهده‌گر مبتنی بر مود لغزشی تخمین بزنند. مشاهده‌گر پیشنهادی عملکرد بهتری را در تخمین دقیق عیب عملگر نشان می‌دهد.

همچنین این الگوریتم، کاهش قابل توجهی در بار محاسباتی در مقایسه با مشاهده‌گرهای مبتنی بر یادگیری ارائه می‌دهد.

این مقاله با توجه به ساختار زیر سازماندهی شده است. در بخش ۲، مدل دینامیکی سیستم ارائه شده است. در بخش ۳، به منظور مقابله با عیوب عملگر، مشاهده‌گر توسعه یافته است. در بخش ۴ نیز کنترل تحمل‌پذیر عیب مود لغزشی PID و کنترل فعال ارتعاشات پیشنهاد شده است. در بخش ۵، نتایج شبیه‌سازی‌های عددی برای نمایش اثربخشی رویکردهای پیشنهادی مورد بحث قرار گرفته است. در آخر نیز نتیجه‌گیری ارائه شده است.

رویکردهای جدیدی برای رفع مسائل مربوط به بار محاسباتی زیاد، پیچیدگی و چالش‌های پیاده‌سازی در سیستم‌های پیچیده پدید آمده است. علاوه بر این، در میان تمام رویکردهای مرسوم، شبکه‌های عصبی پتانسیل قابل توجهی را برای افزایش فرآیند تخمین نامعینی‌ها و عیب در سیستم‌های کنترل نشان داده‌اند [۲۲، ۲۳]. شبکه‌های عصبی، دسته‌ای از مدل‌های محاسباتی هستند که به دلیل توانایی‌شان در گرفتن الگوهای پیچیده از داده‌ها، به‌طور گسترده در زمینه‌های مختلف استفاده شده‌اند. در سال‌های اخیر، این روش‌ها در زمینه کنترل تحمل‌پذیر عیب برای یادگیری و انطباق با تغییرات رفتار سیستم ناشی از عیوب استفاده شده‌اند [۲۴]. این رویکرد که به عنوان کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال شبکه‌های عصبی (NN-AFTC) ^۱ شناخته می‌شود، با هدف ایجاد استراتژی‌های کنترلی که نه تنها تأثیر عیوب را کاهش می‌دهد، بلکه با تغییرات پارامترهای دینامیک سیستم در زمان واقعی سازگار می‌شود. پتانسیل NN-AFTC، در مدیریت سیستم‌های پیچیده، غیرخطی و متغیر با زمان و در عین حال سازگاری دینامیک با عیوب پیش‌بینی نشده است. همچنین، از رویکردهای پیشنهادی کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال شبکه‌های عصبی می‌توان به شبکه عصبی توابع پایه شعاعی ^۲ [۲۵]، شبکه عصبی ویولت ^۳ [۲۶] و شبکه عصبی چبیشف ^۴ [۲۷] اشاره نمود.

کنترل فعال ارتعاشات با مواد پیزوالکتریک به عنوان راهکاری مناسب برای فضاپیماهای انعطاف‌پذیر جهت کاهش ارتعاشات استفاده شده است [۲۸]. مواد پیزوالکتریک

علاوه بر سبکی، دارای پاسخ فرکانسی بالا و مصرف انرژی کم هستند. این مواد هنگام اعمال بار الکتریکی تغییر شکل قابل توجهی از خود نشان می‌دهند و در صورت تغییر شکل، بار الکتریکی تولید می‌کنند [۲۹]. تکنیک‌های مختلفی از کنترل فعال ارتعاشات مانند کنترل فیدبک موقعیت مثبت ^۵ [۳۰]، فیدبک سرعت ^۶ [۳۱]، فیدبک نرخ کرنش ^۷ [۳۲]،

^۱ Neural network-active fault tolerant control (NN-AFTC)

^۲ Radial basis function neural network

^۳ Wavelet neural network

^۴ Chebyshev neural network

^۵ Positive position feedback (PPF)

^۶ Velocity feedback

^۷ Strain rate feedback (SRF)

۲- مدل‌سازی دینامیکی

که در آن ماتریس کاهش اثربخشی عیب عملگر به صورت $0 \leq e_i \leq 1, (i = \mathbf{E}(t) = \text{diag}[e_x, e_y, e_z] \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ $x, y, z)$ تعریف شده است. پارامترهای \mathbf{u}_f و \mathbf{u}_h به ترتیب گشتاور کنترلی مورد نظر و اختلاف گشتاور ناشی از عیوب عملگر می‌باشند.

به منظور توسعه کنترلر و مشاهده‌گر، لازم است فرضیات زیر در نظر گرفته شود:

فرض ۱: ماتریس جرم \mathbf{M}_{RR} یک ماتریس مثبت معین است.
فرض ۲: اغتشاشات خارجی با مقدار $d_{e,max}$ محدود در نظر گرفته شده است $\|\mathbf{d}_e\| \leq d_{e,max}$.

فرض ۳: حرکت بخش‌های انعطاف‌پذیر $\|\boldsymbol{\eta}_k\|$ و مشتق اول آن $\|\dot{\boldsymbol{\eta}}_k\|$ نیز محدود در نظر گرفته شده است.

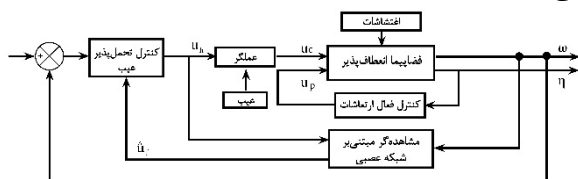
فرض ۴: مشتق مرتبه اول سرعت زاویه‌ای $\dot{\boldsymbol{\omega}}(t)$ محدود است. علاوه‌براین، تابع غیرخطی $\mathbf{C}_{RR}\boldsymbol{\omega}$ به طور یکنواخت $\forall \boldsymbol{\omega} \in \mathbb{R}^3$ با ثابت لپشیتز^۱ $\phi > 0$ محدود شده است. بنابراین می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۳۵]:

$$\|\mathbf{C}_{RR}\boldsymbol{\omega}(t) - \mathbf{C}_{RR}\hat{\boldsymbol{\omega}}(t)\| \leq \phi \|\boldsymbol{\omega} - \hat{\boldsymbol{\omega}}\| \quad (۴)$$

$(\boldsymbol{\omega}, \hat{\boldsymbol{\omega}} \in \mathbb{R}^3)$

۳- طراحی مشاهده‌گر

این بخش یکی از رویکردهای پرکاربرد تخمین دینامیک نامعین و توابع غیرخطی را با استفاده از شبکه‌های عصبی معرفی می‌کند. شبکه‌های عصبی توانایی تخمین عیوب عملگر را دارد. شکل ۱ شماتیک طرح پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: ساختار شماتیک مشاهده‌گر/کنترلر

۳-۱- تئوری شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی توابع پایه شعاعی، توابع نامعین و پیوسته را به خوبی تخمین می‌زنند [۳۶، ۳۷]. علاوه‌براین، شبکه‌های عصبی توابع پایه شعاعی توانایی تخمین بخش نامعین توابع غیرخطی را با دقت دلخواه دارند. به همین منظور تخمین عیوب و نامعینی‌های عملگر با استفاده از این

فضای پدیده انعطاف‌پذیر شامل بدنه صلب اصلی و پنل‌های انعطاف‌پذیر متقارن به عنوان یک سیستم غیرخطی و نامعین در نظر گرفته می‌شود. عملکرد جسم صلب به صورت دوران چند محوره است و پنل‌های انعطاف‌پذیر از نظریه تیر اوپلر-برنولی پیروی می‌کنند. با استفاده از رویکرد همپلتون و روش مود فرضی، معادله حرکت برای یک فضای پدیده انعطاف‌پذیر به صورت زیر است [۳۴]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{RR} & \mathbf{M}_{RF} \\ \mathbf{M}_{FR} & \mathbf{M}_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\omega}} \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{RR} & \mathbf{C}_{RF} \\ \mathbf{C}_{FR} & \mathbf{C}_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{\eta}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi \\ \boldsymbol{\eta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_c + \mathbf{d}_e \\ \mathbf{u}_p + \mathbf{d}_f \end{bmatrix} \quad (۱)$$

$$\mathbf{A}_p^s = g \mathbf{N}^{-1} \mathbf{P}^T \boldsymbol{\eta}_p^s$$

بطوریکه در آن \mathbf{M} ، \mathbf{C} و \mathbf{K} به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی را نشان می‌دهند. پارامتر $\mathbf{u}_c \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ گشتاور کنترلی، $\mathbf{d}_e \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ اغتشاشات خارجی و $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z] \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ سرعت‌های زاویه‌ای را نشان می‌دهند. مولفه‌های وابسته به پنل‌های انعطاف‌پذیر شامل اغتشاشات خارجی $\mathbf{d}_f \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ و $\boldsymbol{\eta}$ ، k امین مختصات تعمیم یافته می‌باشند. پارامترهای \mathbf{A} ، \mathbf{N} و \mathbf{P} را می‌توان به مولفه‌های حسگر و عملگر مربوط به ولتاژهای وصله‌های پیزوالکتریک تقسیم کرد و g تقویت‌کننده بهره است. اندیس‌های s نشان دهنده حسگر پیزوالکتریک است، در حالیکه اندیس‌های R و F به ترتیب نشان‌دهنده دینامیک بدنه صلب و انعطاف‌پذیر می‌باشند. همچنین، برای نمایش وضعیت فضای پدیده از کوآرنیون‌ها $\mathbf{q} = [q_0 \mathbf{q}_{1:3}]^T \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ استفاده شده است که می‌توان با توجه به رابطه زیر آن‌ها را به بردار سرعت زاویه‌ای مرتبط ساخت:

$$\dot{\mathbf{q}}(t) = \frac{1}{2} [-\mathbf{q}_{1:3}^x \boldsymbol{\omega} \quad (q_0 \mathbf{I}_{3 \times 3} + \mathbf{q}_{1:3}^x) \boldsymbol{\omega}] \quad (۲)$$

که در آن نشان‌دهنده ماتریس پادمتقارن $\mathbf{q}_{1:3}^x$ است. گشتاور واقعی تولید شده با وجود عملگرهای معیوب را می‌توان به صورت زیر مدل کرد:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_c &= \mathbf{E}(t) \mathbf{u}_h \\ &= \mathbf{u}_h + (\mathbf{E}(t) - \mathbf{I}_{3 \times 3}) \mathbf{u}_h \\ &= \mathbf{u}_h + \mathbf{u}_f \end{aligned} \quad (۳)$$

^۱ Lipchitz

۲-۳- مشاهده‌گر تخمین عیب مبتنی بر شبکه عصبی توابع پایه شعاعی

در این بخش به طراحی یک مشاهده‌گر تخمین عیب شبکه عصبی توابع پایه شعاعی با الگوریتم‌های به روزرسانی تطبیقی برای یک فضاپیما با دینامیک کاملاً کوپل صلب-انعطاف‌پذیر ناقص عملگر جهت تخمین بردار عیب عملگر \mathbf{u}_f پرداخته شده است. دینامیک سیستم ناقص عملگر زیر را در نظر بگیرید:

$$\mathbf{M}_{RR}\dot{\boldsymbol{\omega}} = -\mathbf{C}_{RR}\boldsymbol{\omega} - \mathbf{M}_{RF}\dot{\boldsymbol{\eta}}_k - \mathbf{C}_{RF}\dot{\boldsymbol{\eta}}_k + \mathbf{u}_h + \hat{\mathbf{u}}_f + \mathbf{d}_e \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{u}}_f = \mathbf{W}_f^* \mathbf{h}_f(\mathbf{x}_f) + \boldsymbol{\varepsilon}_{0,f}$$

بطوریکه در آن $\hat{\mathbf{u}}_f(t) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ نشان دهنده عیب تخمینی عملگر و $\mathbf{x}_{f,i} = [\dot{\boldsymbol{\omega}}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i \cdot -1]$ ورودی شبکه را نشان می‌دهد. برای تخمین خطاهای عملگر و سرعت زاویه‌ای، مشاهده‌گر مبتنی بر روش مود لغزشی پیشنهاد شده است:

$$\mathbf{M}_{RR}\dot{\hat{\boldsymbol{\omega}}} = -\mathbf{C}_{RR}\hat{\boldsymbol{\omega}} - \mathbf{M}_{RF}\dot{\boldsymbol{\eta}}_k - \mathbf{C}_{RF}\dot{\boldsymbol{\eta}}_k + \mathbf{u}_h + \hat{\mathbf{u}}_f + \lambda_1(\boldsymbol{\omega} - \hat{\boldsymbol{\omega}}) + \lambda_2 \text{sgn}(\boldsymbol{\omega} - \hat{\boldsymbol{\omega}}) \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{u}}_f = \hat{\mathbf{W}}_f \mathbf{h}_f(\mathbf{x}_f) + \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}$$

بطوریکه در آن $\hat{\boldsymbol{\omega}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ تخمینی از سرعت زاویه‌ای، λ_1 یک ثابت مثبت و $\lambda_2 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ یک ماتریس مثبت معین است که به کران بالای اغتشاشات وابسته است. عبارت $\hat{\mathbf{W}}_f \mathbf{h}_f(\mathbf{x}_f) + \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}$ مقدار تخمینی کاهش اثر بخشی عملگر را به واسطه خطا نشان می‌دهد. با توجه به الگوریتم‌های به روزرسانی تطبیقی، داریم:

$$\dot{\hat{\mathbf{W}}}_f = -\frac{1}{\xi_1} \mathbf{h}_f(\mathbf{x}_f) \tilde{\boldsymbol{\omega}}^T \mathbf{P}_1 - \hat{\mathbf{W}}_f \quad (12)$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}}_{0,f} = -\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f} - \frac{1}{c_0} \mathbf{P}_1 \tilde{\boldsymbol{\omega}}$$

که در آن ξ_1 و c_0 ثابت‌های مثبت و \mathbf{P}_1 یک ماتریس مثبت معین است. دو متغیر جدید به عنوان خطاهای تخمین سرعت زاویه‌ای و اختلاف گشتاور ناشی از عیب عملگر تعریف شده است:

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}}(t) = \boldsymbol{\omega}(t) - \hat{\boldsymbol{\omega}}(t) \quad (13)$$

$$\tilde{\mathbf{u}}_f(t) = \mathbf{u}_f(t) - \hat{\mathbf{u}}_f(t)$$

دسته از شبکه‌های عصبی صورت می‌پذیرد. تخمین شبکه عصبی توابع پایه شعاعی یک تابع غیرخطی مجهول $\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x}): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ به صورت زیر است [۳۸]:

$$\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x}) = \mathbf{W}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon}_0 \quad (5)$$

بطوریکه در آن $\mathbf{x} \in \Omega_x$ بردار ورودی از یک مجموعه Ω_x ، $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{l \times m}$ ماتریس وزنی شبکه با قابلیت تنظیم است که l و m به ترتیب نشان دهنده تعداد لایه‌ها و نرون‌ها، $\boldsymbol{\varepsilon}_0 \in \mathbb{R}^m$ خطای تقریبی محدود شده، $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = [h_1, \dots, h_i, \dots, h_l]$ نشان‌دهنده بردار توابع پایه شعاعی و h_i مطابق تابع گاوسی زیر است:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \exp\left(\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{C}_i\|}{2b_i^2}\right) \quad (6)$$

بطوریکه در آن مرکز میدان و b_i نشان دهنده عرض نامین نرون است.

با تعیین وزن ایده‌آل \mathbf{W}^* و تعداد کافی نرون m شبکه عصبی توابع پایه شعاعی می‌تواند هر تابع غیرخطی $\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x})$ را با هر دقتی تخمین بزند [۳۶]:

$$\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x}) = \mathbf{W}^{*T} \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}) \quad (7)$$

بطوریکه در آن $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x})$ خطای تقریبی محدود شده با یک ثابت مثبت $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ را مشخص می‌کند. خطای تقریبی در معادله (۷) حداقل تفاوت ممکن میان تقریب ایده‌آل $\mathbf{W}^{*T} \mathbf{h}(\mathbf{x})$ و مقدار واقعی تابع $\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x})$ را نشان می‌دهد:

$$\max \|\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x}) - \boldsymbol{\rho}(\mathbf{x}, \mathbf{W}^*)\| \leq \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (8)$$

که در آن \mathbf{W}^* به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{W}^* := \arg \min_{\mathbf{W}^* \in \mathbb{R}^{l \times m}} \left\{ \sup_{\mathbf{x} \in \Omega_x} \|\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x}) - \mathbf{W}^{*T} \mathbf{h}(\mathbf{x})\| \right\} \quad (9)$$

باید به این نکته توجه داشت که ماتریس وزنی ایده‌آل \mathbf{W}^* شبکه عصبی توابع پایه شعاعی، یک متغیر «مصنوعی»^۱ است که تنها کاربرد تحلیلی دارد و باید با استفاده از داده‌های موجود در طول فرآیند طراحی تعیین شود [۳۹].

^۱ Artificial

$$\dot{V}_1 = (\phi - \lambda_1 + \gamma_1) \|\tilde{\omega}\|^2 + \frac{1}{\gamma_1} \|\tilde{\mathbf{u}}_f\|^2 \quad (20)$$

$$- (\lambda_{2.min} - d_{max}) \|\tilde{\omega}\|$$

$$+ tr\{\tilde{\mathbf{W}}_f^T \mathbf{h}_f(x_f) \tilde{\omega}^T \mathbf{P}_1\}$$

$$+ \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}^T \mathbf{P}_1 \tilde{\omega}$$

$$- \xi_1 tr\{\tilde{\mathbf{W}}_f^T \tilde{\mathbf{W}}_f\} - c_0 \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}^T \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f} - tr\{\tilde{\mathbf{W}}_f^T \mathbf{h}_f(x_f) \tilde{\omega}^T \mathbf{P}_1\}$$

$$- \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}^T \mathbf{P}_1 \tilde{\omega}$$

با در نظر گرفتن نامساوی رابطه (۱۷) در معادله (۲۰) و ساده‌سازی آن داریم:

$$\dot{V}_1 \leq (\phi - \lambda_1 + \gamma_1) \|\tilde{\omega}\|^2 + \frac{1}{\gamma_1} \|\tilde{\mathbf{u}}_f\|^2$$

$$- (\lambda_{2.min} - d_{max}) \|\tilde{\omega}\|$$

$$- \xi_1 tr\{\tilde{\mathbf{W}}_f^T \tilde{\mathbf{W}}_f\} - c_0 \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}^T \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}$$

$$\leq (\phi - \lambda_1 + \gamma_1) \|\tilde{\omega}\|^2 + \frac{1}{\gamma_1} \|\tilde{\mathbf{u}}_f\|^2$$

$$- (\lambda_{2.min} - d_{max}) \|\tilde{\omega}\|$$

$$- \frac{\xi_1}{2} tr\{\tilde{\mathbf{W}}_f^T \tilde{\mathbf{W}}_f\} - \frac{c_0}{2} \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}^T \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f} \quad (21)$$

$$+ \frac{\xi_1}{2} tr\{\mathbf{W}_f^T \mathbf{W}_f\} + \frac{c_0}{2} \boldsymbol{\varepsilon}_{0,f}^T \boldsymbol{\varepsilon}_{0,f}$$

$$\leq (\phi - \lambda_1 + \gamma_1) \|\tilde{\omega}\|^2 + \frac{1}{\gamma_1} \|\tilde{\mathbf{u}}_f\|^2$$

$$- (\lambda_{2.min} - d_{max}) \|\tilde{\omega}\| + \frac{\xi_1}{2} \|\mathbf{W}_f\|^2$$

$$+ \frac{c_0}{2} \|\boldsymbol{\varepsilon}_{0,f}\|^2$$

در رابطه فوق $\lambda_{2.min}$ به نحوی انتخاب می‌شود که رابطه $\lambda_{2.min} \geq d_{max}$ برقرار باشد. بر اساس معادله (۲۱) می‌توان نتیجه گرفت:

$$\dot{V}_1 \leq -(-\phi + \lambda_1 - \gamma_1) \|\tilde{\omega}\|^2 + \delta \|\tilde{\mathbf{u}}_f\|^2 + \beta \quad (22)$$

بطوریکه در آن $\beta = \frac{\xi_1}{2} \|\mathbf{W}_f\|^2 + \frac{c_0}{2} \|\boldsymbol{\varepsilon}_{0,f}\|^2$ و $\delta = -1/\gamma_1$ است. با توجه به قضیه فیدبک حالت پیوسته [۴۱]، می‌توان نتیجه گرفت که خطای مشاهده‌گر ($\|\tilde{\omega}\|$ و $\|\tilde{\mathbf{u}}_f\|$) در نهایت به طور یکنواخت محدود است. در نتیجه، خطای تخمینی برای سرعت زاویه‌ای و اختلاف گشتاور ناشی از عیب عملکرد به صورت زیر محدود می‌شود:

$$\|\tilde{\omega}\| \leq \sqrt{\frac{\beta}{-\phi + \lambda_1 - \gamma_1}} \cdot \|\tilde{\mathbf{u}}_f\| \leq \sqrt{\frac{\beta}{\delta}} \quad (23)$$

با جایگذاری معادلات (۱) و (۱۱) در رابطه (۱۳) داریم:

$$\mathbf{M}_{RR} \dot{\tilde{\omega}}(t) = \mathbf{C}_{RR} \tilde{\omega} - \mathbf{C}_{RR} \omega + \tilde{\mathbf{u}}_f$$

$$- \lambda_1 (\tilde{\omega}(t)) - \lambda_2 \text{sgn}(\tilde{\omega}(t)) \quad (14)$$

$$+ \mathbf{d}_e$$

قضیه ۱. سیستم دینامیک ارائه شده در معادله (۱) و مشاهده‌گر تخمین عیب معادله (۱۱) را در نظر بگیرید. در نتیجه، بهره‌های مشاهده‌گر مطابق زیر انتخاب می‌شوند:

$$-\phi + \lambda_1 - \gamma_1 > 0, \quad \text{with } \gamma_1 \geq 0 \quad (15)$$

$$\lambda_{2.min} - d_{e.max} \geq 0$$

که در آن $\lambda_{2.min}$ کمینه مقدار ویژه ماتریس λ_2 است. بنابراین، خطاهای تخمینی $\tilde{\omega}(t)$ و $\tilde{\mathbf{u}}_f(t)$ به یک مجموعه کوچک همگرا می‌شوند.

اثبات. تابع لیاپانوف پیشنهادی به صورت زیر است:

$$V_1 = \frac{1}{2} \tilde{\omega}^T \mathbf{M}_{RR} \tilde{\omega} + \frac{1}{2} \xi_1 tr\{\tilde{\mathbf{W}}_f^T \tilde{\mathbf{W}}_f\}$$

$$+ \frac{1}{2} c_0 \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}^T \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f} \quad (16)$$

با توجه به نامساوی یانگ داریم [۴۰]:

$$\tilde{\omega}(t) \tilde{\mathbf{u}}_f(t) \leq \gamma_1 \tilde{\omega}^T(t) \tilde{\omega}(t) + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\mathbf{u}}_f^T(t) \tilde{\mathbf{u}}_f(t) \quad (17)$$

مشتق زمانی رابطه (۱۶) به صورت زیر است:

$$\dot{V}_1 = \tilde{\omega}^T \mathbf{M}_{RR} \dot{\tilde{\omega}} + \xi_1 tr\{\tilde{\mathbf{W}}_f^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f\}$$

$$+ c_0 \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}^T \dot{\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}}_{0,f} + \xi_1 tr\{\tilde{\mathbf{W}}_f^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f\}$$

$$+ c_0 \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}^T \dot{\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}}_{0,f} \quad (18)$$

با جایگذاری معادله (۱۴) و (۱۷) در رابطه (۱۸) داریم:

$$\dot{V}_1 = \tilde{\omega}^T [\mathbf{C}_{RR} \tilde{\omega} - \mathbf{C}_{RR} \omega + \tilde{\mathbf{u}}_f(t) - \lambda_1 (\tilde{\omega}(t))$$

$$- \lambda_2 \text{sgn}(\tilde{\omega}(t)) + \mathbf{d}_e]$$

$$+ \xi_1 tr\{\tilde{\mathbf{W}}_f^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f\} + c_0 \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}^T \dot{\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}}_{0,f}$$

$$+ \xi_1 tr\{\tilde{\mathbf{W}}_f^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f\} + c_0 \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}^T \dot{\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}}_{0,f}$$

$$= \phi \|\tilde{\omega}\|^2 + \gamma_1 \|\tilde{\omega}\|^2 - \lambda_1 \|\tilde{\omega}\|^2 + \frac{1}{\gamma_1} \|\tilde{\mathbf{u}}_f\|^2$$

$$- (\lambda_{2.min} - d_{max}) \|\tilde{\omega}\|$$

$$+ \xi_1 tr\{\tilde{\mathbf{W}}_f^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f\} + c_0 \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}^T \dot{\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}}_{0,f} + \xi_1 tr\{\tilde{\mathbf{W}}_f^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}}_f\}$$

$$+ c_0 \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{0,f}^T \dot{\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}}_{0,f} \quad (19)$$

با جایگذاری قوانین تطبیقی معادله (۱۲) در معادله (۱۹) داریم:

مولفه ناپیوسته کنترلی \mathbf{u}_{ftc} جهت تحمل عیب عملگر به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\mathbf{u}_{ftc} = \begin{cases} -k_s \mathbf{S} - \beta \frac{(\mathbf{S}^T \mathbf{M}_{RR}^{-1})^T}{\|(\mathbf{S}^T \mathbf{M}_{RR}^{-1})^T\|} & \text{if } \mathbf{S} \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

بطوریکه در آن k_s و β ثابت‌های مثبت هستند. قضیه ۲ برای عیوب عملگر، اغتشاشات خارجی و نامعینی‌های موجود در معادله (۱)، کنترلر می‌تواند پایداری مجانبی را تضمین کند. سپس، پارامترهای دینامیک فضاپیماى انعطاف‌پذیر ω و \mathbf{q} به صفر همگرا می‌شوند. اثبات. تابع لیاپانوف پیشنهادی زیر را در نظر بگیرید:

$$V_2 = \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{M}_{RR} \mathbf{S} \quad (29)$$

با مشتق‌گیری از معادله (۲۹) و جایگذاری روابط (۲۴) و (۲۵) در آن داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \mathbf{S}^T \mathbf{M}_{RR} \dot{\mathbf{S}} = \mathbf{S}^T \mathbf{M}_{RR} (\mathbf{M}_{RR}^{-1} (-\mathbf{C}_{RR} \omega \\ &\quad - \mathbf{M}_{RF} \ddot{\mathbf{q}}_k \\ &\quad - \mathbf{C}_{RF} \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{u}_h^* + \mathbf{d}_e) \\ &\quad + 0.5k_1(q_0 \omega + \mathbf{q}_{1:3}^x \omega) \\ &\quad + k_2 \mathbf{q}_{1:3}) \\ &= \mathbf{S}^T \left(-\mathbf{C}_{RR} \omega - \mathbf{M}_{RF} \ddot{\mathbf{q}}_k - \mathbf{C}_{RF} \dot{\mathbf{q}}_k \right. \\ &\quad + \mathbf{u}_{eq} - k_p \mathbf{q}_{1:3} - k_d \tanh\left(\frac{\omega}{p^2}\right) \\ &\quad - k_i \int \mathbf{q}_{1:3} dt - k_s \mathbf{S} - \beta \frac{(\mathbf{S}^T \mathbf{M}_{RR}^{-1})^T}{\|(\mathbf{S}^T \mathbf{M}_{RR}^{-1})^T\|} \\ &\quad \left. + \mathbf{d}_e + 0.5k_1 \mathbf{M}_{RR} (q_0 \omega + \mathbf{q}_{1:3}^x \omega) \right. \\ &\quad \left. + k_2 \mathbf{M}_{RR} \mathbf{q}_{1:3} \right) \end{aligned} \quad (30)$$

با جایگذاری کنترل تناسبی معادله (۲۷) در رابطه (۳۰) داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \mathbf{S}^T \mathbf{M}_{RR} \left(-k_p \mathbf{q}_{1:3} - k_d \tanh\left(\frac{\omega}{p^2}\right) \right. \\ &\quad \left. - k_i \int \mathbf{q}_{1:3} dt - k_s \mathbf{S} - \beta \frac{(\mathbf{S}^T \mathbf{M}_{RR}^{-1})^T}{\|(\mathbf{S}^T \mathbf{M}_{RR}^{-1})^T\|} \right. \\ &\quad \left. - \mathbf{d}_e \right) \end{aligned} \quad (31)$$

می‌توان رابطه (۲۸) را به صورت زیر ساده نمود:

$$\dot{V}_2 \leq -(\|\mathbf{M}_1\| + \|\mathbf{M}_2\|) \|\mathbf{S}\| - k_s \|\mathbf{S}\|^2 \quad (32)$$

که در آن \mathbf{M}_1 و \mathbf{M}_2 به صورت زیر تعریف شده است:

بنابراین، اثبات تکمیل می‌شود.

نکته ۱. در معادله مشاهده‌گر (۱۱)، عبارت $\lambda_2 \text{sgn}(\omega - \tilde{\omega})$ جهت افزایش قوام سیستم در برابر اغتشاشات خارجی استفاده می‌شود.

نکته ۲. با وجود ورودی‌های کنترل فضاپیما، مشاهده‌گر تخمین عیب مبتنی بر توابع پایه شعاعی، همگرایی مقادیر انتخابی، می‌توان عملکرد مشاهده‌گر مورد انتظار را به دست آورد.

۴- طراحی کنترلر

در این بخش دو الگوریتم کنترلی طراحی شده است. در طرح کنترلی اول، روش کنترل تحمل‌پذیر عیب مود لغزشی PID برای یک فضاپیماى صلب-انعطاف‌پذیر توسعه داده شده است. در طرح کنترلی دوم، روش کنترل ارتعاشات بازخورد نرخ کرنش جهت حذف ارتعاشات باقی‌مانده سیستم پیشنهاد شده است.

۴-۱- کنترل تحمل‌پذیر عیب مود لغزشی PID

جهت طراحی کنترلر مود لغزشی، سطح لغزش PID به صورت زیر پیشنهاد شده است [۴۲]:

$$\mathbf{S} = \omega + k_1 \mathbf{q}_{1:3} + k_2 \int \mathbf{q}_{1:3} dt \quad (24)$$

که در آن k_1 و k_2 ثابت‌های مثبت هستند. کنترلر تحمل‌پذیر عیب مود لغزشی PID را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\mathbf{u}_h^* = \mathbf{u}_{ftc} + \mathbf{u}_{nom} \quad (25)$$

که در آن رفتار نامی سیستم را تعیین می‌کند و \mathbf{u}_{ftc} یک کنترلر ناپیوسته است که اثرات عیب عملگر را جبران می‌کند و سیستم را به سمت منیفولد لغزشی هدایت می‌کند. کنترلر نامی سیستم را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد [۴۲]:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{nom} &= \mathbf{u}_{eq} - k_p \mathbf{q}_{1:3} - k_d \tanh\left(\frac{\omega}{p^2}\right) \\ &\quad - k_i \int \mathbf{q}_{1:3} dt \end{aligned} \quad (26)$$

که در آن k_p ، k_d و k_i ثابت‌های مثبت، p^2 تابع غیر صفر شفافیت^۱ و \mathbf{u}_{eq} کنترل تناسبی که با صفر قرار دادن مشتق اول سطح لغزش به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{eq} &= \mathbf{C}_{RR} \omega + \mathbf{M}_{RF} \ddot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{C}_{RF} \dot{\mathbf{q}}_k \\ &\quad - 0.5k_1 \mathbf{M}_{RR} (q_0 \omega + \mathbf{q}_{1:3}^x \omega) \\ &\quad - k_2 \mathbf{M}_{RR} \mathbf{q}_{1:3} \end{aligned} \quad (27)$$

^۱ Sharpness Function

تنظیم‌کننده سیگنال G_c به ولتاژ حسگر V_s تبدیل می‌شود و با ضریب بهره متناسب کنترلر به عملگرهای پیزوالکتریک اعمال می‌شود. ولتاژ خروجی حسگرهای پیزوالکتریک به صورت زیر است:

$$V_s(t) = G_c i(t) = G_c e_{31} \left(\frac{h_b}{2} + h_p \right) w_p \int_0^{L_p} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi_k(x) \dot{\eta}_k(t) dx \quad (38)$$

که در آن $i(t)$ جریان مدار، e_{31} ثابت شارژ/تنش پیزوالکتریک و Ψ_k توابع شکلی بخش‌های انعطاف‌پذیر هستند. پارامترهای w_p ، L_p ، h_p ، h_b به ترتیب ضخامت پنل، ضخامت، طول و عرض پیزوالکتریک می‌باشند. نیروی کنترل u_p تولید شده روی وصله‌های پیزوالکتریک که توسط عملگرها اعمال می‌شود با استفاده از نظریه گشتاور خمشی به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$u_p = -P^T g A_p^a = E_p d_{31} w_p \left(\frac{h_b + h_p}{2} \right) \int_0^{L_p} \frac{\partial}{\partial x} \Psi_k(x) dx V_a(t) \quad (39)$$

که در آن $V_a(t)$ ولتاژ تولید شده توسط عملگرهای پیزوالکتریک و d_{31} ثابت کرنش پیزوالکتریک می‌باشند.

۵- نتایج و شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌های عددی به منظور تأیید عملکرد کنترلرهای تحمل‌پذیر عیب‌مود لغزشی PID با استفاده از مشاهده‌گر مبتنی بر شبکه عصبی پیشنهادی همزمان با کنترل فعال ارتعاشات برای یک فضایپیمای انعطاف‌پذیر ارائه شده و با دیگر مطالعات موجود مقایسه شده است. جدول ۱ پارامترهای فضایپیمای انعطاف‌پذیر را ارائه می‌نماید و وصله‌های پیزوالکتریک با توجه به مشخصات مدل PZT-5A انتخاب شده است [۴۳].

جدول ۱: پارامترهای فضایپیمای انعطاف‌پذیر

پارامترها	واحد	مقدار
مدول یانگ	GPa	$EI = 35$
چگالی	Kg/m	$\rho_a = 2$
طول هاب	m	$a = 0.3$
طول پنل	m	$L_m = 2$
ضخامت پنل	m	$W_p = 0.3$
عرض پنل	m	$h_p = 0.0635$
ممان اینرسی	Kg/m ³	$I_x = 7.31, I_y = 13.44, I_z = 11.72$

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{M}_{RR} \left(k_p \mathbf{q}_{1:3} + k_d \tanh \left(\frac{\omega}{p^2} \right) + k_i \int \mathbf{q}_{1:3} dt \right) \quad (33)$$

$$\mathbf{M}_2 = \mathbf{M}_{RR} \left(\beta \frac{(\mathbf{S}^T \mathbf{M}_{RR}^{-1})^T}{\|(\mathbf{S}^T \mathbf{M}_{RR}^{-1})^T\|} + \mathbf{d}_e \right) \quad (34)$$

با توجه به نامساوی یانگ داریم:

$$\|\mathbf{M}_1\| \|\mathbf{S}\| \leq \frac{\alpha_1}{2} \|\mathbf{S}\|^2 + \frac{1}{2\alpha_1} \|\mathbf{M}_1\|^2 \quad (35)$$

$$\|\mathbf{M}_2\| \|\mathbf{S}\| \leq \frac{\alpha_2}{2} \|\mathbf{S}\|^2 + \frac{1}{2\alpha_2} \|\mathbf{M}_2\|^2 \quad (36)$$

که در آن α_1 و α_2 ثابت‌های مثبتی هستند. در نهایت، معادله (۲۹) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -\frac{\alpha_1}{2} \|\mathbf{S}\|^2 - \frac{1}{2\alpha_1} \|\mathbf{M}_1\|^2 - \frac{\alpha_2}{2} \|\mathbf{S}\|^2 \\ &\quad - \frac{1}{2\alpha_2} \|\mathbf{M}_2\|^2 - k_s \|\mathbf{S}\|^2 \\ &\leq -\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2 + 2k_s}{2} \right) \|\mathbf{S}\|^2 \\ &\quad - \frac{1}{2\alpha_1} \|\mathbf{M}_1\|^2 - \frac{1}{2\alpha_2} \|\mathbf{M}_2\|^2 \\ &\leq -\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2 + 2k_s}{2} \right) \|\mathbf{S}\|^2 + \rho \end{aligned} \quad (37)$$

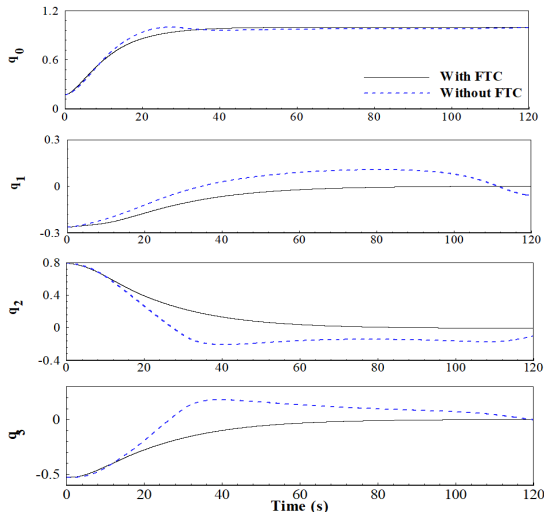
بطوریکه در آن $\rho = -\frac{1}{2\alpha_1} \|\mathbf{M}_1\|^2 - \frac{1}{2\alpha_2} \|\mathbf{M}_2\|^2$ است.

در نهایت از معادله (۳۴) می‌توان اثبات کرد که $\|\mathbf{S}\|$ به $\|\mathbf{S}\| \geq (2\rho/\alpha_1 + \alpha_2 + 2k_s)^{1/2}$ همگرا می‌شود. بنابراین، اهداف کنترلی $\omega \rightarrow 0$ و $\mathbf{q}_{1:3} \rightarrow 0$ ، $\mathbf{q}_0 \rightarrow 1$ در $t \rightarrow \infty$ را می‌توان از قضیه ۲ و فرضیات ۱ تا ۳ به دست آورد. به این ترتیب اثبات تکمیل می‌شود.

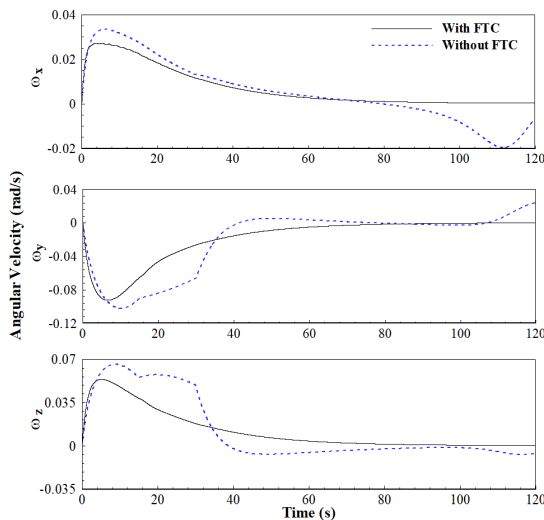
۲-۴- کنترل فعال ارتعاشات

در این بخش به طراحی الگوریتم کنترل فعال ارتعاشات با استفاده از وصله‌های پیزوالکتریک به منظور ایجاد مانورهای با دقت بالا پرداخته شده است. از آنجایی که هیچ میدان خارجی به لایه حسگر اعمال نمی‌شود، جابجایی الکتریکی ایجاد شده بر روی سطح حسگر به طور مستقیم با کرنش اعمال شده بر روی آن متناسب است. جریان خروجی حسگر پیزوالکتریک نرخ کرنش پنل‌های انعطاف‌پذیر را اندازه‌گیری می‌کند. این جریان با استفاده از یک بهره

پیشنهادی مقایسه می‌کند. شکل ۲ و ۳ به ترتیب زاویای مانور (کوآرتینون‌ها) و سرعت زاویه‌ای را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳ مشخص است، سیستم بدون کنترل تحمل‌پذیر عیب و مشاهده‌گر، در نوسان اولیه شدت پیدا می‌کند. همچنین، بعد از وقوع عیب دوم در هر دو شکل شدت نوسان افزایش پیدا کرده و در انتهای مانور دچار واگرایی می‌شود.



شکل ۲: زاویای مانور (کوآرتینون‌ها)



شکل ۳: سرعت‌های زاویه‌ای

همانطور که در شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد، در الگوریتم کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال، گشتاور کنترلی مورد نیاز اولیه بیشتر از شرایط بدون ویژگی تحمل‌پذیری عیب است. الگوریتم کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال بعد از گذشت ۲۰ ثانیه از زمان مانور، پایدار می‌شود، اما سیستم بدون الگوریتم کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال در زمان وقوع عیب

اغتصابات خارجی اعمال شده به بدنه اصلی و پنل‌های انعطاف‌پذیر به ترتیب $\mathbf{d}_f = 0.008 (\sin(10t))$ و $\mathbf{d}_e = 0.04 (\sin(0.07t))$ در نظر گرفته شده است. سناریوی عیب عملکرد به صورت زیر انتخاب شده است:

$$\mathbf{e}_i = \begin{cases} 0 & t < 15 \\ 0.75 & 15 \leq t < 30 \\ 0.3 & t \geq 30 \end{cases} \quad (40)$$

شرط اولیه سیستم به صورت $\boldsymbol{\omega}(t_0) = [0.174; -0.263; 0.789; -0.526]$ و $\mathbf{q}(t_0) = [0; 0; 0]$ در نظر گرفته می‌شود. جهت گسسته سازی تغییر شکل‌های الاستیک، سه مود انعطاف‌پذیر اول $k = 3$ مورد مطالعه قرار می‌گیرد. پارامترهای مربوط به رویکردهای کنترلی و مشاهده‌گر در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: پارامترهای کنترلی و مشاهده‌گر

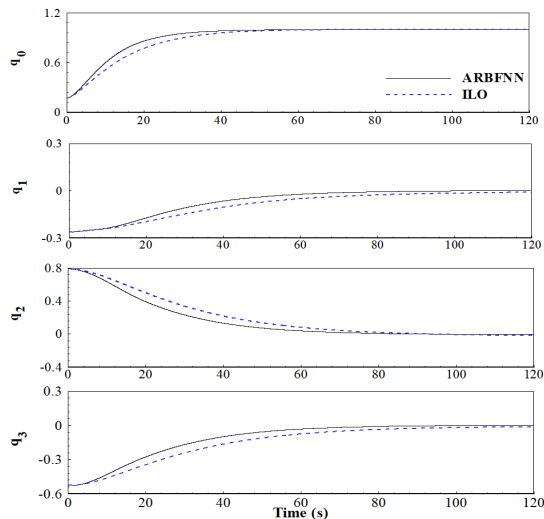
رویکردها	پارامترها و مقادیر آن‌ها
کنترل مود لغزشی PID	$k_p = k_d = 0.5$. $k_i = 0.0001$ $k = 0.1$. $p^2 = 0.1$
کنترل تحمل‌پذیر عیب	$K_s = 0.0001$. $\mathbf{D} = \mathbf{I}_{3 \times 3}$ $\beta = 0.001$
مشاهده‌گر مبتنی بر شبکه عصبی	$\lambda_1 = 30$. $c_0 = 0.9$. $\xi_1 = 0.9$ $\lambda_2 = \text{diag}[0.0001 \ 0.002 \ 0.004]$ $\mathbf{P}_1 = \text{diag}[10 \ 10 \ 10]$
کنترل فعال ارتعاشات	$G_c = 127$

به‌طور کلی ۴ حالت به‌منظور اعتبارسنجی عملکرد سیستم صورت گرفته است. اولین حالت، رفتار سیستم را با و بدون کنترل تحمل‌پذیر عیب و مشاهده‌گر مورد بررسی قرار می‌دهد. برای اعتبارسنجی عملکرد مشاهده‌گر، مشاهده‌گر مبتنی بر شبکه عصبی پیشنهادی با یک مشاهده‌گر یادگیری تکرار شونده [۴۴] به همراه کنترل تحمل‌پذیر عیب مود لغزشی PID مقایسه شده است. همچنین، در حالت بعدی برای نمایش عملکرد ایده‌آل کنترل تحمل‌پذیر عیب مود لغزشی PID با یک کنترل مود لغزشی کلاسیک [۴۵] مقایسه شده است. ذکر این نکته ضروری است که در این حالت هر دو کنترل از مشاهده‌گر مبتنی بر شبکه عصبی و کنترل فعال ارتعاشات استفاده شده است. در آخر نیز نقش کنترل فعال ارتعاشات مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های ۲-۱۶ نتایج مربوط به شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

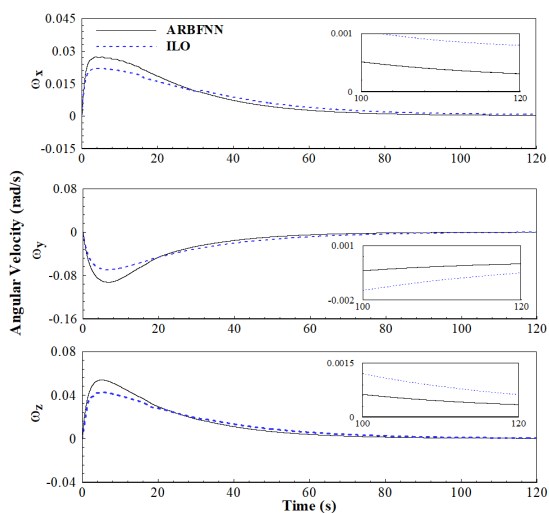
حالت (۱) کنترل و مشاهده‌گر پیشنهادی

شکل‌های ۲ تا ۵ عملکرد سیستم را با و بدون کنترل تحمل‌پذیر عیب و مشاهده‌گر مبتنی بر شبکه عصبی

پیشنهادی با استفاده از رویکرد مشاهده‌گر مبتنی بر شبکه عصبی اهداف کنترل را با دقت و زمان نشست بهتر (پس از ۶۰ ثانیه) برآورده می‌کند. علاوه بر این، بین این دو رویکرد اختلافی از منظر تعادل وجود دارد که این موضوع از نمودار سرعت‌های زاویه‌ای آشکار است. بنابراین، مشاهده‌گر پیشنهادی اندازه‌گیری‌های دقیق‌تری را ارائه کرده و همچنین به محاسبات کمتری نیاز دارد. سیگنال‌های کنترلی اعمال شده به عملگرها در شکل ۸ نشان داده شده است. بعد از وقوع عیب اول، مقدار گشتاور اولیه ۱۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. لازم به ذکر است که پنل‌های انعطاف‌پذیر تغییرات ماتریس ممان اینرسی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند و بر سیگنال کنترلی تأثیر می‌گذارند.

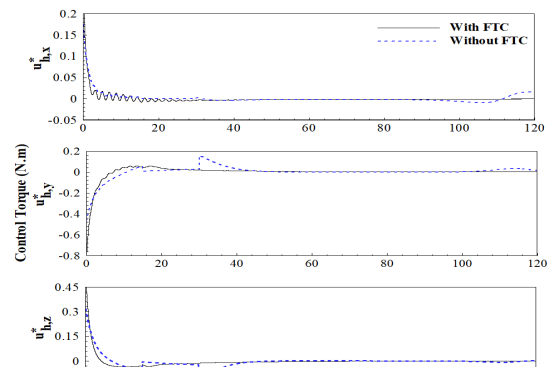


شکل ۶: زوایای مانور (کوآرتنیون‌ها)



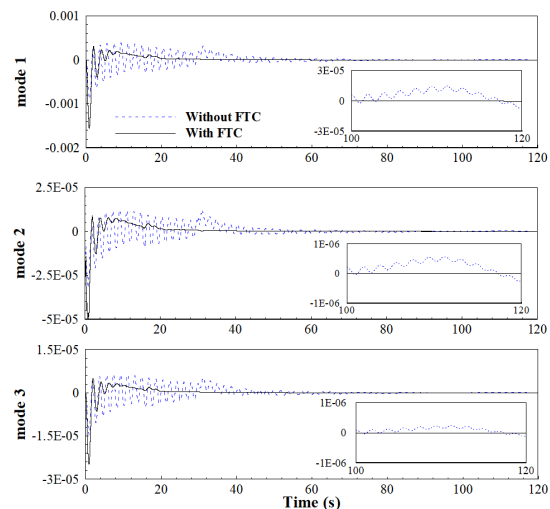
شکل ۷: سرعت‌های زاویه‌ای

دچار تغییر ناگهانی شده و در انتهای مانور دچار نوسانات بزرگی می‌شود.



شکل ۸: گشتاور کنترلی

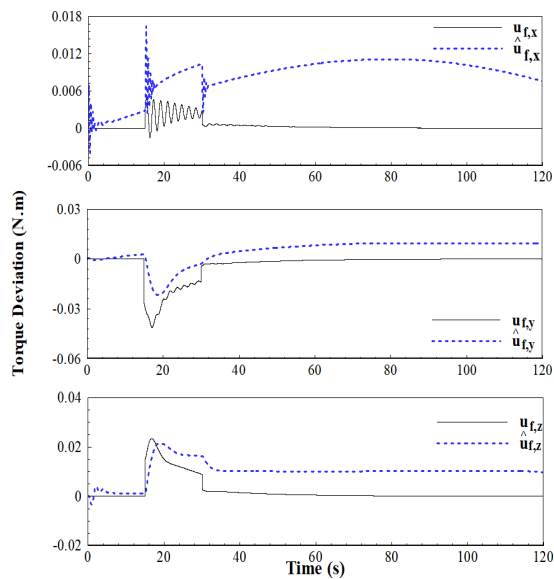
شکل ۵ نیز پاسخ زمانی ارتعاشات پنل‌های انعطاف‌پذیر را برای سه مود اول نشان می‌دهد. همانطور که می‌توان مشاهده کرد، استفاده از الگوریتم فیدبک نرخ کرنش به‌عنوان کنترل فعال ارتعاشات، منجر به کاهش نوسانات ناشی از دینامیک جسم انعطاف‌پذیر و همچنین تحریکات ناشی از دینامیک کوپل صلب-انعطاف‌پذیر شده است. باید به این نکته توجه داشت، با کاهش اثربخشی عملگرهای وضعیت، دامنه ارتعاشات افزایش یافته و مودهای فرکانس بالای سیستم تحریک می‌شوند.



شکل ۹: سه مود ارتعاشی اول

حالت ۲) عملکرد مشاهده‌گر مبتنی بر شبکه عصبی و مشاهده‌گر یادگیری تکرارشونده

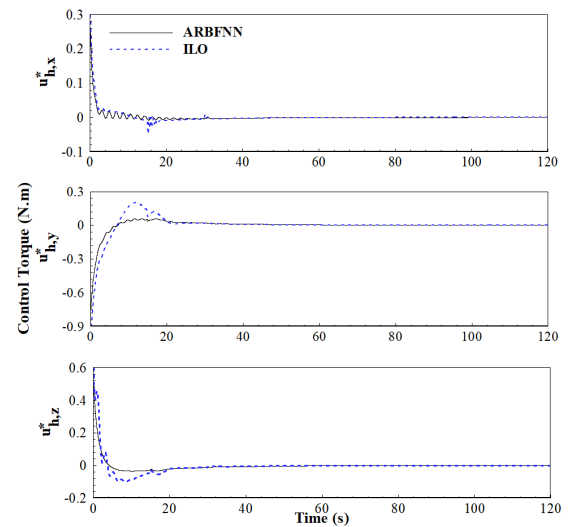
شکل‌های ۶ و ۷ پارامترهای وضعیت سیستم را جهت بررسی عملکرد مناسب مشاهده‌گر پیشنهادی بر اساس کوآرتنیون‌ها و سرعت‌های زاویه‌ای به ترتیب نشان می‌دهند. همانطور که می‌توان مشاهده کرد، کنترل تحمل‌پذیر عیب



شکل ۱۰: اختلاف گشتاور کنترلی (مشاهده‌گر یادگیری تکرار شونده)

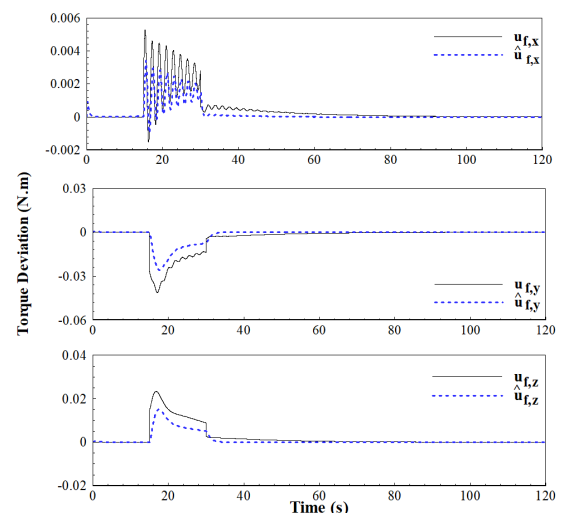
حالت ۳) مقایسه کنترل مود لغزشی PID و کلاسیک در حالت سوم، هدف تحلیل رفتار و مزایای یک کنترل تحمل‌پذیر عیب مود لغزشی PID در مقایسه با یک کنترل مود لغزشی کلاسیک از طریق شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ است. تمرکز اصلی در این حالت، تعامل بین کنترل‌های تحمل‌پذیر عیب سیستم صلب و انعطاف‌پذیر است. در این حالت، مشاهده‌گر پیشنهادی مبتنی بر شبکه عصبی برای هر دو طرح کنترلی به کار گرفته شده است.

هر دو کنترلر مود لغزشی PID و کلاسیک در شکل ۱۲ تضمین می‌کنند که سرعت‌های زاویه‌ای تقریباً در ۶۰ ثانیه به نقطه تعادل همگرا می‌شوند، اما کنترل مود لغزشی کلاسیک یک خطای حالت پایدار نزدیک به تعادل را نشان می‌دهد. سطح لغزش PID با مولفه کنترلی انتگرالی خود، خطای حالت پایدار را کاهش می‌دهد و عملکرد پایداری سیستم را بهبود می‌بخشد. این مولفه برای سیستم‌هایی که نیاز به کنترل دقیق دارند، مناسب است. یکی از مزایای کلیدی سطح لغزش PID توانایی آن در ارائه سیگنال‌های کنترل صاف و پیوسته است.

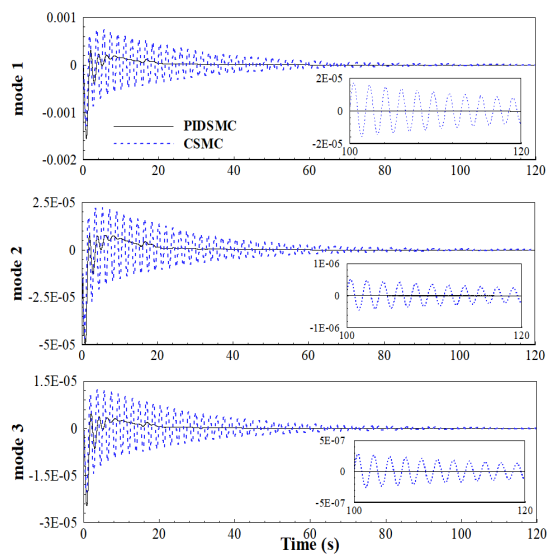


شکل ۸: گشتاور کنترلی

نتایج تخمین عیب با استفاده از مشاهده‌گر مبتنی بر شبکه عصبی در شکل ۹ و مشاهده‌گر یادگیری تکرارشونده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده‌گر پیشنهادی عیوب را با دقت بالاتر از ۹۰ درصد تخمین زده است. علاوه بر این، در برابر نویز مقاوم است و برای کاربردهای پیچیده در مسائل کاربردی مناسبتر است. از طرف دیگر، مشاهده‌گر یادگیری تکرارشونده از ابتدای مانور با دقت ۵۰ درصد توانایی تخمین عیب را دارد و بعد از وقوع عیب دوم، از نقطه تعادل به مقدار قابل توجهی فاصله می‌گیرد.



شکل ۹: اختلاف گشتاور کنترلی (مشاهده‌گر مبتنی بر شبکه عصبی)



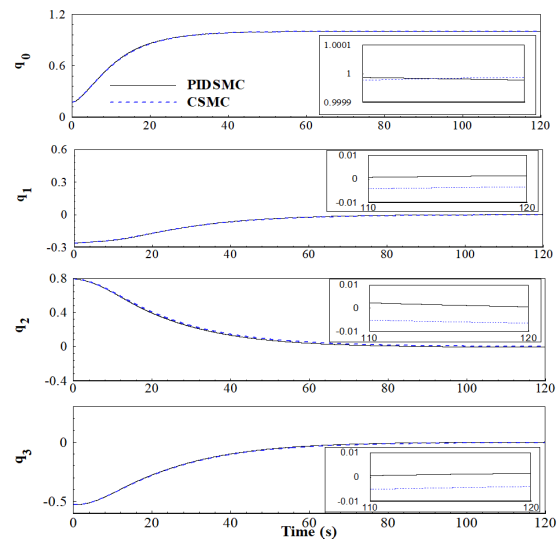
شکل ۱۴: سه مود ارتعاشی اول

از طرف دیگر، سطح لغزش PID، ترکیبی از کنترلرهای تناسبی، انتگرالی و مشتق‌گیر برای دستیابی به یک پاسخ مناسب استفاده می‌کند. بنابراین، این نوع کنترلر منجر به کاهش چترینگ و بهبود عملکرد کنترلی و همچنین دقت بالاتر می‌شود.

حالت ۴) بررسی سیستم با و بدون کنترل فعال ارتعاشات

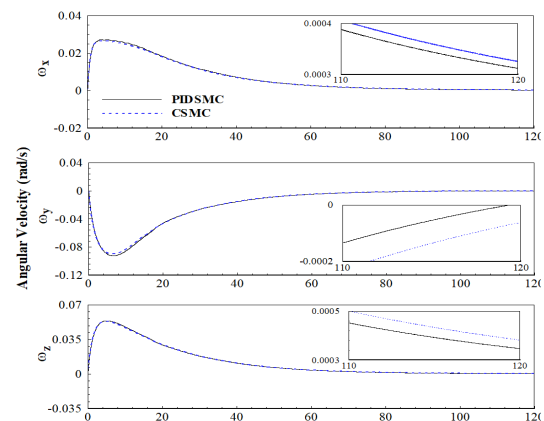
برای مقایسه بیشتر، شبیه‌سازی‌های حالت ۴ صورت گرفته تا بینش بیشتری در مورد چگونگی تأثیرپذیری عملکرد سیستم با وجود کوپلینگ دینامیک بخش‌های صلب و انعطاف‌پذیر ارائه دهد. این موضوع، یک چالش ذاتی در فضاپیماهای انعطاف‌پذیر است و وجود این تعاملات می‌تواند پایداری و کنترل سیستم را کاهش دهد. کنترل فعال ارتعاشات در کنار رویکردهای کنترلی جسم صلب می‌تواند برای بهبود عملکرد سیستم، به کار برده شود. پاسخ‌های زمانی گشتاورهای کنترلی، جابجایی مودال و ولتاژ عملگرهای پیزوالکتریک به ترتیب در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ نشان داده شده است. این نکته قابل ذکر است که کنترل ارتعاشات در حین و بعد از مانور فعال است.

گشتاور کنترلی جسم صلب با و بدون اثر کنترل فعال ارتعاشات در شکل ۱۵ نشان داده شده است. علاوه بر این، همانطور که در پاسخ زمانی سه مود ارتعاشی اول نشان داده شده است (شکل ۱۶)، فعال‌سازی کنترل فعال ارتعاشات باعث ایجاد نوسانات شدید بخش انعطاف‌پذیر نمی‌شود. در

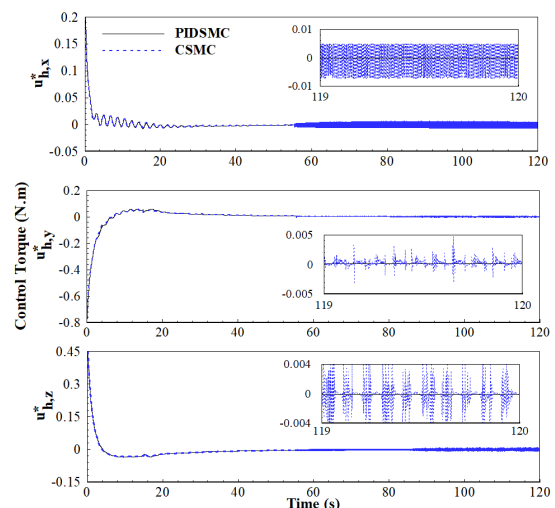


شکل ۱۱: زوایای مانور (کوآرنیون‌ها)

همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، کنترل مود لغزشی کلاسیک اغلب دچار چترینگ می‌شود. این موضوع می‌تواند باعث تحریک مودهای فرکانس بالا سیستم‌های مکانیکی با ساختار انعطاف‌پذیر شود (شکل ۱۴).



شکل ۱۲: سرعت‌های زاویه‌ای



شکل ۱۳: گشتاور کنترلی

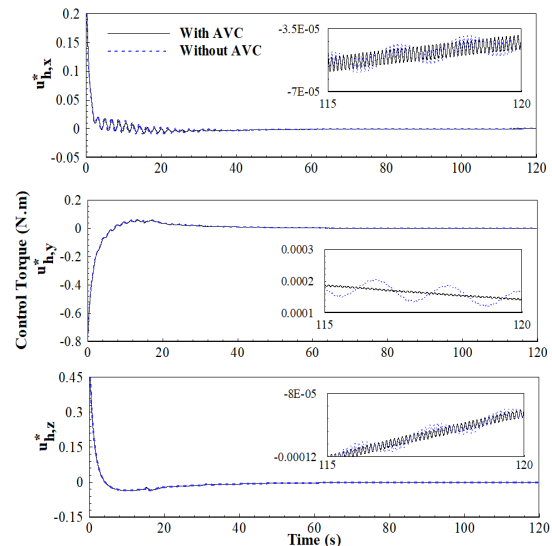
۶- نتیجه گیری

این مطالعه رویکردی برای کنترل دقیق وضعیت یک فضاپیمای انعطاف‌پذیر را با استفاده از کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال مد لغزشی و کنترل فعال ارتعاشات، ارائه می‌نماید. رویکرد پیشنهادی از یک سطح لغزش PID جهت افزایش عملکرد و قوام کنترلر وضعیت و الگوریتم فیدبک نرخ کرنش برای کاهش ارتعاشات باقی‌مانده یک فضاپیمای انعطاف‌پذیر در حضور عیوب عملکرد را مورد بررسی قرار می‌دهد. نوآوری کلیدی در این مقاله، توسعه تکنیک مشاهده‌گر تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی توابع پایه شعاعی است. مشاهده‌گر پیشنهادی عیوب عملکرد را با محاسباتی کمتر و دقت بالاتر در مقایسه با مشاهده‌گر یادگیری تکرارشونده تخمین می‌زند. به منظور پایدارسازی مودهای ارتعاشی پل‌های انعطاف‌پذیر سیستم حین و بعد از مانور، از تکنیک کنترل فعال ارتعاشات استفاده شده است. در نهایت، شبیه‌سازی‌های عددی برای اعتبارسنجی و نمایش عملکرد رویکرد پیشنهادی ارائه شد. با این وجود، پایداری حلقه بسته سیستم‌های با دینامیک کاملاً کوپل صلب-انعطاف‌پذیر در معرض خرابی عملکرد و تشخیص و تخمین دقیق عیب همچنان به عنوان یک مسئله مطرح می‌شود که محثی کلیدی و موضوعی است که در مطالعات آینده به آن پرداخته خواهد شد.

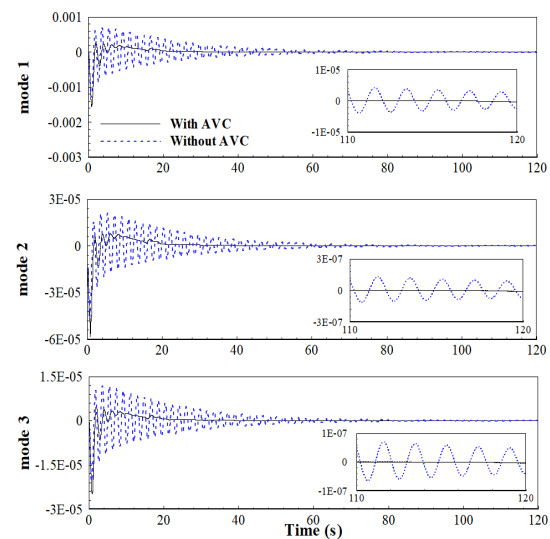
۷- مراجع

- [1] Hu H, Wang B, Cheng Z, Liu L, Wang Y, Luo X. A novel active fault-tolerant control for spacecrafts with full state constraints and input saturation. *Aerospace Science and Technology*. 2021;108:106368.
- [2] Wang Y, Liu K, Ji H. Adaptive robust fault-tolerant control scheme for spacecraft proximity operations under external disturbances and input saturation. *Nonlinear Dynamics*. 2022:1-16.
- [3] Ma Y, Jiang B, Tao G, Badihi H. Minimum-eigenvalue-based fault-tolerant adaptive dynamic control for spacecraft. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2020;43(9):1764-71.
- [4] Yin S, Xiao B, Ding SX, Zhou D. A review on recent development of spacecraft attitude fault tolerant control system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016;63(5):3311-20.
- [5] Ding SX. *Advanced methods for fault diagnosis and fault-tolerant control*: Springer; 2021.
- [6] Abbaspour A, Mokhtari S, Sargolzaei A, Yen KK. A survey on active fault-tolerant control systems. *Electronics*. 2020;9(9):1513.
- [7] Zenteno-Torres J, Cieslak J, Dávila J, Henry D. Sliding mode control with application to fault-

حالیکه، برای سیستم بدون کنترل فعال ارتعاشات، منجر به نوسانات شدید می‌شود.

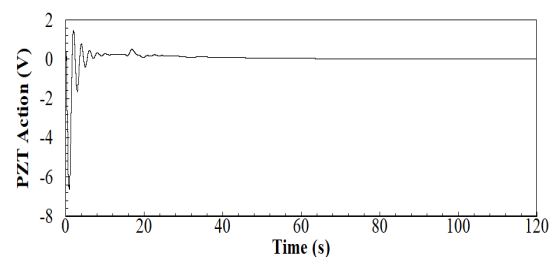


شکل ۱۵: گشتاور کنترلی



شکل ۱۶: سه مود ارتعاشی اول

. ولتاژ عملگرهای پیزوالکتریک نیز در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۷: ولتاژ عملگر پیزوالکتریک

- dynamic surface control for a class of nonlinear systems with actuator faults. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2013;22(2):338-49.
- [21] Gao Z, Han B, Jiang G, Lin J, Xu D. Active fault tolerant control design approach for the flexible spacecraft with sensor faults. *Journal of the Franklin Institute*. 2017;354(18):8038-56.
- [22] Wang S, Hui Y, Sun X, Shi D. Neural network sliding mode control of intelligent vehicle longitudinal dynamics. *Ieee Access*. 2019;7:162333-42.
- [23] Zou T, Wu H, Sun W, Zhao Z. Adaptive neural network sliding mode control of a nonlinear two-degrees-of-freedom helicopter system. *Asian Journal of Control*. 2023;25(3):2085-94.
- [24] Mokhtari S, Abbaspour A, Yen KK, Sargolzaei A. Neural network-based active fault-tolerant control design for unmanned helicopter with additive faults. *Remote Sensing*. 2021;13(12):2396.
- [25] Vo AT, Kang H-J. An adaptive neural non-singular fast-terminal sliding-mode control for industrial robotic manipulators. *Applied Sciences*. 2018;8(12):2562.
- [26] Xin W, WANG J, LI X. A Feed-Forward Wavelet Neural Network Adaptive Observer-Based Fault Detection Technique for Spacecraft Attitude Control Systems. *Chinese Journal of Electronics*. 2018;27(1):102-8.
- [27] Lu K, Li T, Zhang L. Active attitude fault-tolerant tracking control of flexible spacecraft via the Chebyshev neural network. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2019;41(4):925-33.
- [28] Song G, Agrawal BN. Vibration suppression of flexible spacecraft during attitude control. *Acta Astronautica*. 2001;49(2):73-83.
- [29] Azimi M, Sharifi G. A hybrid control scheme for attitude and vibration suppression of a flexible spacecraft using energy-based actuators switching mechanism. *Aerospace Science and Technology*. 2018;82:140-8.
- [30] Marinangeli L, Alijani F, Hosseinia SH. Fractional-order positive position feedback compensator for active vibration control of a smart composite plate. *Journal of Sound and Vibration*. 2018;412:1-16.
- [31] Omidi E, Mahmoodi SN. Vibration control of collocated smart structures using H_∞ modified positive position and velocity feedback. *Journal of Vibration and Control*. 2016;22(10):2434-42.
- [32] Zhang Q, Mills JK, Cleghorn WL, Jin J, Zhao C. Trajectory tracking and vibration suppression of a 3-PRR parallel manipulator with flexible links. *Multibody System Dynamics*. 2015;33:27-60.
- [33] Malekzadeh M, Karimpour H. Adaptive super twisting vibration control of a flexible spacecraft with state rate estimation. *Journal of Sound and Vibration*. 2018;422:300-17.
- tolerant control: assessment and open problems. *Automation*. 2021;2(1):1-30.
- [8] Cong B, Chen Z, Liu X. On adaptive sliding mode control without switching gain overestimation. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2014;24(3):515-31.
- [9] Yu X-N, Hao L-Y. Integral sliding mode fault tolerant control for unmanned surface vessels with quantization: Less iterations. *Ocean Engineering*. 2022;260:111820.
- [10] Aydin MN, Coban R. PID sliding surface-based adaptive dynamic second-order fault-tolerant sliding mode control design and experimental application to an electromechanical system. *International Journal of Control*. 2022;95(7):1767-76.
- [11] Duc MN, Trong TN, Xuan YS, editors. The quadrotor MAV system using PID control. 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA); 2015: IEEE.
- [12] Ward DG, Monaco JF, Bodson M. Development and flight testing of a parameter identification algorithm for reconfigurable control. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 1998;21(6):948-56.
- [13] Hasan A. Observer-based fault diagnosis for autonomous systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2024.
- [14] Singh V, Gangsar P, Porwal R, Atulkar A. Artificial intelligence application in fault diagnostics of rotating industrial machines: A state-of-the-art review. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023;34(3):931-60.
- [15] Li T, Zhang Y, Gordon BW. Passive and active nonlinear fault-tolerant control of a quadrotor unmanned aerial vehicle based on the sliding mode control technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2013;227(1):12-23.
- [16] Wenjie D, Dayi W, Chengrui L. Integral sliding mode fault-tolerant control for spacecraft with uncertainties and saturation. *Asian Journal of Control*. 2017;19(1):372-81.
- [17] Zhang B, Sun X, Liu S, Deng X. Distributed fault tolerant model predictive control for multi-unmanned aerial vehicle system. *Asian Journal of Control*. 2022;24(3):1273-92.
- [18] Gao S, Jing Y, Liu X, Dimirovski GM. Finite-time adaptive fault-tolerant control for rigid spacecraft attitude tracking. *Asian Journal of Control*. 2021;23(2):1003-24.
- [19] De Loza AF, Cieslak J, Henry D, Zolghadri A, Fridman LM. Output tracking of systems subjected to perturbations and a class of actuator faults based on HOSM observation and identification. *Automatica*. 2015;59:200-5.
- [20] Shen Q, Jiang B, Cocquempot V. Adaptive fuzzy observer-based active fault-tolerant

saturation limits. *Nonlinear Dynamics*. 2009;55:301-21.

- [34] Shahravi M, Azimi M. Attitude and vibration control of flexible spacecraft using singular perturbation approach. *International Scholarly Research Notices*. 2014;2014.
- [35] Xiao B, Hu Q, Wang D. Spacecraft attitude fault tolerant control with terminal sliding-mode observer. *Journal of Aerospace Engineering*. 2015;28(1):04014055.
- [36] Wen G, Chen CP, Liu Y-J, Liu Z. Neural network-based adaptive leader-following consensus control for a class of nonlinear multiagent state-delay systems. *IEEE transactions on cybernetics*. 2016;47(8):2151-60.
- [37] Battilotti S, De Santis A. Robust output feedback control of nonlinear stochastic systems using neural networks. *IEEE Transactions on neural networks*. 2003;14(1):103-16.
- [38] Fan B, Zhang Y, Chen Y, Meng L. Intelligent vehicle lateral control based on radial basis function neural network sliding mode controller. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*. 2022;7(3):455-68.
- [39] Chen CP, Wan JZ. A rapid learning and dynamic stepwise updating algorithm for flat neural networks and the application to time-series prediction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. 1999;29(1):62-72.
- [40] Zhang L, Hua C, Guan X. Distributed output feedback consensus tracking prescribed performance control for a class of non-linear multi-agent systems with unknown disturbances. *IET Control Theory & Applications*. 2016;10(8):877-83.
- [41] Corless M, Leitmann G. Continuous state feedback guaranteeing uniform ultimate boundedness for uncertain dynamic systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1981;26(5):1139-44.
- [42] Noordin A, Mohd Basri MA, Mohamed Z, Mat Lazim I. Adaptive PID controller using sliding mode control approaches for quadrotor UAV attitude and position stabilization. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2021;46:963-81.
- [43] Kuriakose VM, Sreehari V. Experimental investigation on the enhancement of vibration and flutter characteristics of damaged composite plates using piezoelectric patches. *Composite Structures*. 2021;275:114518.
- [44] Hu Q, Li B, Xiao B, Zhang Y, Hu Q, Li B, et al. Spacecraft attitude fault-tolerant control based on iterative learning observer and control allocation. *Control Allocation for Spacecraft Under Actuator Faults*. 2021:133-55.
- [45] Hu Q. Robust adaptive sliding mode attitude maneuvering and vibration damping of three-axis-stabilized flexible spacecraft with actuator

Active Fault-Tolerant Sliding Mode Control of Flexible Spacecraft Using Adaptive Observer Based on Radial Basis Functions Neural Network

M. Eghlimi Dezh¹, M. Azimi^{2*}, A.R. Alikhani³

¹ Master's degree, Aerospace Research Institute (Ministry of Science, Research and Technology), Tehran, Iran .

Email: eghlimi@sun.ari.ac.ir

^{2*} Associate Professor, Aerospace Research Institute (Ministry of Science, Research and Technology), Tehran, Iran

Email: azimi.m@ari.ac.ir.

³ Associate Professor, Aerospace Research Institute (Ministry of Science, Research and Technology), Tehran, Iran.

Email: aalikhani@ari.ac.ir

HIGHLIGHTS

- Development of an adaptive observer based on a radial basis function neural network for actuator fault estimation
- Development of a PID sliding mode fault-tolerant control algorithm
- Implementation of the fault-tolerant control algorithm on a system with fully coupled rigid-flexible dynamics.

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 24 April 2025

Received in revised form: 02 June 2025

Accepted: 11 June 2025

Available online: 08 July 2025

Keywords:

Rigid-flexible dynamics

Radial basis function neural network

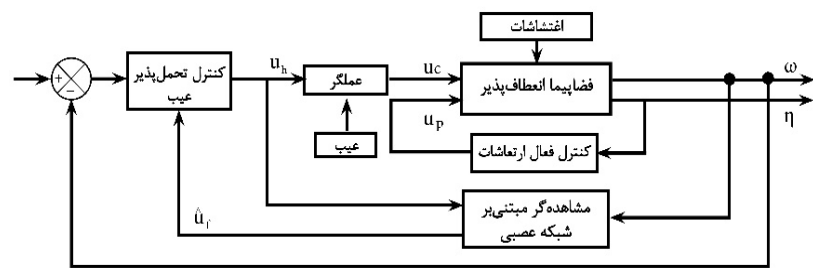
Sliding mode fault-tolerant control

Active vibration control

Flexible spacecraft

Adaptive actuator fault observer

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

This paper is focused on the design and analysis of a fault-tolerant sliding mode control algorithm together with an adaptive observer for applications to a flexible spacecraft in order to attenuate system uncertainties, actuator faults, and external disturbances. For estimation of the actuator faults, an adaptive observer is designed using a radial basis function neural network, whose performance is compared with an iterative learning observer. The proposed fault-tolerant control adopts a PID sliding surface for high performance, robustness, and fast response. Additionally, the vibration suppression control algorithm based on strain rate feedback was designed for active suppression of structural vibrations using piezoelectric actuators and sensors. Stability analysis of the closed-loop system is performed using the Lyapunov theorem to ensure its robust performance. A key feature of the proposed approach is its simplicity and its ability to stabilize the system under fault conditions while providing accurate actuator fault estimation with minimal computational burden. Simulations, presented as a comparative study, demonstrate the superior performance, robustness, and fault-tolerance of the proposed approach for a system with fully coupled rigid-flexible dynamics.

Cite this article: Eghlimi Dezh M, Azimi M, Alikhani A.R. Active Fault-Tolerant Sliding Mode Control of Flexible Spacecraft Using Adaptive Observer Based on Radial Basis Functions Neural Network. Aerospace Mechanics. 2025; 21(2):37-52.

DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1476>



Publisher: Imam Hossein University.

© The Author(s).