

علمی - ترویجی

# بررسی و کاربرد سیستم‌های کنترل پیشرفته در وسایل فضایی انعطاف‌پذیر

در این مقاله، کنترلرهای پیشرفته برای کنترل مانور و ارتعاشات سیستم‌های دینامیکی با مختصات صلب - انعطاف‌پذیر معرفی و توصیف شده است. در فرایند طراحی کنترلر، تحلیل پایداری سیستم کنترل از جمله مسائل مطرح و مهم است. کنترل فضایی‌ها با انعطاف‌پذیری یا ربات‌های انعطاف‌پذیر با دینامیک صلب و انعطاف‌پذیر چالش‌هایی همراه دارد که طراحان را به توسعه کنترلرهای پیشرفته ترغیب کرده است. هر یک از این سیستم‌های کنترلی مزایا و معایبی دارد که در این مقاله سعی شده با بررسی انواع روش‌های کنترلی و مرور کارهای انجام‌شده در این حوزه، مخاطب را با نقاط ضعف و قوت روش‌های موجود آشنا نمود.

**واژه‌های کلیدی:** کنترل مانور، کنترل ارتعاشات، دینامیک صلب - انعطاف‌پذیر، فضایی‌های انعطاف‌پذیر

صمد مرادی\*، مربی، دانشکده فنی و مهندسی،  
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال

\*نویسنده مخاطب، آدرس: تهران، کد پستی:  
۱۶۵۱۱۵۳۳۱۱

## Application of Advanced Control Systems in Flexible Space Vehicles

*This paper presents advanced controllers for maneuver and vibration control of dynamic systems with rigid-flexible coordinates. Stability analysis of such a control system is one of the important issues. The control of flexible spacecrafts or flexible manipulators with rigid-flexible body dynamics has challenges that encourage designers to develop advanced controllers. Each of these control systems has some advantages and some disadvantages. The purpose of the present paper is to study various control design methods and to review the literature by addressing the weaknesses and strengths of existing techniques.*

**Keywords:** Attitude Control, Vibration Control, Rigid-Flexible Dynamics, Flexible Spacecraft

S. Moradi\*, Educator, Islamic Azad  
University, North Tehran Branch

\*Corresponding Author, Postal Code:  
1651153311, Tehran, IRAN

S.moradi@iau-ac.ir

کنترل خطی‌ساز پسخور<sup>۱</sup>، کنترل بهینه، کنترل تطبیقی، کنترل ارتعاشات، کنترل فعال ارتعاشات، کنترل مود لغزشی، فیدبک خروجی چندنرخ، فیدبک خروجی پرئودیک، فیدبک نمونه خروجی سریع، فیدبک خروجی چندنرخ غیرمترکز پایدار و کاهش مرتبه مدل است.

### سیستم‌های کنترل خطی و خطی‌سازی

با وجود آنکه در حالت کلی معادلات حرکت سیستم‌های دینامیکی، انعطاف‌پذیری سازه‌ای غیرخطی دارند، در برخی موارد به دلیل سادگی از کنترلرهای خطی مانند PD و PID استفاده شده است. کنترلرهای خطی، علاوه بر آنکه بهره‌های ثابت و نقاط کاری محدودی دارند، قابلیت تعقیب مسیر ندارند و تنها برای دستیابی به نقطه هدف<sup>۲</sup> مناسبند [۶-۲]. گاهی هنگام استفاده از سیستم‌های کنترل خطی، معادلات غیرخطی دینامیک دستگاه، حسگرها و عملگرها حول وضعیت کاری معینی، خطی‌سازی می‌شوند [۱۱-۷]. خطی‌سازی با روش‌های مختلفی انجام می‌شود [۱۲] و روشن است که طراحی بر این اساس، تنها برای محدوده کاری خاص سیستم، معتبر است. همچنین، همیشه نمی‌توان از روی پایداری سیستم خطی‌شده درباره پایداری سیستم غیر خطی قضاوت کرد [۱۳].

### کنترل خطی‌ساز پسخور

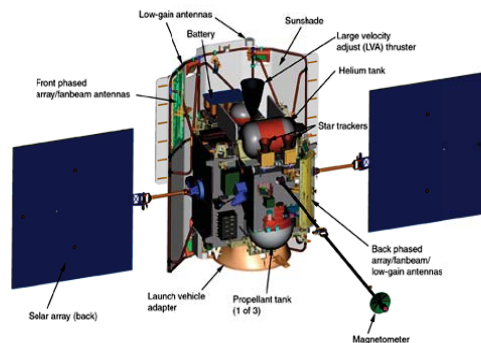
این روش که می‌توان آن را نوعی انتقال<sup>۳</sup> در نظر گرفت، در ترکیب با دیگر قوانین کنترلی، پایداری و تعقیب خوبی از خود نشان می‌دهد [۱۵-۱۴]. این نوع کنترلر نسبت به اغتشاشات<sup>۴</sup> و نامعینی‌ها<sup>۵</sup> بسیار حساس است.

### کنترل بهینه

کنترل‌کننده‌های بهینه یکی از انواع کنترلرهای غیرخطی هستند که معمولاً با هدف بهینه‌کردن مصرف انرژی یا کمینه کردن زمان یا دامنه ارتعاشات سازه‌ای به کار می‌روند [۱۹-۱۶]. این کنترلرها همیشه نمی‌توانند تعقیب کامل<sup>۶</sup> از مسیر خواسته‌شده را تضمین کنند. همچنین، در بسیاری موارد برای یافتن پاسخ بهینه، باید مسئله شرایط مرزی دو نقطه‌ای<sup>۷</sup> را حل کرد که معمولاً حل تحلیلی مناسبی برای آن وجود ندارد. مشکلاتی مانند عدم همگرایی به اکستریم مطلق<sup>۸</sup> در آنها نمایان می‌شود. این مشکلات در صورت وجود قیود نامساوی، بیشتر است. زمان

### مقدمه

امروزه از مطالعه، طراحی، ساخت، پرتاب و پرواز هواپیما و ماهواره‌ها که برای مأموریت‌های متفاوت توسط کشورهای گوناگون انجام می‌شود به عنوان ابزاری مهم و وسیله‌ای کارا برای تلاش در جهت پیشبرد دانش بشری در تمامی سطوح استفاده می‌شود. یک پرتاب مطمئن برای ماهواره پرتابی است که ماهواره و ملحقات آن را با موفقیت در مدار موردنظر قرار دهد. بعد از یک پرتاب موفقیت‌آمیز و قرارگرفتن در مدار موردنظر، ماهواره باید علاوه بر حفظ پایداری خود در این مدار با سرعت مشخص حرکت کند و مأموریت خود را انجام دهد و نه تنها از مدار تعیین‌شده خارج نشود، بلکه مزاحمتی برای دیگر ماهواره‌های مستقر در آن مدار فراهم نکند. برای کنترل وضعیت و رفتار ماهواره به حسگرهای خورشیدی نیاز است که اشکالات و خارج شدن ماهواره از موقعیت موردنظر را بلافاصله حس و سپس، فرمان لازم برای تغییر سرعت را به چرخ‌های گردان کنترل‌کننده موقعیت ماهواره صادر و گشتاور لازم برای تغییر موقعیت را ایجاد کند. به علاوه، در برخی مواقع باید یک نیروی موقت توسط تراسترها فراهم شود تا حرکت و وضعیت ماهواره تصحیح شود به این ترتیب که یک سیستم کنترل رفتاری و همچنین، پیشران‌های اهمیت ویژه‌ای در ماهواره خواهد داشت. هدف این تحقیق، بررسی نظر یا ایده کنترل مداری، ویژگی‌ها و مزایای آن و همچنین، مرور کاربردهای عملیاتی این روش و نتایج حاصل از آنها خواهد بود. شکل ۱ شماتیک اجزای تشکیل‌دهنده فضاپیما را نشان می‌دهد.



شکل ۱- شماتیک اجزای تشکیل‌دهنده فضاپیما [۱].

### دسته‌بندی روش‌های کنترلی

روش‌های کنترلی شامل دسته‌بندی‌های مختلفی است. این دسته‌بندی‌های شامل سیستم‌های کنترل خطی و خطی‌سازی،

1. Feedback Linearization
2. Set-Point
3. Transformation
4. Disturbances
5. Uncertainty
6. Perfect Tracking
7. Two-point Boundary Value Problem
8. Globally Extermum

ارتعاشات را وارد بحث‌های کاربردی مهندسی کرد. با این رویکرد، سازه‌های هوشمند، طیف گسترده‌ای از راه‌حل‌های فنی را از کنترل منفعل تا کنترل فعال سازه‌ها در اختیار قرار می‌دهند. در این راستا چندین ماده هوشمند مهندسان را در این امر یاری می‌کنند. مواد پیزوالکتریک به دلیل قابلیت انفعالی در کاهش ارتعاشات سازه‌ای شناخته شده هستند. اثرات پیزوالکتریک نه تنها پاسخ الکتریکی را به سیستم مکانیکی القاء می‌کنند، بلکه دورن ماده انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. بنابراین، مواد پیزوالکتریک را می‌توان به عنوان راکتورهای تنظیم‌پذیر توان<sup>۱۰</sup> به کار برد. ارتعاش مکانیکی تولیدشده توسط یک محرک خارجی در یک ماده پیزوالکتریک، با استفاده از پوشاندن این ماده با الکترودهای مدار بسته روی سازه میرا می‌شود. این نکته قابل توجه است که فقط بخشی از انرژی مکانیکی تبدیل شده به انرژی الکتریکی قابل میرا شدن است.

بسیاری از وسایل ورزشی مانند راکت تنیس، چوب بیس‌بال، چوب اسکی و دیگر وسایل مشابه را می‌توان به عنوان سازه‌های هوشمند با قابلیت میرایی منفعل در نظر گرفت. در اغلب موارد، اثرات میرایی بهینه با استفاده از مواد پیزوالکتریک پیشرفته مانند فیبرهای کامپوزیتی فعال حاصل می‌شود.

آلیاژهای حافظه‌دار نیز می‌توانند به عنوان میراکننده‌های منفعل به کار برده شوند. این آلیاژها رفتار مطلوب پیزوالکتریک‌ها را در فرکانس‌های بالا از خود نشان نمی‌دهند، اما می‌توانند به واسطه تغییر مکان‌هایی که انجام می‌دهند، نیروهای بزرگی را تولید کنند.

سازه‌های هوشمند در کنترل فعال ارتعاشات از حسگرها و عملگرهای خود در توابع کنترلی استفاده می‌کنند که برای این منظور، حسگرها باید در چندین نقطه از سازه مورد نظر نصب شوند. این سیستم حسگرهنگامی که با بخش منفعل یکپارچه می‌شود، اطلاعاتی از وضعیت سازه را برای کنترلر بازخورد می‌کند. سپس، فرامین به عملگر صادر می‌شود تا سبب رفتار مطلوب سازه شود.

### کنترل فعال ارتعاشات

کنترل فعال ارتعاشات<sup>۱۱</sup> (AVC) یکی از مهم‌ترین مسائل سازه‌هاست. یکی از راه‌های انجام این امر هوشمند، سازگار و خودکنترل کردن سازه با استفاده از موادی است که مواد هوشمند نامیده می‌شوند. اصلی‌ترین مفهوم کنترل فعال ارتعاشات، کاهش ارتعاشات یک سیستم به وسیله اصلاح خودکار پاسخ سازه‌ای سیستم است که فرایند مربوط به آن در

اجرای برنامه شبیه‌سازی برای یافتن پاسخ بهینه نیز غالباً طولانی است. در نتیجه کنترل بهینه در مسائل کنترل هم‌زمان<sup>۹</sup> خیلی قابل استفاده نیست [۲۰]. تلاش‌هایی نیز در جهت مقاوم کردن آن در مقابل اغتشاش و نامعینی‌های پارامتری انجام شده است.

### کنترل تطبیقی

کنترل تطبیقی با ارائه قانون تخمین پارامترهای مجهول، قابلیت تعقیب خوبی از خود نشان می‌دهد. عملکرد مناسب این نوع کنترلر در مقابله با دو مشکل عمده سیستم‌های کنترلی یعنی اغتشاش و نامعینی در سیستم موجب شده است که هدرد کنترل سیستم‌های دینامیکی با پارامترهای گسترده از آن بسیار استفاده شود [۲۱]. پیش از این گفته شد که اغتشاش هم، از نظر ماهیت خود و هم، از این نظر که موجب تحریک مودهای ارتعاشی سازه‌ای می‌شود، زیان‌بار است؛ اما کارایی سیستم‌های کنترل تطبیقی کلاسیک در مواجهه با تغییرات سریع و مکرر در پارامترهای سیستم و همچنین، دینامیک‌های مدل‌نشده که در سیستم‌های دینامیکی با انعطاف‌پذیری سازه‌ای بروز می‌یابند، دچار اختلال می‌شود [۲۲].

### کنترل ارتعاشات

کنترل ارتعاشات سازه‌ها موضوعی اساسی و مهم در حوزه‌های مهندسی محسوب می‌شود. در حقیقت، پاسخ دینامیکی سازه تحت تغییرات شدید محیط مکانیکی با زمان، چالشی عمده در کاربردهای مهندسی است. اولین مثال می‌تواند تولید نوبز به واسطه ارتعاشات سازه در بازه‌های با فرکانس بالا باشد. نوبزهای تولیدشده توسط هر سازه ارتعاش‌کننده سبب نامطلوب کردن محیط اطراف می‌شود و به عایق‌بندی محیط نیاز دارد. ارتعاشات سازه اتومبیل در سرعت‌های بالا، علاوه بر تولید نوبز، شرایط نامطلوبی را برای راننده و سرنشینان خودرو فراهم می‌کند. مثال‌های مشابهی برای ارتعاشات تولیدشده در محیط‌های صنعتی قابل ذکر است. اگر سازه در حال ارتعاش، جزء و عضوی از یک ماشین یا بازوی یک ربات باشد سبب به وجود آمدن مشکلاتی مانند دقت در هدف‌گیری و سمت حرکت می‌شود که باید به طور جدی آنها را کنترل کرد.

می‌توان به موارد بسیاری از مشکلات مهندسی و کاربردی اشاره کرد که متأثر از ارتعاشات سازه‌هاست. در اغلب موارد، ارتعاشات به واسطه روش‌های منفعل با استفاده از دمپر یا انواع فیلترها کاهش داده می‌شود. افزایش تقاضا برای کاهش و از میان بردن ارتعاشات در فرکانس‌های مختلف، حوزه کنترل فعال

10. Power Transducer  
11. Active Noise Cancellation

9. Real Time Control

سازه‌های مختلف استفاده می‌شود و وضعیت سیستم مجبور به حرکت در چندراهی انتخاب شده می‌شود که چندراهی راه‌گزین نامیده می‌شود و رفتار حلقه‌بسته سیستم را معین می‌کند. امروزه، با افزایش استفاده از کامپیوترها و نمونه‌بردارهای با زمان گسسته در طراحی و اجرای کنترلرها، سیستم‌های با زمان گسسته و کنترل بر پایه کامپیوتر، موضوع تحقیقات بی‌شماری شده است. در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری در راستای مطالعه روش‌های طراحی کنترلر مود لغزشی دیجیتال<sup>(۱۶)</sup> (DSM) انجام شده است [۲۷]. در زمینه طراحی DSM، ورودی کنترلی فقط در لحظات نمونه‌برداری مشخص کاربرد دارد و سعی کنترلی در تمام طول دوره نمونه‌برداری ثابت باقی می‌ماند. به علاوه، وقتی وضعیت‌ها به سطح راه‌گزین می‌رسند، بهتر است کنترل ثانویه برای نگهداری وضعیت‌های محدود به سطح ناتوان باشد.

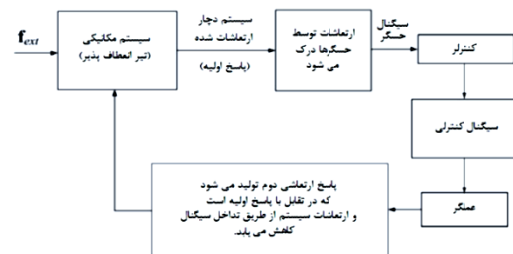
DSM فقط می‌تواند مود نیمه‌محرک را تحمل کند، وضعیت‌های سیستم به سطح محرک نزدیک می‌شوند، ولی به صورت کلی از ماندن در آن ناتوانند. بنابراین، در مجموع DSM نمی‌تواند خاصیت یافت‌شده تغییرناپذیری را در مود لغزشی با زمان پیوسته شامل شود. گائو<sup>(۱۷)</sup> یک رویکرد قانونی دسترسی به طراحی کنترلر برای یک سیستم با زمان گسسته را با استفاده از فیدبک وضعیت معرفی کرده است [۲۸]. این قانون دسترسی این اطمینان را فراهم می‌کند که خط سیر سیستم با مسیر راه‌گزین برخورد خواهد کرد و پس از آن دچار یک حرکت زیگزگاک حول مسیر راه‌گزین خواهد شد. دامنه هر مرحله متوالی زیگزگاک طوری کاهش می‌یابد که خط سیر در یک باند خاص باقی می‌ماند که باند مود نیمه‌محرک نامیده می‌شود.

به هر حال، بسیاری از رویکردهای کنترلر مود لغزشی به فیدبک تمام وضعیت احتیاج دارند. اما در عمل همیشه تمام وضعیت‌های سیستم برای اندازه‌گیری در دسترس نیستند. در بسیاری از مواقع نیز، خروجی سیستم با وضعیت سیستم متقارن نیست. در حالی که خروجی سیستم همواره برای اندازه‌گیری در دسترس است، فیدبک خروجی می‌تواند برای طراحی کنترلر مورد استفاده قرار گیرد و این امر محققان را به سوی شرایط فیدبک خروجی بر مبنای رویکرد کنترلی مود لغزشی رهنمون می‌سازد [۲۹].

### فیدبک خروجی چنددرختی

بسیاری از تحقیقات که در حوزه سازه‌های هوشمند کار شده‌اند به‌طور عمده در زمینه روش‌های کنترل و مدل‌سازی مثل فیدبک وضعیت، فیدبک خروجی استاتیک با محدودیت‌های بسیار متمرکز شده‌اند که به منظور طراحی کنترلر استفاده می‌شوند.

شکل ۲ نمایش داده شده است. در بسیاری از مواقع، کاهش ارتعاشات سازه‌های بسیار مهم است، زیرا ارتعاشات بر کارایی و پایداری سیستم تأثیر می‌گذارد. به دلیل افزایش مقاومت سازه در مقابل نیروها و اغتشاشات دینامیکی به این مسئله نیاز است و موجب کاهش ارتعاشات و افزایش توانایی در سبک‌تر کردن و افزایش کارایی سازه می‌شود. بنابراین، کنترلر ارتعاشات هر سیستم همواره یک چالش جدی برای هر طراح سیستم‌های کنترلی است. هر سیستم کنترلر فعال ارتعاشات متشکل از یک مدل دینامیکی (پلانت<sup>(۱۲)</sup>)، حسگر، عملگر و یک کنترلر است.



شکل ۲- نحوه کاهش ارتعاشات با استفاده از AVC.

به دلیل کارایی زیاد چنین سازه‌هایی که سازه‌های هوشمند نامیده می‌شوند، نیاز به استفاده از آنها در کاربردهای بی‌شمار سازه‌ها در حال افزایش است [۲۳]. این سازه‌های هوشمند از مواد هوشمندی تشکیل می‌شوند که با عنوان حسگر و عملگر (بر پایه پیزوالکتریک‌ها، سیالات مغناطیسی-رئولوژیکی<sup>(۱۳)</sup>، پیزوسرامیک‌ها، سیالات الکترو-رئولوژیکی<sup>(۱۴)</sup>، آلیاژهای حافظه‌دار، فیبرهای نوری و غیره) نامیده می‌شوند. این مواد به سازه اضافه می‌شوند و مزیت سازه‌های مانند افزایش مرتبه منطق کنترلی، بهینه‌سازی سیگنال و افزایش توان الکتریکی دارند. این مواد می‌توانند برای تولید یک پاسخ ثانویه ارتعاشی در یک سیستم مکانیکی استفاده شوند که پتانسیل کاهش پاسخ کلی بخش اصلی سیستم به وسیله تخریب سیگنال‌ها با پاسخ اصلی سیستم از طریق منبع اصلی ارتعاشات دارد [۲۴].

### کنترلر مود لغزشی

فیدبک خروجی چنددرختی با زمان گسسته بر مبنای کنترلر مود لغزشی می‌تواند به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های کنترل ارتعاشات سازه‌های انعطاف‌پذیر به کار برده شود [۲۵]. تئوری کنترلر مود لغزشی<sup>(۱۵)</sup> (SMC) بر مبنای تغییر سازه کنترل‌شونده از طریق تغییر وضعیت سیستم برای رسیدن به پاسخ مطلوب است [۲۶]. در مجموع، یک کنش کنترلی راه‌گزین برای راه‌گزینی بین

12. Plant  
13. Magneto-Rheological  
14. Electro-Rheologica  
15. Sliding Mod Control

16. Digital Sliding Mod  
17. Gao

کنترلر با عنوان عبارت فیدبک خروجی چندنرخی (MROF<sup>۲۰</sup>) نامگذاری شد که در حقیقت، ساده‌سازی ورودی کنترلی و خروجی سنسور در نرخ‌های ساده‌شده متمایز است. به علاوه، این روش می‌تواند با کنترل موده‌های گسسته به منظور استخراج یک استراتژی جدید کنترلی با عنوان فیدبک خروجی چندنرخی بر پایه مود حرکتی ناپیوسته زمانی ترکیب شود [۳۴].

از این‌رو، می‌توان دریافت که فیدبک وضعیت بر مبنای قوانین کنترلی برای هر سازه شاید به وسیله استفاده از فیدبک خروجی چندنرخی از طریق نمایش وضعیت سیستم با ورودی‌های کنترلی قبل و نمونه‌های خروجی چندنرخی درک شود. مزیت دیگر روش کنترلی MROF آن است که به همه وضعیت‌های سیستم برای مقاصد فیدبک و کنترل نیازی نیست. مهم‌ترین ویژگی روش MROF که سبب می‌شود برای طراحی کنترلر پایدار بدان توجه شود این است که می‌توان نتیجه مشابه فوق را برای فیدبک وضعیت یک خانواده از مودها که شرایط عملکرد مختلف سیستم را نشان می‌دهند، به صورت مشابه به کار برد.

همچنین، روش چندنرخی برای طراحی کنترلرها با هدف کنترل فعال ارتعاشات سازه‌های هوشمند با استفاده از الگوریتم‌های کنترلی موده‌های حرکتی گسسته توسعه داده شده است. یک فیدبک خروجی چندنرخی (POF یا FOS) و فیدبک خروجی چندنرخی بر مبنای فلسفه کنترل مود حرکتی تقریباً می‌تواند برای همه سیستم‌های کنترل‌پذیر و مشاهده‌پذیر استفاده شود، ولی درعین حال برای اینکه زیاد به کامپیوتر فشار وارد نشود نمی‌توان آن را به اندازه کافی ساده کرد.

### فیدبک خروجی پریودیک

یکی از مؤثرترین روش‌های ایجاد فیدبک خروجی چندنرخی، فیدبک خروجی پریودیک (POF) است [۳۵]. چامس<sup>۲۱</sup> و لئوندس<sup>۲۲</sup> درباره مسئله تعیین قطب به وسیله فیدبک خروجی ثابت تکه‌ای توسط برای سیستم‌های LTI با مشاهدات کم مطالعه کرده‌اند [۳۶]. آنها نشان داده‌اند که با استفاده از یک فیدبک خروجی ثابت تکه‌ای که به صورت تناوبی با زمان تغییر می‌کند، قطب‌های سیستم کنترلی با زمان گسسته می‌تواند به صورت دلخواه تعیین شود (مطابق محدودیت طبیعی بهتر است نسبت به محور حقیقی متقارن تعیین شوند).

در اینجا مقدار ورودی در یک لحظه خاص به مقدار خروجی در لحظه قبل از لحظه مزبور بستگی دارد (برای مثال در ابتدای تناوب). از آنجاکه بهره‌های فیدبک ثابت‌های تکه‌ای هستند، روش آنها به‌آسانی قابل اجراست و پایداری حلقه‌بسته را

مشکل این روش‌ها کنترل آن است که کنترلرهای فیدبکی وضعیت به بردار وضعیت یکپارچه یا یک ارزیاب در دسترس احتیاج دارند. مشکل کنترل‌های بر مبنای مشاهده‌کننده آن است که فیدبک وضعیت و ارزیابی وضعیت در ظاهر بیان مبهم ارائه شده و به وسیله تمامی سیستم‌ها نمی‌توانند جدا شوند.

هرچند معلوم است که بسیاری از سیستم‌های کاربردی مشاهده‌پذیر هستند، همه وضعیت‌های سیستم به‌ندرت قابل اندازه‌گیری است. بنابراین، در بسیاری از موارد مثل برخی از وضعیت‌هایی که در دسترس نیستند، الگوریتم‌های کنترلی ذکر شده شاید قابل اجرا نباشند. از این‌رو، مطلوب است که یک فیدبک خروجی طراحی شود. خروجی سیستم همواره یک کمیت قابل اندازه‌گیری است. بنابراین، الگوریتم‌های کنترلی بر مبنای فیدبک خروجی در مقایسه با الگوریتم‌های بر مبنای فیدبک وضعیت پرکاربردتر هستند [۳۰]. بخش چشمگیری از تحقیقات در زمینه توسعه قوانین کنترلی با استفاده از روش‌های فیدبک خروجی (فیدبک خروجی استاتیک و دینامیک) انجام شده است که فقط به اندازه‌گیری خروجی سیستم نیاز دارد.

مشکل فیدبک خروجی استاتیک یکی از مشکلاتی است که در تئوری کنترل و کاربردهای آن بارها بررسی و ارزیابی شده است [۳۱]. یکی از دلایلی که موجب می‌شود فیدبک خروجی استاتیک بسیار مورد توجه و بررسی قرار گیرد، آن است که ساده‌ترین کنترل مسیر بسته‌ای را نمایش می‌دهد که در اجرا می‌تواند درک شود. دلیل دیگر آن است که بسیاری از مشکلاتی که در ترکیب کنترلهای دینامیکی وجود دارد می‌تواند به عنوان مسائل فیدبک خروجی استاتیک شامل نقشه‌های تکمیلی شود.

بنابراین، اگر برای مثال تیر یکسر گیردار هوشمند به‌اجبار توسط فقط فیدبک خروجی پایدار شود (وضعیت‌ها شاید برای اندازه‌گیری در دسترس نباشند) می‌تواند به روش فیدبک خروجی چندنرخی برگردانده شود که در حالت طبیعی خود طوری استاتیک است که پایداری مدار بسته را ضمانت کند. می‌توان نشان داد که عملکرد و پایداری مدار بسته می‌تواند به وسیله روش فیدبک خروجی چندنرخی تضمین شود. اگر خروجی سیستم یا ورودی کنترل شده با یک نرخ سریع‌تر از بقیه ساده‌سازی شود، یک ویژگی به وسیله فیدبک خروجی استاتیک نمی‌تواند مجاب شود تا زمانی که ساده‌سازی سازه‌ای فیدبک خروجی استاتیک حفظ می‌شود.

روش کنترلی اسبق با عنوان نمونه‌برداری خروجی سریع (FOS<sup>۱۸</sup>) [۳۲] و روش قبل از آن با عنوان فیدبک خروجی پریودیک (POF<sup>۱۹</sup>) نامیده می‌شدند [۳۳]. سپس، یک روش کنترلی بر پایه روش چندنرخی طراحی شد. این روش طراحی

20. Multi rate of Feedback  
21. Chammas  
22. Leonedes

18. Fast of Sliding  
19. Periodic of Feedback



نیز تضمین می‌کند. این نوع قانون کنترلی می‌تواند دسته بزرگ‌تری از سیستم‌ها را از فیدبک خروجی استاتیک پایدار کند.

### فیدبک نمونه خروجی سریع

روش دیگر فیدبک خروجی چندنرخ (MROF)، روش فیدبک نمونه خروجی سریع است [۳۷]. وارنر<sup>۲۳</sup> و فورتوا<sup>۲۴</sup> درباره مسئله فیدبک نمونه خروجی سریع توسط برای سیستم‌های خطی ثابت با زمان تحقیق کرده‌اند [۲۵]. آنها نشان دادند که قطب‌های سیستم کنترلی با زمان گسسته می‌تواند به صورت دلخواه تعیین شود (مطابق محدودیت طبیعی بهتر است نسبت به محور حقیقی متقارن تعیین شوند). با استفاده از روش فیدبک نمونه خروجی سریع مشخص شد که تعداد تغییرات بهره کمتر از شاخص مشاهده‌پذیری سیستم نیست. از آنجا که بهره‌های فیدبک ثابت‌های تکه‌ای هستند، روش آن‌ها به‌سادگی قابل اجراء است. مسئله پیدا کردن یک بهره فیدبکی FOS است که بهره فیدبک استاتیک را تصدیق کند.

### فیدبک خروجی چندنرخ غیر متمرکز پایدار

مبحث فیدبک خروجی چندنرخ (POF/FOS) برای طراحی یک کنترلر غیرمتمرکز پایدار توسعه داده شده است. در فیدبک خروجی چندنرخ گفته می‌شود برای سنتز چندمدلی، ماتریس بهره به صورت کلی پر است. نتیجه این امر آن است که ورودی کنترلی هر بخش تابعی از خروجی همه بخش‌هاست. کنترل فیدبک خروجی چندنرخ غیر متمرکز پایدار از طریق صفر کردن درایه‌های غیرقطری ماتریس‌های بهره POF یا FOS قابل دستیابی است. بنابراین، ساختار این ماتریس بهره به‌صورت یک ماتریس قطری خواهد شد. با یک چنین ساختار ماتریس بهره غیرمتمرکز پایدار مسئله در قالب LMI فرموله می‌شود و می‌توان ماتریس‌های مطلوب را به‌دست آورد. حالا، بدیهی است که ورودی کنترلی مدل هر بخش تابعی از خروجی همان بخش است و بدین ترتیب می‌توان کنترلر سازه هوشمند را با استفاده از روش فیدبک خروجی چندنرخ به صورت فیدبک خروجی چندنرخ غیر متمرکز پایدار طراحی کرد.

### کاهش مرتبه مدل

سیستم‌های سازه هوشمند سیستم‌هایی با پارامترهای پیوسته و در کل این مدل‌ها، مدل‌هایی با مرتبه بالا هستند، طوری که برای عملکرد رضایت‌بخش به تعداد زیادی از مودهای ارتعاشی احتیاج دارند. بنابراین، در طراحی کنترلر همواره قیمت، سایز و پیچیدگی بالایی دارند و باید به وسیله روش‌های کاهش مرتبه،

مدل آن را به مدل مرتبه پایین‌تری کاهش و طراحی کنترلر را برای مدل کاهش مرتبه‌یافته انجام داد، سپس، برای مدل مرتبه بالا استفاده می‌شود. تعدادی از روش‌های کاهش مرتبه مدل توسط بسیاری از محققان بررسی شده است.

اصل روش کاهش مرتبه مدل صرفنظر کردن از مقادیر ویژه‌ای از سیستم اصلی که از مبدأ دورترند و ابقای مقادیر ویژه برجسته و بارز و سپس، بارز کردن ثابت‌های زمانی سیستم اصلی در مدل کاهش مرتبه‌یافته است. این امر دلالت بر آن دارد که رفتار کلی سیستم تقریب‌زده شده بسیار شبیه سیستم اصلی است. روش‌های بی‌شماری برای رسیدن به این مقصود توسعه داده شده‌اند که بتوان از طریق تقریب‌زدن اجزای بارز یک سیستم بزرگ و یافتن یک نمایه ساده‌تر (یا از مرتبه پایین‌تر) از سیستم که رفتار مشابه با رفتار سیستم اصلی داشته باشد.

یکی از مشهورترین روش‌ها بر مبنای روش ابقای مقادیر ویژه اصلی روش دیویسون<sup>۲۵</sup> است که توسط آن، یک سیستم از مرتبه بالا به صورت عددی می‌تواند با یک سیستم ساده‌تر تقریب زده شود. این روش پیشنهاد می‌کند که یک سیستم بزرگ  $(n \times n)$  می‌تواند به یک مدل ساده‌تر  $(r \times r)$  کاهش داده شود با در نظر گرفتن  $r$  تا از مهم‌ترین مقادیر ویژه (مهم‌تر از لحاظ درک نزدیک‌تر بودن به ناپایداری) وقتی که  $r \leq n$  است.

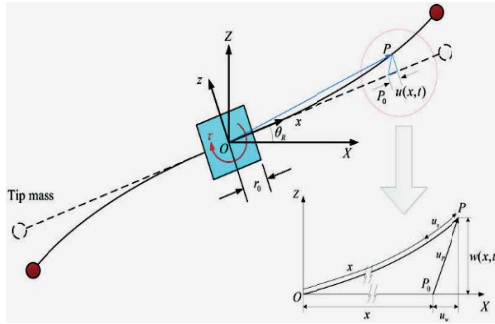
### پیشینه مطلب

مهم‌ترین زمینه مدل‌سازی، کنترل و کاربرد سازه‌های هوشمند با استفاده از تئوری تیر اویلر - برنولی و تئوری تیر تیموشنکو با لایه‌های پیزوالکتریک در سال‌های اخیر بوده است. در این بخش اطلاعات بسیاری درباره کارهای تحقیقاتی انجام‌شده در زمینه کنترلر و سازه‌های هوشمند ارائه شده است.

گو<sup>۲۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ درباره کنترلر مود لغزشی برای فضاپیما با سرعت دلخواه را با ورودی اشباع عملگر مطالعه کرده‌اند. آنها کنترلر قوی فضاپیما را بدون اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای تحت اختلالات خارجی و محدودیت اشباع ورودی بررسی کردند. سطح مود لغزشی انتگرالی جدید که مناسب برای حل مشکل محدودیت اشباع ورودی است، بر اساس توابع است. هر دو کنترلر می‌توانند با استفاده از سطح مود لغزشی به طور هم‌زمان با اشباع عملگر و اختلالات خارجی مقابله کنند. اولین کنترلر بازخورد کامل حالت است، در حالی که دومین کنترلر فقط مود لغزشی است، جایی که سرعت‌زاویه‌ای ناشی از وجود یک زمان محدود است. در نهایت، نظریه لیپانوف<sup>۲۷</sup> و نتایج شبیه‌سازی برای نشان‌دادن کارایی کنترل‌کننده‌ها ارائه شده است [۳۸].

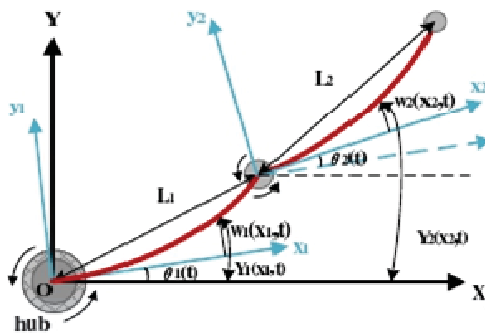
25. Davison  
26. Guo  
27. Lyapunov

23. Warner  
24. Furtua



شکل ۱- مدل فضایی انعطاف‌پذیر و تغییر شکل آرایه خورشیدی [۴۰].

کائو در سال ۲۰۱۸ با استفاده از روش مودهای فرضی در حالت کنترل شبکه عصبی بازوی رباتیک انعطاف‌پذیر دو لینکی پژوهش کرد. شماتیک این تحقیق در شکل ۴ بوده همچنین، مدل تقسیم‌شده n-بعدی از بازوهای منحنی انعطاف‌پذیر توسط روش مودهای فرضی (AMM<sup>۳۹</sup>) توسعه داده است. در ادامه، بر اساس مدل دینامیک معکوس، هر دو کنترل بازخورد کامل حالت و کنترل بازخورد خروجی برای دستیابی به ردیابی مسیر و کنترل ارتعاش بررسی می‌شود. به منظور تضمین ثبات به شدت، محدودیت نهایی واحد سیستم حلقه‌بسته توسط اثبات لیاپانوف متوجه می‌شود. به علاوه، از طریق انتخاب مناسب پارامترهای کنترل، وضعیت سیستم در یک نقطه نسبی کوچک همگرا خواهد شد. در نهایت، شبیه‌سازی‌های گسترده و آزمایش روی پلتفرم کوانتر برای یک روتوزی دو لینکی برای انجام امکان‌سنجی کنترل ارائه شده است [۴۱].



شکل ۴- نمودار بازوی انعطاف‌پذیر دو لینکی [۴۱].

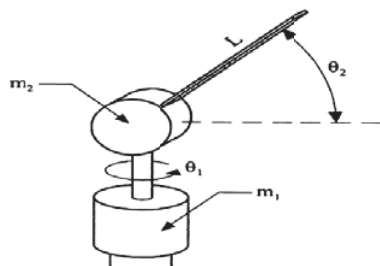
هی<sup>۳۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ درباره کنترل ارتعاش برای بازوی انعطاف‌پذیر تیموشنکو با قید ورودی مطالعه کردند. آنها یک رویکرد کنترل ارتعاشاتی مرزی با کاهش ارتعاشات و موقعیت زاویه یک سیستم بازوی انعطاف‌پذیر تیموشنکو را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به تأثیر محدودیت‌های ورودی غیرخطی، کنترل‌کننده‌های مرزی

ژانگ<sup>۲۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ کنترل هم‌زمان تطبیقی ردیابی عملکرد مشخص شده با ارتعاش فعال برای فضای انعطاف‌پذیر را بررسی کردند. آنها درباره کنترل هم‌زمان ارتعاش فعال برای فضای انعطاف‌پذیر در حضور اختلالات خارجی تحقیق کردند. کنترل ارتعاش فعال معمولاً به سنسورها و سنسورهای اضافی بستگی دارد که به شدت سبب افزایش سختی کاربرد عملی می‌شود. برای کاهش پیچیدگی پیاده‌سازی، سنسورهای پیزوالکتریک پذیرفته نمی‌شوند، بلکه به عنوان یک ناظر مودال برای ارزیابی اطلاعات مودال معرفی شده‌اند. بر اساس اطلاعات مودال مشاهده شده و فرایند طراحی پیشنهادی تعیین شده، یک کنترلر حالت سازگار است که دارای قابلیت عبورکردن اختلالات و همچنین، عملکرد کنترل پیشگیرانه و حالت پایدار است. به طور مشابه، یک کنترلر فعال برای مقابله با ارتعاشات ناشی از حرکات حالت ساخته شده است. می‌توان ثابت کرد که با محدود کردن برآوردهای متغیرهای مودال، هماهنگی واقعی مودال نیز با ویژگی‌های مورد انتظار کاهش می‌یابد. پایداری کل سیستم حلقه‌بسته با نظریه لیاپانوف تحلیل می‌شود [۳۹].

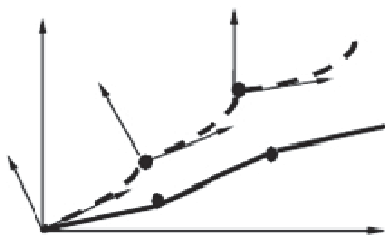
با توجه به شکل ۳ یوتنگ کائو و همکاران در سال ۲۰۱۸ دینامیک غیرخطی و سیستم با قابلیت صلب-انعطاف‌پذیر برای فضای انعطاف‌پذیر با مانور سریع مدل‌سازی کردند. آنها مدل ترکیبی صلب و انعطاف‌پذیر از یک فضای ساخته شده از یک پلتفرم صلب و دو آرایه خورشیدی انعطاف‌پذیر بررسی کردند. با توجه به مانور سریع یک فضای انعطاف‌پذیر، مدل تقسیم‌بندی مرتبه اول باید تصویب شود. معادلات دینامیک غیرخطی که با شرایط جابه‌جایی درجه دوم جابه‌جایی محوری ناشی از حرکت عرضی آرایه‌های خورشیدی، با استفاده از اصل همیلتون به دست می‌آیند. سپس، روش حالت کلی برای به دست آوردن اشکال حالت مدل خطی شده به کار می‌رود. ثابت می‌شود که اشکال حالت کلی متعامد است و برای تقسیم مدل همبستگی تقریبی مرتبه اول استفاده می‌شود. سپس مدل فشرده شده با انعطاف‌پذیر و انعطاف‌پذیر با شکل‌های کلی سازگار است. مدل با مقایسه آنچه که از روش المان محدود است به دست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش حالت کلی دارای ابعاد پایین‌تر، اما دقت بالاتر است. تجزیه و تحلیل تغییرات پارامترها و واکنش‌های دینامیک نشان می‌دهد که مدل کوپلینگ تقریبی مرتبه اول دقیق‌تر از مدل خطی شده است و دامنه گسترده‌ای از برنامه کاربردی نسبت به مدل کوپلینگ تقریبی صفر دارد [۴۰].

نصب شده در یک پلتفرم دو درجه آزادی استفاده می‌شود. ورودی‌های کنترلر منطقی فازی (FLC) موقعیت زاویه‌ای مرکز و نقطه انحراف نقطه انتهایی تیر انعطاف‌پذیر است. پیش‌بینی انحراف با استفاده از مجموعه‌ای از سه جفت سنج سنسور نصب شده روی تیر و یک ترانسفورماتور دیفرانسیل متغیر خطی قرار داده شده در نوک دریافت شد. آنها درباره چگونگی ساختن پایه قانون برای تیر انعطاف‌پذیر بر اساس رابطه بین جابه‌جایی زاویه‌ای هاب و انحراف نقطه انتهایی و همچنین، روشی بررسی کردند که برای توسعه مدل NN از آن بهره‌برداری کردند. چندین نتایج تجربی نشان می‌دهد که اثر FLC در کاهش ارتعاش نقطه انتهایی تیر انعطاف‌پذیر ارائه شده است [۴۴].

کیانگ<sup>۳۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده گسترده از بازوهای انعطاف‌پذیر در کاربردهای مختلف روبوتیک، آن را به عنوان یکی از منافع تحقیق برای بسیاری از محققان در سراسر جهان ساختند. همانطور که در شکل ۷ پیداست مطالعات آنها درباره مدل‌سازی، سیستم‌های سنسور و کنترلرها برای استفاده از روبوت‌های انعطاف‌پذیر به منظور تکمیل تحقیقات قبلی بررسی شده توسط مقدمه‌ای کوتاه از روش‌های مدل‌سازی ضروری برای اولین بار ارائه شده است و پس از آن، جایگزین‌های عملیاتی سیستم‌های حسگر بررسی شده است که می‌تواند دانشمندان یا مهندسان را برای انتخاب سنسورهای مناسب برای برنامه‌های کاربردی خود کمک کند. هدف اصلی آنها بررسی جامع رویکردهای کنترل برای بازوهای انعطاف‌پذیر و مفاصل انعطاف‌پذیر است که در تحقیقات اخیر بررسی شده‌اند. مسائل مربوط به کنترل انعطاف‌پذیر، برجسته شده است [۴۵].



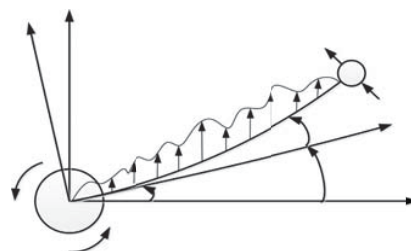
شکل ۶- شکل‌گیری پلت فرم دودرجه آزادی (DOF) [۴۴].



شکل ۷- بازوی انعطاف‌پذیر سه لینکی صفحه‌ای [۴۵].

محدود شده توسط یکپارچه‌سازی توابع تکانه‌ای هذلولی با هدف کاهش تغییرات کششی و برشی و دستیابی زاویه‌ای برای پیوند انعطاف‌پذیر ارائه می‌شوند. در همین حال، این کنترل‌کننده‌ها در محدودیت‌های ورودی مورد نظر محدود خواهند شد. تحت کنترل‌کننده پیشنهادی، تجزیه و تحلیل تئوری و شبیه‌سازی انجام شد تا ثبات سیستم و امکان‌سنجی استراتژی کنترل پیشنهادی ارائه شود [۴۲].

جیانگ<sup>۳۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ کنترل مرزی برای یک بازوی انعطاف‌پذیر بر اساس ناظر اختلال بی‌نهایت بعد را بررسی کردند. آنها روی اغتشاشات یک کنترلر مرزی طراحی و برای بازوی انعطاف‌پذیر در حضور اختلال مرزی که شکل ۵ بازوی انعطاف‌پذیر را نشان داده و مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به ابعاد بی‌حد و حصر آن از دینامیک خمشی به حساب می‌آید، در این مطالعه مدل معادلات دیفرانسیل (PDE<sup>۳۲</sup>) از آنجا که اختلال توزیع فضایی ابعاد بی‌نهایت است، به‌وسیله ناظر معمولی نمی‌توان اختلال را جبران کرد که در رویکرد بعدی ابداع شده است. اختلال توزیع شده به طور متناوب توزیع شده است، پیشنهاد آنها یک نظردهنده اختلال بی‌نهایت بعدی را ارائه می‌دهد. با استفاده از به عنوان یک جبران‌کننده فیدر، یک طرح کنترل مرزی طراحی شده است تا موقعیت مشترک را تنظیم کند و همزمان ارتعاش کششی را از بین ببرد. تجزیه و تحلیل تئوری پایدار بودن هر دو ناظر اختلال پیشنهادی و کنترل‌کننده مرزی است. عملکرد سیستم حلقه‌بسته با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی نشان داده شده است [۴۳].



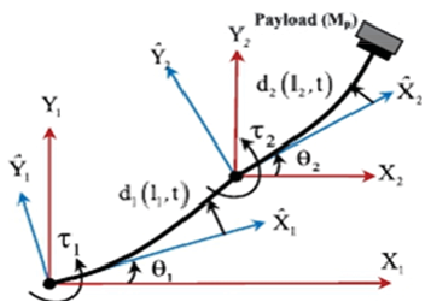
شکل ۵- شکل‌گیری بازوی انعطاف‌پذیر [۴۳].

جینفن<sup>۳۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۵ به بررسی تجربی کنترل ارتعاش فعال یک بازوی انعطاف‌پذیر تک‌لینک با استفاده از ابزار استدلال فازی و شبکه‌های عصبی پرداختند. آنها در شکل ۶ که نمایش نحوه دوار بودن مسئله می‌باشد با طراحی و اجرای کنترل ارتعاش فعال بر اساس منطق فازی و شبکه‌های عصبی (NNs<sup>۳۴</sup>) مرتبط است. کنترلر برای کاهش ارتعاش نقطه پایان در یک منحنی انعطاف‌پذیر تک لینک،

31. Jiang  
32. Partial Differential Equation  
33. Jnifene  
34. Neural Network



کیو و همکاران در سال ۲۰۱۹ درباره کنترل ارتعاش فعال برای بازوی دو لینکی انعطاف‌پذیر به صورت تجربی مطالعه کردند. آنها تجربیات تحقیقاتی را درخصوص کنترل ارتعاش فعال یک بازوی انعطاف‌پذیر دو لینکی (TLFM<sup>۴۲</sup>) با استفاده از یک توزیع کنترل حداقل خودارزیابی واریانس (GMVSTC<sup>۴۳</sup>) و مدل مبتنی بر مدل شبکه‌های عصبی فازی (TS-FNN) ارائه می‌کنند. الگوریتم GMVSTC متشکل از یک شناسه خط در شکل مدل متحرک کنترل خودکار راندگی و یک ژنراتور سیگنال کنترل ارتعاش است و الگوریتم کنترل TSFNN سبب ایجاد اقدامات کنترل می‌شود که مزایای کامل کنترل‌کننده منطبق فازی و کنترل‌کننده عصبی را ایجاد می‌کند. راه‌اندازی تجربی از بازوی دو لینکی انعطاف‌پذیر ساخته شده است. بررسی مقایسه‌ای آزمایشی درباره کاهش ارتعاش در جریان و پس از حرکت موتور، برای کنترل کنترل‌کننده‌های طراحی شده انجام می‌شود. اثربخشی کنترل‌های طراحی شده با توجه به کنترل ارتعاش در مقایسه با کنترل کلاسیک PD ارزیابی شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که کنترل‌کننده طراحی شده می‌تواند [۴۷].



شکل ۸ - نمودار مختصات یک صفحه TLFM [۴۷].

### نتیجه‌گیری

در تحقیقات یادشده از کنترل‌های زیادی استفاده شده است، از طرفی با پیشرفت تحقیقات در این زمینه، مشاهده می‌شود که در تحقیقات جدیدتر، سامانه کنترل وضعیت نیز برای کنترل‌سازه‌های انعطاف‌پذیر استفاده شده است این رویکرد به نوعی در تحقیقات عملی و تئوری، عملیاتی‌تر به نظر می‌رسد، اما باید اشاره کرد که در این تحقیقات نیز آزمون کنترل مستقل از مأموریت‌های دیگر ماهواره انجام شده است. در نهایت باتوجه به مزایایی که برای سامانه کنترل فضاپیما بیان شد و با توجه به تحقیقات عملی و نظری که در این رابطه انجام شده است، به نظر می‌رسد در آینده کاربرد وسیعی در ماهواره‌ها خواهد داشت، اما همچنان نیازمند تحقیقات و آزمایش‌های بیشتری است.

لیو<sup>۳۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ درباره طراحی کنترلر قوی H1 برای تثبیت نگرش فضاپیمای انعطاف‌پذیر با قیدهای ورودی مطالعه کردند. مسئله اثبات پایداری و کنترل ارتعاش برای فضاپیمای انعطاف‌پذیر با عدم قطعیت پارامتر مدل، اختلالات کنترلر، اختلالات خارجی و محدودیت‌های ورودی مطرح می‌شود. مدل مانور فضاپیمای انعطاف‌شده به صورت فضای حالت فیزیکی در نظر گرفته شده است. یک کنترلر بازخورد حالت جدید بر اساس انتظار دقیق در دسترس از یک متغیر جدید پیشنهاد شده است که برای مدل‌سازی یک تصادف در کنترل اختلال به دست می‌آید. بر اساس اثبات تئوری لیاپانوف، شرایط کافی برای وجود کنترلر غیر H1 با توجه به محدودیت‌های ورودی بر پایه نابرابری‌های ماتریس خطی (LMI<sup>۳۷</sup>) از لحاظ اختلال افزایشی و اختلال چندطبقه داده می‌شود. سپس، کنترل‌کننده توسعه‌یافته تحت محدودیت‌های مورد نیاز می‌تواند به دست آید، در صورتی که ویژگی غیرقابل نفوذ به طور کامل در نظر گرفته شود تا تحمل به عدم اطمینان در کنترل‌کننده را بهبود بخشد. شبیه‌سازی عددی برای نشان دادن اثربخشی و برتر بودن رویکرد کنترل پیشنهادی در اثبات پایداری و کنترل ارتعاش انجام می‌شود، جایی که باید توجه کرد طراحی کنترل ارتعاشات مفصل برای فرکانس‌های طبیعی بالاتر است، در حالی که طراحی کنترل ارتعاشات فعال برای حالت طبیعی فرکانس‌ها علاوه بر فرکانس طبیعی پایین تأثیر بیشتری بر عملکرد اثبات پایداری کنترل ارتعاش دارد [۴۶].

کومار پرادهان<sup>۳۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ درباره مدل کنترلر تطبیقی غیرخطی برای یک بازوی انعطاف‌پذیر پژوهش کردند. آنها بر اساس شکل ۸ یک کنترلر تطبیقی مدل غیرخطی جدید (NAMPC<sup>۳۹</sup>) برای کنترل موقعیت نوک تیر انعطاف‌پذیر (FLM<sup>۴۰</sup>) را ارائه می‌دهند که در معرض بارگیری‌های مختلفی قرار می‌گیرد. رویکرد کنترل تطبیقی پیشنهادی شامل یک شناسه دینامیک FLM آنلاین در قالب یک مدل متحرک غیرخطی خودکار با مدل ورودی خارجی و یک ژنراتور سیگنال کنترل بر اساس دینامیک شناسایی شده است. اثربخشی الگوریتم کنترل پیشنهادی با مقایسه عملکرد آن با کنترلر خودتنظیم (STC<sup>۴۱</sup>) و یک کنترل‌کننده تطبیقی غیرخطی (NAC) تأیید می‌شود. معیارهای عملکرد کنترل‌کننده به عنوان نقطه ردیابی مسیر نهایی و کنترل سریع انحراف نوک انتخاب می‌شوند [۴۷].

36. Liu  
37. Linear Matrix Inequality  
38. Kumar Pradhan  
39. Nonlinear Adaptive Model Predictive Controller  
40. Flexible Manipulator  
41. Self-tuning Controller

42. Two-link Flexible Manipulator  
43. Generalized Minimum Variance Self-tuning Control

## مراجع

- Spacecraft", *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 50, No. 11, pp. 1639-1654, 2005.
- [17] Sahib, M.A., "A Novel Optimal PID Plus Second Order Derivative Controller for Avrsystem", *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, 18, pp. 194-206, 2015.
- [18] Michael, J., Chudej, K., and Pannek, J., "Modelling and Optimal Control of a Docking maneuver with an Uncontrolled Satellite", *arXiv preprint arXiv: 1203.6782*, 2012.
- [19] Chen, M., Ge, S.S., and Ren, B.B., "Adaptive Tracking Control of Uncertain MIMO Non-Linear Systems with Input Constraints", *Automatica*, Vol. 47, No.3, pp. 452-465, 2011.
- [20] Wang, H.Q., Chen, B., and Lin, C., "Adaptive Neural Tracking Control for a Class of Stochastic Nonlinear Systems", *Int. J. Robust Nonlinear Control*, Vol. 24, No. 7, pp. 1262-1280, 2014.
- [21] Zhou, J., Wen, C., and Zhang, Y., "Adaptive Output Control of Nonlinear Systems with Uncertain Dead-Zone Nonlinearity", *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 21, No. 3, pp. 504-511, 2006.
- [22] Zhou, Q. and et al., "Adaptive Fuzzy Tracking Control for a Class of Pure-Feedback Nonlinear Systems with Time-Varying Delay and Unknown Dead Zone", *Fuzzy Sets Syst.*, Vol. 329, pp. 36-60, 2016.
- [23] Gao, Z., Zhou, Z., Jiang, G., Qian, M., and Lin, J., "Active Fault Tolerant Control Scheme for Satellite Attitude Systems: Multiple Actuatorfaults Case," *Int. J. Control Autom. Syst.*, Vol. 16, No. 4, pp. 1794-1804, 2018.
- [24] Xiao, B., Hu, Q., and Friswell, M.I., "Active Fault-Tolerant Attitude Control for -Exible Spacecraft with Loss of Actuator Effectiveness," *Int. J. Adapt. Control Signal Process.*, Vol. 27, No. 11, pp. 925\_943, 2013.
- [25] Werner, H. and Furuta, K., "Simultaneous Stabilization Based on Output Measurement", *Kybernetika*, Vol. 31, No. 4, pp. 395-411, 1995.
- [26] Zhou, N., Xia, Y., Wang, M., and Fu, M., "Finite-Time Attitude Control Of multiple Rigid Spacecraft Using Terminal Sliding Mode", *Int. J. Robust Nonlinear Control*, Vol. 25, No. 12, pp. 1862-1876, 2015.
- [27] Zhou, A.M., Kumar, K.D., Hou, Z.-G., and Liu, X., "Finite-Time Attitude Tracking Control for Spacecraft Using Terminal Sliding Mode and Chebyshev Neural Network", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern.*, Vol. 41, No. 4, pp. 950-963, 2011.
- [28] Guo, Y., Song, S.M., Li, X.H., and Li, P., "Terminal Sliding Mode Control for Attitude Tracking of Spacecraft under Input Saturation", *J. Aerosp. Eng.*, Vol. 30, No. 3, 2017.
- [29] Shao, S. K., Zong, Q., Tian, B.L., and Wang, F., "Finite-Time Sliding Mode attitude Control For Rigid Spacecraft Without Angular Velocity Measurement", *J. Franklin Inst.-Eng. Appl. Math.*, Vol. 354, No. 12, pp. 4656-4674, 2017.
- [30] Liu, Z., Tan, X., and Yuan, R., "Immersion and Invariance-Based Output Feedback Control of Air-Breathing Hypersonic Vehicles", *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* Vol. 13, No.1, pp. 394-402, 2016.
- [31] Zhou, Q., Li, H.Y., Wang, L.J., and Lu, R.Q., "Prescribed Performance Observer-Based Adaptive Fuzzy Control for Nonstrict-Feedback Stochastic Nonlinear Systems", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, Vol. 99, pp.1-12, 2017.
- [1] <http://messenger.jhuapl.edu/About/Spacecraft-and-Instruments.html>.
- [2] Duan, X.G., Li, H.X., and Deng, H., "Robustness of Fuzzy PID Controller Due to Itsinherent Saturation", *J. Process Control*, No. 22, pp. 470-476, 2012.
- [3] Karasakal, M., Guzelkaya, I., Eksin, Yesil, E., and Kumbasar, T., "Online Tuning Offuzzy PID Controllers via Rule Weighing, Based on Normalized Acceleration", *Eng. Appl. Artif. Intell.*, No. 26, pp.184-197, 2016.
- [4] Mahmoodabadi, M. and Jahanshahi, H., "Multi-Objective Optimized Fuzzy-Pidcontrollers for Fourth Order Non-linear Systems", *Eng. Sci. Tech. Int. J.*, No.19, pp.1084-1098, 2016.
- [5] Sahib, M.A., "A Novel Optimal PID Plus Second Order Derivative Controller for AVRsystem", *Eng. Sci. Tech. Int. J.*, No. 18, pp. 194-206, 2015.
- [6] Yuce, E., Tokat, S., Minaei, S., and Cicekoglu, O., "Low-Component-Countinsensitive Current-Mode And Voltage-Mode PID, PI And PD Controllers," *Frequenz*, Vol. 60, pp. 29-33, 2006.
- [7] Srisakultiew, S. and Siripruchyanun, M., "A Synthesis of Electronically Controllable Current-Mode PI, PD, and PID Controllers Employing CCCDBAS", *Circuits and Systems*, Vol. 4, pp. 287-292, 2013.
- [8] Zuperl, U., Cus, F., and Milfelner, M., "Fuzzy Control Strategy for an Adaptive Forcecontrolin End-Milling", *J. Mater. Process. Tech.*, No. 164, pp. 1472-1478, 2005.
- [9] Filipe, N. and Tsiotras, P., "Adaptive Position and Attitude-Tracking Controller Forsatellite Proximity Operations Using Dual Quaternions", *J. Guid. Control Dyn.*, No. 38, pp. 566-577, 2014.
- [10] Zhang, C., Wang, D., Zhang, and Shao, X., "Learning Observer Based Andevent-Triggered Control to Spacecraft Against Actuator Faults", *Aerosp. Sci. Tech.*, Vol. 78, pp. 522-530, 2018.
- [11] Miao, Y., Wang, F., and Liu, M., "Anti-Disturbance Back Stepping Attitude Control for Rigid-Flexible Coupling Spacecraft", *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 50729-50736, 2018.
- [12] Show, L.L., Juang, J.C., and Jan, Y.W., "An LMI-Based Non-linear Attitude Control Approach", *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, Vol. 11, No. 1, pp. 73-83, 2003.
- [13] Jiang, B., Hu, Q. and Friswell, M.I., "Fixed-Time Attitude Control for Rigid Spacecraft with Actuator Saturation and Faults", *IEEE Trans. Control Syst. Tech.*, Vol. 24, No. 5, pp. 1892-1898, 2016.
- [14] Sun, S., Zhao, L., and Jia, Y., "Finite-Time Output Feedback Attitude Stabilisation for Rigid Spacecraft with Input Constraints", *IET Control Theory Appl.*, Vol. 10, No. 14, pp. 1740-1750, 2016.
- [15] Zou, A.M., de Ruiter, A.H.J., and Kumar, K.D., "Finite-Time Attitudetracking Control for Rigid Spacecraft with Control Input Constraints", *IET Control Theory Appl.*, Vol. 11, No. 7, pp. 931-940, 2017.
- [16] Luo, W., Chu, Y.C., and Ling, K.V., "Inverse Optimal Adaptive Control for Attitude Tracking of

- Flexible Coupled System of Spacecraft with Rapid Maneuver," *Mechanical Engineering Science*, Vol. 233, No. 14, pp. 4896-4913, 2019.
- [41] Gao, H., He, W., Zhou, C., and Sun, C., "Neural Network Control of a Two-Link Flexible Robotic Manipulator Using Assumed Mode Method," *IEEE Transactions On Industrial InformaticS*, Vol. 154, pp. 1-8, 2019.
- [42] He, W. and Liu, J., "Vibration Control of a Flexible Beam," *Vibration Control and Stability Analysis*, 10.1007/978-981-10-7539-1\_3, 2018.
- [43] Jiang, T., Liu, J., and He, W., "Boundary Control For A Flexible Manipulator Based on Infinite Dimensional Disturbance Observer," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 348, pp. 1-14, 2015.
- [44] Jnifene, A. and Andrews, W. "Experimental Study on Active Vibration Control of a Single-Link Flexible Manipulator Using Tools of Fuzzy Logic and Neural Networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 54, No. 3, pp. 1200 - 1208 2005.
- [45] Kiang, C.T., Spowage, A., and Yoong, C.K., "Review of Control and Sensor System of Flexible Manipulator," *J. Intell Robot Syst.*, Vol. 201, pp.187-213, 2015.
- [46] Liu, Ch., Shi, K., and Sun, Z., "Robust H1 controller Design for Attitude Stabilization of Flexible Spacecraft with Input Constraints", *Advances in Space Research*, Vol. 63, No. 5, pp. 1498-1522, 2018.
- [47] Kumar Pradhan, S. and Subudhi, B., "Nonlinear Adaptive Model Predictive Controller for a Flexible Manipulator: An Experimental Study," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 2, No. 1, pp. 1754 - 1768, 2014.
- [32] Zhou, Q. and Wang, L., Wu, C., and Li, H., "Adaptive Fuzzy Tracking Control for a Class of Pure-Feedback Nonlinear Systems with Time-Varying Delay And Unknown Dead Zone", *Fuzzy Sets Syst.* Vol. 329, pp. 36-60, 2016.
- [33] Yu, L. and Fu, M., "A Robust Nite-Time Output Feedback Controlscheme for Marine Surface Vehicles Formation," *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 41291-41301, 2018.
- [34] Sun, S., Zhao, L., and Jia, Y., "Finite-Time Output Feedback Attitude Stabilization For Rigid Spacecraft With Input Constraints," *IET Control Theory Appl.* Vol. 10, No. 14, pp. 1740-1750, 2016.
- [35] Su, J. and Cai, K.-Y., "Globally Stabilizing Proportional-Integral-Derivativecontrol Laws for Rigid-body Attitude Tracking," *J. Guid., Control Dyn.*, Vol. 34, No. 4, pp. 1260-1264, 2011.
- [36] Chammas, A.B. and Leondes, C.T., "Pole Assignment by Piecewise Constant Output Feedback." *Int. J. Control*, Vol. 29, No. 1, pp. 31-38, 1979.
- [37] Zuperl, U. Cus, F., and Milfelner, M., Fuzzy Control Strategy for an Adaptive Forcecontrol In End-Milling, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 164, pp. 1472-1478, 2005.
- [38] Guo, Y., "Velocity-Free Sliding Mode Control for Spacecraft with Input Saturation," *Acta Astronautica*, pp. 1-8, 2019.
- [39] Zhang, C., Ma, G., Sun, Y., and Li, C., "Prescribed Performance Adaptive Attitude Tracking Control for Flexible Spacecraft with Active Vibration Suppression," *Nonlinear Dyn.*, Vol. 96, No. 3, pp. 1909-1926 2019.
- [40] Cao, Y., Cao, D., and Huang, W., "Nonlinear Dynamic Modeling and Decoupling for Rigid-