



طراحی و پیاده‌سازی عملی کنترل‌کننده خطی‌ساز پسخور تطبیقی مبتنی بر رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته برای بازوی اهرمی با مفصل انعطاف‌پذیر

سید کیانوش سمیعی^۱، مهدی میرزایی^{۲*}، صدرا رفعت‌نیا^۳

^۱ کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

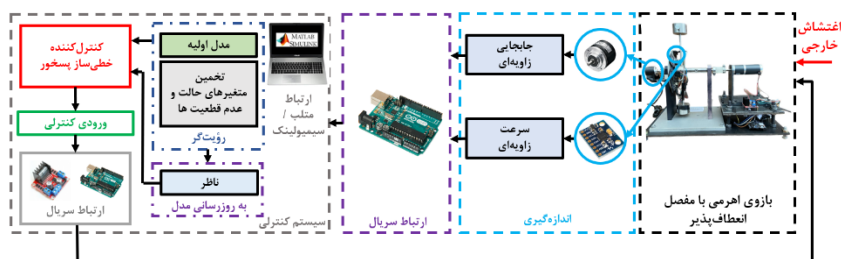
^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

برجسته‌ها

- طراحی سیستم کنترل تطبیقی برای بازوی با مفصل انعطاف‌پذیر
- تخمین برخط عدم قطعیت‌های مدل
- کاهش تعداد حسگرها به‌واسطه استفاده از مدل مرتبه کاهش‌یافته
- پیاده‌سازی عملی سیستم کنترلی

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸

ارائه برخط: ۱۴۰۲/۰۲/۱۷

*نویسنده مسئول:

mirzaei@sut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

مفصل انعطاف‌پذیر

رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته

به‌روزرسانی مدل

کنترل‌کننده خطی‌ساز پسخور

تطبیقی

پیاده‌سازی عملی

چکیده

در این مقاله به طراحی و پیاده‌سازی عملی یک کنترل‌کننده مبتنی بر خطی‌ساز پسخور برای بازوی اهرمی با مفصل انعطاف‌پذیر در حضور اغتشاشات خارجی و عدم قطعیت‌های مدل پرداخته می‌شود. برای دسترسی به یک مدل دینامیکی با مرتبه کاهش‌یافته، اما دقیق و قابل اطمینان از سیستم جهت استفاده در طراحی کنترل‌کننده، یک رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته پیشنهاد می‌شود. در روش پیشنهادی، با در نظر گرفتن جمله دربرگیرنده عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات خارجی سیستم به‌عنوان یک متغیر حالت جدید، تخمینی از این متغیر در کنار سرعت زاویه‌ای بازو با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری مربوط به موقعیت زاویه‌ای بازو ارائه می‌شود. کنترل‌کننده طراحی‌شده مبتنی بر این رؤیت‌گر می‌تواند خود را با شرایط واقعی تطبیق داده و در هر لحظه اطلاعات مربوط به عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات خارجی را استفاده نماید. سیستم کنترلی با و بدون استفاده از رؤیت‌گر به‌صورت آزمایشگاهی برای بازوی اهرمی با مفصل انعطاف‌پذیر پیاده‌سازی می‌شود. نتایج حاصل حاکی از این است که اغتشاشات خارجی و عدم قطعیت‌های موجود در سیستم به‌صورت برخط به‌خوبی تخمین زده شده و به کنترل‌کننده ارسال می‌گردد. بدین ترتیب کنترل‌کننده تطبیقی طراحی‌شده می‌تواند با بهره‌گیری از اطلاعات فقط یک حسگر به‌واسطه استفاده از مدل کاهش‌یافته، مسیرهای مختلف برای بازوی اهرمی با مفصل انعطاف‌پذیر را با دقت بالایی در شرایط واقعی ردیابی کند. همچنین، الگوریتم پیشنهادی به دلیل حجم محاسبات کم، سریع بوده و برای پیاده‌سازی عملی مناسب است.

۱- مقدمه

پسخور [۵]، کنترل برگشت به عقب [۶]، کنترل مد لغزشی [۷ و ۸] و کنترل تطبیقی [۹ و ۱۰] برای مقابله با دینامیک غیرخطی و عدم قطعیت‌های سیستم ارائه‌شده‌اند. گو و چن [۱۱] یک کنترل‌کننده مد لغزشی مبتنی بر مشاهده‌گر را برای رباتی تک بازو با مفصل انعطاف‌پذیر در حضور عدم قطعیت و اغتشاش پیشنهاد کردند. هو و همکاران [۱۲] از یک کنترل مد لغزشی مرتبه دوم مبتنی بر شبکه عصبی برای ربات با مفصل انعطاف‌پذیر در حضور عدم قطعیت و اغتشاش خارجی ارائه کردند. سان و همکاران [۱۳] ترکیبی از کنترل‌کننده‌های برگشت به عقب و تطبیقی زمان محدود را استفاده نمودند. اسکندر و همکاران [۱۴] یک طرح کنترل ردیابی تطبیقی زمان محدود برای ربات‌هایی با مفصل انعطاف‌پذیر ارائه کردند که در آن از یک سیستم فازی برای تقریب توابع غیرخطی ناشناخته استفاده شده است.

در اکثر کارهای ارائه‌شده در بالا از مدل مرتبه کامل برای ربات‌های با مفصل انعطاف‌پذیر استفاده شده است. در این کارها که انعطاف‌پذیری مفصل در مدل طراحی کنترل‌کننده در نظر گرفته می‌شود، دینامیکی با مرتبه چهار برای یک بازو با مفصل انعطاف‌پذیر به دست می‌آید، درحالی‌که مرتبه‌ی سیستم برای بازو با مفصل صلب برابر با دو است. در نتیجه، در حالت اول درجه نسی بین گشتاور موتور و موقعیت بازو به چهار افزایش می‌یابد که فرآیند طراحی کنترل‌کننده را پیچیده می‌کند. ضمن اینکه در این حالت نیاز به استفاده از حسگرهای اضافی برای اندازه‌گیری چهار متغیر حالت می‌باشد که مقرون‌به‌صرفه نبوده و نگهداری و عیب‌یابی آن نیز مشکل می‌باشد. همچنین در برخی موارد، به دلیل محدودیت فضا، نصب حسگرهای اضافی دشوار یا حتی غیرممکن است. از سوی دیگر در اکثر کارهای انجام‌شده، با صرف‌نظر از برخی اثرات دینامیکی مانند اصطکاک مفاصل و پارامترهای متغیر با زمان، مدل‌هایی از بازوهای با مفصل انعطاف‌پذیر ارائه‌شده و تلاش گردیده تا با استفاده از روش‌های کنترلی مقاوم، اثر عدم قطعیت‌های مدل‌سازی تا حد امکان برطرف شود که مستلزم مصرف انرژی‌های کنترلی بالا است.

با در نظر گرفتن مطالب فوق، استفاده از تخمین برخط دقیقی از دینامیک و متغیرهای حالت سیستم در حضور عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات خارجی، می‌تواند در جهت

در صنعت مدرن، نیازها و تقاضاهای صنایع باعث ظهور فناوری‌های مربوط به کنترل دینامیک بازوهای رباتیک، جهت افزایش کاربرد، قابلیت اعتماد و همچنین سهولت هرچه بیش‌تر کار با آن‌ها شده است. در این میان، ربات‌های انعطاف‌پذیر که دارای بازو یا مفصل انعطاف‌پذیر هستند، به دلیل وزن کم‌تر، دسترسی به فضای کاری بیش‌تر و عملکرد مطمئن‌تر کاربرد فراوانی در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند [۱ و ۲]. شایان‌ذکر است که در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری مفاصل در بسیاری موارد به دلیل استفاده از شفت‌های بلند، استفاده از حسگر گشتاور در مفاصل و همین‌طور در سیستم‌های انتقال قدرت اجتناب‌ناپذیر است [۳ و ۴]؛ بنابراین رقابت در راستای بهینه‌سازی سیستم‌های رباتیکی و بهبود عملکرد آن‌ها در حضور مفاصل انعطاف‌پذیر ادامه دارد و مقالات علمی و تحقیقاتی بسیار زیادی در این زمینه انجام‌شده است که شاهد اهمیت این موضوع می‌باشد.

انتخاب مدل‌های ریاضی مناسب در بازوهای رباتیک با مفاصل انعطاف‌پذیر به دلیل پیچیدگی مدل‌سازی، مرحله‌ای مهم در توسعه روش‌های کنترلی برای این سیستم‌ها می‌باشد. در بازوهای با مفصل انعطاف‌پذیر به علت ساده‌سازی‌هایی مانند خطی در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری مفاصل در مدل‌سازی و صرف‌نظر کردن از اصطکاک ناشناخته، مدل دقیقی برای سیستم استخراج نمی‌شود. همچنین پارامترهای متغیر با زمان مختلفی همچون ضریب فنریت مفاصل انعطاف‌پذیر و تغییرات اینرسی سیستم در حضور اغتشاشات مختلف باعث شده است که مدل‌های ریاضی از پیش تعیین‌شده رفتار دقیقی از عملکرد واقعی دینامیک ربات ارائه ندهند. در مجموع، دینامیک غیرخطی بازوهای ربات و عدم قطعیت‌های مدل ربات از مهم‌ترین چالش‌ها در راستای پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های مبتنی بر مدل در سیستم‌های کنترلی می‌باشند. ضمن اینکه انعطاف‌پذیری مفاصل باعث بالا رفتن درجات آزادی و افزایش مرتبه‌ی سیستم کنترلی می‌شود.

روش‌های کنترلی مختلفی توسط محققین برای کنترل بازوهای رباتیک با مفصل انعطاف‌پذیر پیشنهاد شده است. در این راستا روش‌های مختلفی مبتنی بر کنترل خطی‌ساز

محدود ناشی از تخمین عدم قطعیت‌های مدل ارائه می‌شود. در ادامه جهت بررسی الگوریتم کنترل تطبیقی ارائه شده در محیط واقعی، از تست‌های عملی برای بازوی مکانیکی با مفصل انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود. در این راستا، پس از طراحی و چاپ سه‌بعدی یک مفصل انعطاف‌پذیر با استفاده از مواد ترموپلاستیک پلی اورتان، به ساخت و حسگربندی یک بازوی اهرمی پرداخته می‌شود. شایان‌ذکر است، تنها حسگر استفاده شده در این پژوهش، یک زاویه‌سنج یا انکودر است که موقعیت زاویه‌ای بازو را اندازه می‌گیرد و دیگر متغیرهای حالت به همراه عدم قطعیت‌های مدل‌سازی که در قالب یک متغیر حالت جدید تعریف می‌شود، تخمین زده می‌شود. در ادامه به تست الگوریتم پیشنهادی در مسیرهای مرجع مختلف پرداخته می‌شود تا نتایج عملکرد روش پیشنهادی در ردیابی مسیر مرجع در حضور گستره وسیعی از عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات خارجی بررسی گردد. به ارائه نتایج سیستم کنترلی در حالت با و بدون استفاده از رؤیت‌گر پرداخته خواهد شد تا مقایسه‌ای با رویکردهای قبلی نیز انجام شود.

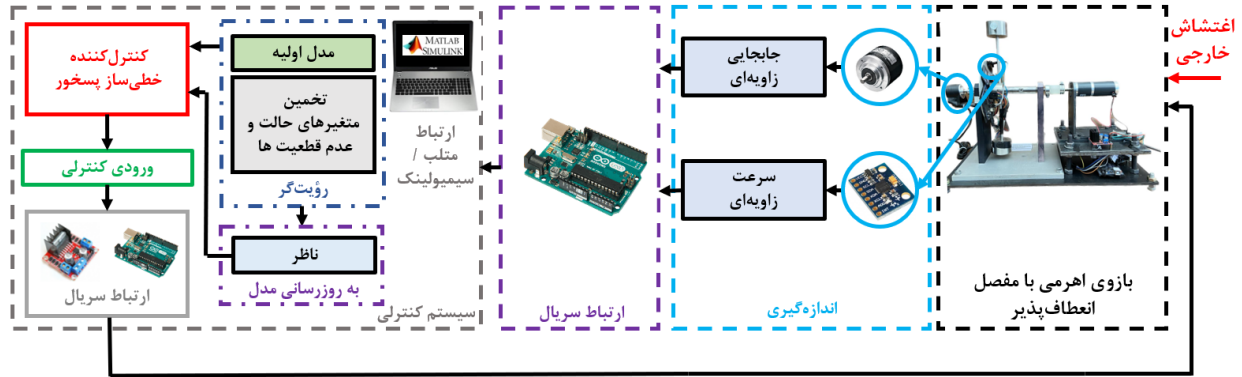
این مقاله به شکل زیر سامان‌دهی می‌شود: بعد از مقدمه، در بخش ۲ ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌شود. در بخش ۳ به استخراج مدل سیستم پرداخته شده و در بخش ۴ از یک رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته برای تخمین عدم قطعیت‌های مدل و متغیرهای حالت استفاده می‌شود. در بخش ۵ یک کنترل‌کننده خطی‌ساز پسخور بر پایه مدل به‌روزرسانی طراحی خواهد شد. در بخش ۶ نتایج پیاده‌سازی عملی کنترل‌کننده پیشنهادی در محیط واقعی نشان داده شده و در نهایت نتیجه‌گیری در بخش ۷ ارائه می‌شود.

۲- ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی

شکل ۱ نمای کلی سیستم کنترل پیشنهادی را نشان می‌دهد. این سیستم متشکل از یک بازوی اهرمی است که به یک موتور الکتریکی توسط یک مفصل انعطاف‌پذیر متصل است. حسگر زاویه‌سنج به مجموعه متصل شده تا جابجایی زاویه‌ای بازو را اندازه بگیرد. در این مجموعه از ارتباط سریالی بین سیستم و رایانه برای دریافت داده‌ی حسگرها و ارسال ورودی کنترلی استفاده می‌شود. شایان‌ذکر است از نرم‌افزار متلب جهت پردازش داده‌ها و پیاده‌سازی کنترل‌کننده استفاده شده است.

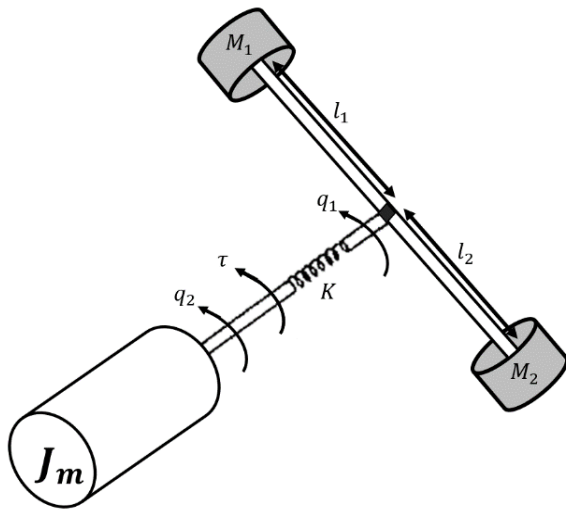
کنترل دقیق این سیستم‌ها بسیار مؤثر باشد. بر همین اساس در این پژوهش از یک رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته، برای تخمین برخط دینامیک سیستم و عدم قطعیت‌ها استفاده شده است. رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته یک روش شناخته شده برای تخمین عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات مدل در کاربردهای مختلف است [۱۵ و ۱۶]. در همین راستا از این رؤیت‌گر برای تخمین اغتشاشات و عدم قطعیت‌های مدل در بازوهای رباتیک اما با مفاصل صلب و در ترکیب با کنترل‌کننده‌هایی همچون مد لغزشی [۱۷] و کنترل برگشت به عقب [۱۸] استفاده شده است. با بررسی این مراجع، انتخاب ضرایب وزنی در این رؤیت‌گر یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در عملکرد این روش می‌باشد که باید در طراحی رؤیت‌گر مدنظر قرار گیرد.

در این پژوهش برای جلوگیری از افزایش درجات آزادی سیستم واقعی به دلیل انعطاف‌پذیری مفصل و به تبع آن افزایش مرتبه‌ی مدل طراحی، از یک مدل با مرتبه کاهش یافته برای طراحی استفاده می‌شود که در آن مفصل صلب فرض می‌گردد. با این کار علاوه بر سادگی در طراحی کنترل‌کننده و تأثیرپذیری بیش‌تر خروجی از ورودی سیستم، از حسگرهای کم‌تری نیز استفاده می‌گردد. در عوض دینامیک مدل نشده‌ی ناشی از انعطاف‌پذیری مفصل همراه با سایر منابع عدم قطعیت توسط رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته تخمین زده می‌شود. تحلیل و استخراج معادلات رؤیت‌گر و ارائه ضرایب وزنی رؤیت‌گر در این مقاله ارائه شده و پایداری ورودی-محدود، خروجی-محدود رؤیت‌گر در حضور عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات خارجی سیستم ارائه می‌شود. با تخمین عدم قطعیت‌های مدل، مدل اولیه‌ی به‌روز شده‌ای در هر لحظه به دست می‌آید. در مرحله آخر، یک کنترل‌کننده خطی‌ساز پسخور برای سیستم طراحی شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. کنترل‌کننده پیشنهادی با دریافت اطلاعات لازم از سیستم واقعی توسط رؤیت‌گر، به‌صورت برخط به‌روزرسانی شده و عملکرد قابل قبولی در شرایط محیطی واقعی خواهد داشت. با توجه به اینکه رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته دارای پایداری ورودی-محدود، خروجی-محدود بوده و خطای تخمین به‌صورت یک مقدار محدود هرچند کوچک می‌باشد، بنابراین قضیه‌ای به‌منظور بررسی پایداری کنترل‌کننده در حضور خطای



شکل (۱): ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی.

متمركز و مركز بازو است. K نشان‌دهنده سفتی مفصل و g شتاب گرانش است.



شکل (۲): شماتیک بازوی اهرمی با مفصل انعطاف‌پذیر.

برای به دست آوردن معادله حاکم بر سیستم می‌توان از معادله لاگرانژ به شکل زیر استفاده کرد:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial P}{\partial q_i} = Q_i, \quad (3)$$

که در آن $Q_1 = 0$ و $Q_2 = \tau$ نیروهای تعمیم‌یافته هستند. با جایگذاری معادلات (۱) و (۲) در معادله (۳)، معادلات حرکت به صورت زیر استخراج خواهند شد:

$$I \ddot{q}_1 + G \sin q_1 + K(q_1 - q_2) = 0 \quad (4)$$

$$J_m \ddot{q}_2 - K(q_1 - q_2) = \tau, \quad (5)$$

که $I = M_1 l_1^2 + M_2 l_2^2$ نشان‌دهنده اینرسی بازوی اهرمی و $G = M_2 g l_2 - M_1 g l_1$ عبارت جاذبه را نشان می‌دهد. τ گشتاور موتور است. معادلات (۴) و (۵) که یک سیستم مرتبه

در این ساختار، الگوریتم رؤیت‌گر پیشنهادی علاوه بر تخمین متغیرهای حالت، عدم قطعیت‌های بین مدل کاهش مرتبه یافته و مدل واقعی را تخمین می‌زند. بر این اساس، ناظر پس از دریافت اطلاعات از رؤیت‌گر، مدل اولیه طراحی را به‌روزرسانی کرده و در اختیار یک کنترل‌کننده خطی‌ساز پسخور قرار می‌دهد. سپس سیگنال کنترلی تعیین‌شده توسط کنترل‌کننده از طریق ارتباط سریال به سیستم بازمی‌گردد تا ساختار سخت‌افزار در حلقه تکمیل گردد. جزئیات بیشتر در مورد روش‌های کنترل و رؤیت‌گر در ادامه ارائه خواهند شد.

۳- مدل‌سازی

سیستم بازوی اهرمی با مفصل انعطاف‌پذیر، از یک بازوی بدون جرم با دو جرم متمركز در نقاط انتهایی تشکیل شده است. شکل ۲، شماتیکی از سیستم توصیف‌شده را نشان می‌دهد که در آن مفصل انعطاف‌پذیر به‌عنوان فنر پیچشی مدل شده است. معادلات حاکم بر حرکت سیستم را می‌توان با استفاده از معادله لاگرانژ به دست آورد. در این رابطه انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل به ترتیب به صورت روابط (۱) و (۲) نوشته می‌شوند.

$$T = \frac{1}{2} M_1 (l_1 \dot{q}_1)^2 + \frac{1}{2} M_2 (l_2 \dot{q}_1)^2 + \frac{1}{2} J_m \dot{q}_2^2, \quad (1)$$

$$P = M_1 g l_1 \cos q_1 - M_2 g l_2 \cos q_1 + \frac{1}{2} K (q_1 - q_2)^2, \quad (2)$$

که در آن M_1 و M_2 جرم‌های انتهایی بازو و J_m ممان اینرسی روتور است. q_1 و q_2 به ترتیب جابجایی‌های زاویه‌ای بازو و روتور هستند. l_1 و l_2 نشان‌دهنده فواصل بین جرم‌های

دینامیک‌های مدل نشده به همراه عدم قطعیت‌های پارامتری است. جهت جبران این عدم قطعیت‌ها و دینامیک‌های مدل نشده، از یک رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته برای به‌روزرسانی مدل استفاده خواهد شد. در طراحی این رؤیت‌گر از $y = x_1$ به‌عنوان خروجی قابل‌اندازه‌گیری سیستم استفاده می‌گردد.

۴- طراحی رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته

در رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته استفاده‌شده، جمله شامل عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات سیستم، به‌عنوان یک متغیر حالت اضافی به‌صورت $x_3 = f(x) = -\frac{G}{I} \sin x_1 + \Delta$ تعریف می‌کند. بنابراین، مدل فضای حالت سیستم به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3 + \frac{1}{I} \tau, \\ \dot{x}_3 = \gamma(t), \end{cases} \quad (9)$$

که در آن $\gamma(t) = \dot{f}(x)$ محدود فرض می‌شود. بنابراین با فرض خروجی سیستم به شکل $y = x_1$ ، دینامیک رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 - \varphi_1(\hat{x}_1 - y), \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 + \frac{1}{I} \tau - \varphi_2(\hat{x}_1 - y), \\ \dot{\hat{x}}_3 = -\varphi_3(\hat{x}_1 - y), \end{cases} \quad (10)$$

که در آن $\varphi_i (i = 1, 2, 3)$ ضرایب رؤیت‌گر هستند. با انتخاب مناسب این ضرایب، رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته تخمینی از همه حالت‌ها از جمله متغیر حالت اضافی x_3 که حاوی عدم قطعیت‌های مدل می‌باشد، ارائه می‌کند. با کم کردن (۹) از (۱۰)، دینامیک خطای رؤیت‌گر به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \varphi_1 e_1, \\ \dot{e}_2 = e_3 - \varphi_2 e_1, \\ \dot{e}_3 = -\gamma(t) - \varphi_3 e_1, \end{cases} \quad (11)$$

که در آن $e_i = \hat{x}_i - x_i (i = 1, 2, 3)$ در معادله (۱۱) نشان‌دهنده دینامیک خطای تخمینی است. در این مورد، تنظیم مناسب ضرایب رؤیت‌گر می‌تواند پایداری ورودی-محدود، خروجی-محدود رؤیت‌گر را با این فرض که $\gamma(t)$ محدود است، تضمین کند. نحوه تنظیم φ_i در قضیه زیر پیشنهاد شده است:

چهارم را توصیف می‌کند توسط محققان برای کنترل موقعیت بازو با نیروی حرکتی تولیدشده توسط موتور استفاده‌شده است. کنترل خطی‌ساز پسخور بر اساس معادلات (۴) و (۵) در مقاله [۳ و ۱۹] ارائه‌شده است. فرم فضای حالت معادلات (۴) و (۵) در حضور اغتشاش خارجی d را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{G}{I} \sin x_1 - \frac{K}{I} (x_1 - x_3), \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = \frac{K}{J_m} (x_1 - x_3) + \frac{1}{J_m} (\tau + d), \end{cases} \quad (6)$$

که در آن $x_4 = \dot{q}_2$ و $x_3 = q_2$ ، $x_2 = \dot{q}_1$ ، $x_1 = q_1$ متغیرهای حالت سیستم هستند. دو چالش برای طراحی کنترل‌کننده در استفاده از معادله (۶) وجود دارد. اولین مورد، درجه نسبی بالا بین ورودی کنترلی و خروجی است. در این حالت، درجه نسبی برای جابجایی زاویه‌ای نسبت به گشتاور موتور برابر با چهار است. چالش دیگر استفاده از حسگرهای مختلف برای اندازه‌گیری چهار تا حالت سیستم است. علاوه بر این، پارامترهای نامشخص مانند سفتی مفصل و دینامیک مدل نشده مانند اصطکاک مفصل، مدل را برای طراحی کنترل‌کننده غیرقابل‌اعتماد می‌کند.

در این مقاله، برای حل چالش‌های فوق، یک مدل ساده‌شده با نادیده گرفتن انعطاف‌پذیری مفصل به‌عنوان مدل اولیه برای سیستم با یک درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود. معادله حاکم بر این مدل به‌صورت زیر است:

$$I\ddot{q} + G \sin q = \tau + \Delta, \quad (7)$$

که در آن Δ به‌عنوان نماینده‌ای شامل تمام عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات خارجی در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن $x_1 = q$ و $x_2 = \dot{q}$ ، معادلات فضای حالت به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{G}{I} \sin x_1 + \frac{1}{I} \tau + \Delta. \end{cases} \quad (8)$$

مدل بیان‌شده توسط معادله (۸) دو متغیر حالت داشته و دارای درجه نسبی دو است که باعث خوش‌تعریف بودن سیستم می‌شود [۲۰]، اما این مدل حاوی منابع بسیاری از عدم قطعیت‌ها از جمله انعطاف‌پذیری مفصل و سایر

می‌شود. با این حال، با کاهش پارامتر آزاد موجود در مخرج کسرها، حساسیت به نویز اندازه‌گیری و خطاهای مدل‌سازی در خطای تخمین افزایش می‌یابد. همچنین خطاهای عددی ممکن است به دلیل حل مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل در هر زمان نمونه‌گیری رخ دهد [۲۱].

۵- طراحی کنترل‌کننده

باهداف کاهش خطای ردیابی بین بازو و مسیرهای موردنظر، کنترل‌کننده خطی‌ساز پسخور طراحی شده است. در روش کنترل پیشنهادی، از مدل (۸) به‌عنوان مدل طراحی برای کنترل‌کننده استفاده می‌شود. شایان‌ذکر است که در این حالت کنترل‌کننده با فرض دسترسی به دینامیک دقیق شامل عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات خارجی طراحی می‌شود. رؤیت‌گر متغیرهای حالت سیستم را تخمین‌زده و در اختیار کنترل‌کننده و ناظر قرار می‌دهد. در ادامه ناظر مدل به‌روزرسانی شده را در اختیار کنترل‌کننده قرار داده و کنترل‌کننده مدل فرآیند خود را اصلاح می‌نماید.

با توجه به معادله (۸)، ورودی کنترلی برای اولین بار در دومین مرتبه‌ی مشتق خروجی سیستم به‌صورت صریح ظاهر می‌شود:

$$\ddot{y} = -\frac{G}{I} \sin x_1 + \frac{1}{I} \tau + \Delta, \quad (16)$$

بنابراین با فرض دینامیک دقیق و دسترسی به عدم قطعیت‌های مدل یعنی Δ ، کنترل‌کننده خطی‌ساز پسخور به شکل زیر طراحی می‌شود:

$$\tau = -I(\alpha - \beta), \quad (17)$$

که در آن

$$\alpha = -\frac{G}{I} \sin x_1 + \Delta, \quad (18)$$

$$\beta = \ddot{y}_d - a_1(\dot{y} - \dot{y}_d) - a_0(y - y_d).$$

در ادامه، ناظر متغیرهای حالت عدم قطعیت‌های مدل \hat{x}_3 را در اختیار کنترل‌کننده قرار می‌دهد تا به‌جای α استفاده نماید. بنابراین کنترل‌کننده با استفاده از مدل به‌روزرسانی شده به ارائه ورودی کنترلی مناسب مبادرت می‌کند.

با توجه به قضیه ۱، رؤیت‌گر پایدار ورودی-محدود، خروجی-محدود بوده و خطای تخمین به‌صورت یک مقدار محدود هرچند کوچک خواهد بود. بنابراین قضیه ۲ به‌منظور بررسی

قضیه ۱: با انتخاب $\varphi_1 = 3/\varepsilon$ ، $\varphi_2 = 3/\varepsilon^2$ و $\varphi_3 = 1/\varepsilon^3$ ، که در آن ε یک پارامتر آزاد است، دینامیک خطای تخمین (۱۱) با فرض محدود بودن $\gamma(t)$ ، محدود خواهد بود.

اثبات: با انتخاب $\varphi_1 = 3/\varepsilon$ ، $\varphi_2 = 3/\varepsilon^2$ و $\varphi_3 = 1/\varepsilon^3$ دینامیک خطای (۱۰) به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} - G\gamma(t), \quad (12)$$

که در آن $E = \begin{bmatrix} -\frac{3}{\varepsilon} & 1 & 0 \\ -\frac{3}{\varepsilon^2} & 0 & 1 \\ -\frac{1}{\varepsilon^3} & 0 & 0 \end{bmatrix}$ و $G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ است. سه مقدار

ویژه ماتریس E یکسان و برابر با $\lambda_i = -\frac{1}{\varepsilon}$ ($i = 1, 2, 3$) می‌باشند. بنابراین، برای یک $\varepsilon > 0$ ، ماتریس E هورویتر بوده و دینامیک خطا پایدار ورودی-محدود، خروجی-محدود است. پارامتر قابل تنظیم ε ، بر سرعت همگرایی پاسخ‌ها تأثیر می‌گذارد. حل سیستم معادلات دیفرانسیل خطی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$e(t) = e^{Et} e(0) + \int_0^t e^{E(t-\vartheta)} G\gamma(\vartheta) d\vartheta, \quad (13)$$

که

$$e^{Et} = e^{-\frac{1}{\varepsilon}t} N, \quad (14)$$

و

$$N = \begin{bmatrix} \varepsilon - 2e^2t + \frac{(2\varepsilon^2 - \varepsilon)}{2}t^2 & \varepsilon^3t - \frac{\varepsilon^3}{2}t^2 & \frac{\varepsilon^3}{2}t^2 \\ -3\varepsilon t + \frac{(3\varepsilon^2 + 1)}{2}t^2 & \varepsilon^2t - \frac{(\varepsilon^2 + \varepsilon)}{2}t & \varepsilon^3t + \frac{(3\varepsilon^2 - \varepsilon^3)}{2}t^2 \\ -t + \frac{1}{2}t^2 & -\frac{1}{2}t^2 & \varepsilon + e^2t + \frac{(2\varepsilon^2 - \varepsilon)}{2}t^2 \end{bmatrix}$$

به‌وضوح مشاهده می‌شود که مقادیر کوچک‌تر $\varepsilon > 0$ منجر به پاسخ سریع‌تر می‌شود. بنابراین، مقادیر مثبت برای ε نتیجه می‌دهد که

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \int_0^t e^{E(t-\vartheta)} G\gamma(\vartheta) d\vartheta. \quad (15)$$

از (۱۵) می‌توان نتیجه گرفت که برای هر $\varepsilon > 0$ ، با فرض کران بودن $\gamma(\vartheta)$ خطای تخمین به یک مجموعه فشرده همگرا خواهد شد ■

نکته: پارامتر آزاد ε بر مکان مقادیر ویژه و در نتیجه سرعت رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته به‌عنوان یک رؤیت‌گر با بهره بالا تأثیر می‌گذارد. مقادیر کوچک‌تر ε منجر به پاسخ‌های سریع‌تر

بر اساس معادله (۲۴)، مشتق تابع کاندید لیاپانوف به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{V} = a_0 e \dot{e} + \dot{e} \dot{e} \quad (25)$$

با جاگذاری معادله (۱۹) در (۲۵):

$$\dot{V} = -a_1 \dot{e}^2 + \kappa \dot{e} \quad (26)$$

بر اساس معادله (۲۶) و استفاده از حد بالای $|\kappa| < \Gamma$ ، نامساوی زیر قابل استخراج می‌باشد:

$$\dot{V} \leq -a_1 \dot{e}^2 + \Gamma |\dot{e}| \quad (27)$$

ترم دوم نامساوی (۲۷) با استفاده از نامساوی معروف $\lambda \xi \leq \rho \lambda^2 + \xi^2 / 4\rho$ به ازای هر λ و ξ و $\rho > 0$ بازنویسی می‌شود. با در نظر گرفتن $\rho = 1/a_1$:

$$\dot{V} \leq -\frac{3}{4} a_1 \dot{e}^2 + \frac{\Gamma^2}{a_1} \quad (28)$$

نامساوی (۲۸) با استفاده از تابع لیاپانوف (۲۴) و رابطه (۲۳) به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$\dot{V} \leq -\frac{3}{2} a_1 V + \frac{3}{4} a_1 a_0 \delta^2 + \frac{\Gamma^2}{a_1} \quad (29)$$

با در نظر گرفتن حد بالای $|\frac{\Gamma^2}{a_1} + \frac{3}{4} a_1 a_0 \delta^2| < \Phi$ ، نامساوی (۲۹) به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{V} \leq -\frac{3}{2} a_1 V + \Phi \quad (30)$$

با حل نامساوی (۳۰) و استفاده از لم مقایسه‌ای نتیجه زیر استخراج می‌شود:

$$V \leq \left(V(0) - \frac{2}{3a_1} \Phi \right) e^{-\frac{3}{2} a_1 t} + \frac{2}{3a_1} \Phi \quad (31)$$

بنابراین، بر اساس نامساوی (۳۱)، مادامی‌که ضریب a_1 مثبت می‌باشد،

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V = \frac{2}{3a_1} \Phi \quad (32)$$

در نتیجه بر اساس معادله (۳۲) تابع کاندید لیاپانوف مقدار محدودی می‌باشد. بنابراین از آنجایی‌که تابع کاندید لیاپانوف ترکیبی از خطای ردیابی و مشتق آن بوده و همچنین خطای ردیابی بر اساس معادله (۲۳) مقدار محدودی است، مشتق خطای ردیابی نیز محدود خواهد بود ■

۶- نتایج

در این مقاله از مطالعات آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی استفاده می‌شود. در این ساختار، عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات سیستم توسط یک متغیر

پایداری کنترل‌کننده در حضور خطای محدود ناشی از تخمین عدم قطعیت‌های مدل ارائه می‌شود.

قضیه ۲: خطای ردیابی مسیر مرجع توسط کنترل‌کننده (۱۷) در حضور هر خطایی در تخمین دینامیک دقیق سیستم بازوی اهرمی، محدود خواهد ماند. در این حالت، قطب‌های کنترل‌کننده را می‌توان به گونه‌ای انتخاب نمود که خطای ردیابی مسیر مرجع در محدوده $|e| < \delta$ ($\delta > 0$) بماند. همچنین مشتق خطای ردیابی نیز محدود خواهد بود. اثبات: با جایگزینی معادله (۱۷) در معادله (۱۶) و با در نظر گرفتن $e = y - y_d$ ، دینامیک خطا به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\ddot{e} + a_1 \dot{e} + a_0 e = \kappa \quad (19)$$

که در آن κ خطای محدود ناشی از تخمین دینامیک سیستم می‌باشد. با توجه به قضیه ۱ و در نظر گرفتن حد بالا $|\kappa| < \Gamma$ برای خطای تخمین، معادله (۱۹) به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$\ddot{e} + a_1 \dot{e} + a_0 e \leq \Gamma \quad (20)$$

حل معادله دیفرانسیل مرتبه دوم بالا و استفاده از لم مقایسه [۲۲] منجر به نامساوی‌های زیر می‌شود:

$$e(t) \leq c_1 e^{-\frac{1}{2}(a_1 + \sqrt{\Lambda})t} + c_2 e^{-\frac{1}{2}(a_1 - \sqrt{\Lambda})t} + \frac{\Gamma}{a_0} \quad \Lambda > 0$$

$$e(t) \leq e^{-\frac{1}{2}a_1 t} (c_3 + c_4 t) + \frac{\Gamma}{a_0} \quad \Lambda = 0 \quad (21)$$

$$e(t) \leq e^{-\frac{1}{2}a_1 t} \left[c_5 \sin \left(\frac{\sqrt{|\Lambda|}}{2} t + \phi \right) \right] + \frac{\Gamma}{a_0} \quad \Lambda < 0$$

که در آن $\Lambda = a_1^2 - 4a_0$ می‌باشد. بنابراین مادامی‌که $a_i (i=1,2) > 0$ می‌باشند، نتیجه زیر برای تمامی حالات معادلات خطا (۲۱) قابل استخراج می‌باشد:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \frac{\Gamma}{a_0} \quad (22)$$

بر اساس معادله (۲۲) می‌توان نتیجه گرفت که برای هر $\delta > 0$ ، ضریب a_0 می‌تواند به شکل $\frac{\Gamma}{\delta} < a_0$ انتخاب شود تا خطای ردیابی به محدوده‌ی بسته زیر میل کند:

$$|e| \leq \delta \quad (23)$$

برای بررسی پایداری کلی دینامیک خطای سیستم مرتبه دوم، محدود بودن \dot{e} با انتخاب تابع کاندید لیاپانوف زیر بررسی می‌شود:

$$V = \frac{a_0}{2} e^2 + \frac{1}{2} \dot{e}^2 \quad (24)$$

جدول (۱): پارامترهای دستگاه آزمایش.

پارامتر	مقدار	واحد
جرم انتهایی ۱	۰/۵	kg
جرم انتهایی ۲	۰/۵۵	kg
طول بازو ۱	۰/۱۵	m
طول بازو ۲	۰/۱۴	m
اینرسی سیستم	۰/۰۲۲۵	kg.m ²
اینرسی موتور	۰/۰۱۶۷	kg.m ²

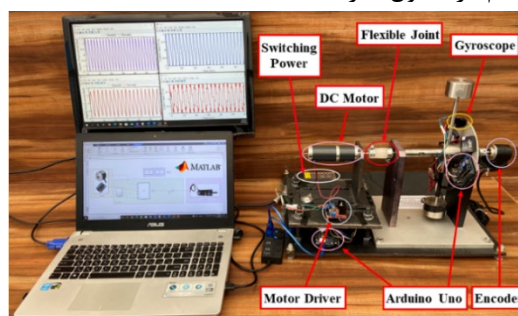
برای ارزیابی کنترل‌کننده پیشنهادی در محیط واقعی، تست‌های دینامیکی مختلف در سیستم بازوی اهرمی با مفصل انعطاف‌پذیر انجام می‌شود. در این ساختار علاوه بر دینامیک مدل‌نشده در مدل اولیه به دلیل کاهش مرتبه مدل، عدم قطعیت پارامتری شامل ۱۰ درصد در اینرسی سیستم برای مدل اولیه دینامیک بازوی اهرمی مفصل انعطاف‌پذیر و اغتشاش خارجی $d = 0.1 \sin 2t$ در نظر گرفته شده است. در طراحی رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته، برای پارامتر آزاد ε مقدار ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود.

در ابتدا، کنترل‌کننده پیشنهادی با در نظر گرفتن یک مسیر مرجع متغیر با زمان ارزیابی شده است. شایان‌ذکر است که کنترل‌کننده در حالت بدون استفاده از رؤیت‌گر، بر پایه مدل اولیه سیستم که تمام عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات در آن نادیده گرفته شده، طراحی می‌گردد. بر اساس شکل ۵، کنترل‌کننده با استفاده از رؤیت‌گر پیشنهادی توانسته است علاوه بر عدم قطعیت‌های مدل در برابر اغتشاشات نیز مقاوم باشد و آن را دفع کند که منجر به عملکرد بهتر آن نسبت به کنترل‌کننده خطی‌ساز پسخور بدون تخمین عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات خارجی شده است.

در ادامه به منظور بررسی استقلال کنترل‌کننده پیشنهادی از مسیر مرجع، این الگوریتم در مسیرهای هارمونیک با دامنه‌ها و فرکانس‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج تست برای این مسیرها در شکل‌های ۶ تا ۸ ارائه شده‌اند. بر اساس شکل‌های ۶ تا ۸، رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته توانسته تخمین مناسبی از عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات خارجی در اختیار کنترل‌کننده قرار دهد؛ بنابراین، کنترل‌کننده پیشنهادی از عملکرد مطلوبی در ردیابی مسیر برخوردار است.

حالت جدید به سیستم اضافه شده و توسط یک رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته تخمین زده می‌شود. سپس یک کنترل‌کننده خطی‌ساز پسخور به صورت تطبیقی جهت کنترل موقعیت بازوی اهرمی استفاده می‌شود. شایان‌ذکر است که در این مطالعه تنها از حسگر جابجایی زاویه‌ای برای مدل کاهش‌یافته استفاده می‌شود.

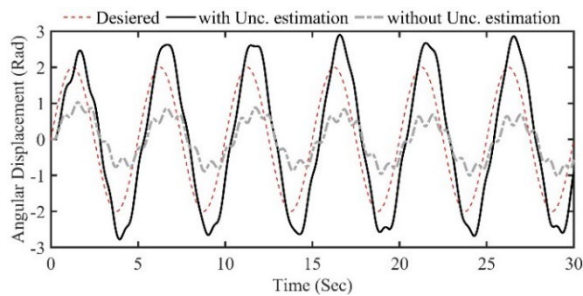
همانند شکل ۳ مشاهده می‌شود، دستگاه آزمایش متشکل از یک بازوی اهرمی است که وزنه‌هایی باقابلیت جابجایی روی آن سوار است. این بازو توسط مفصل انعطاف‌پذیر (شکل ۴) به یک موتور الکتریکی وصل شده است. در اینجا از ماده ترموپلاستیک پلی اورتان به دلیل انعطاف‌پذیری و دوام بالا برای تهیه مفصل انعطاف‌پذیر توسط چاپگر سه‌بعدی استفاده شده است. شایان‌ذکر است، ماده ترموپلاستیک پلی اورتان به علت انعطاف‌پذیری، دارای بیش‌ترین مقاومت ضربه‌ای بوده و از قابلیت تعدیل لرزش و مقاومت در برابر ضربه و سائیدگی برخوردار است. همچنین برای اندازه‌گیری زاویه از حسگر زاویه‌سنج دو فاز HN3806 استفاده شده است. داده‌های اندازه‌گیری شده از طریق ارتباط سریال به نرم‌افزار متلب ارسال می‌گردد. در نهایت، ورودی کنترلی با استفاده از PWM به یک موتور ۱۲ ولتی DC ارسال می‌گردد. پارامترهای سیستم در جدول ۱ ارائه شده‌اند.



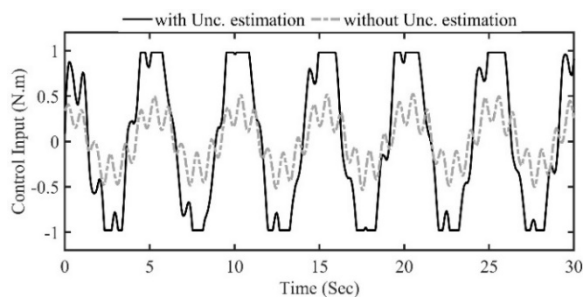
شکل (۳): پلتفرم بازوی اهرمی با مفصل انعطاف‌پذیر.



شکل (۴): مفصل انعطاف‌پذیر از جنس ترموپلاستیک پلی‌اورتان.

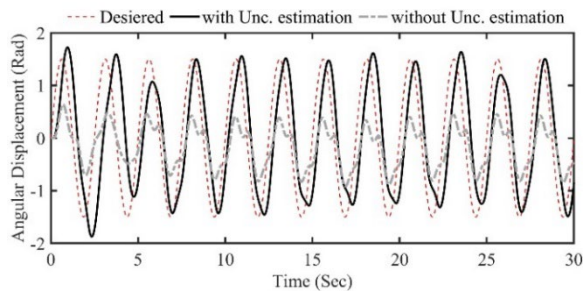


(الف)

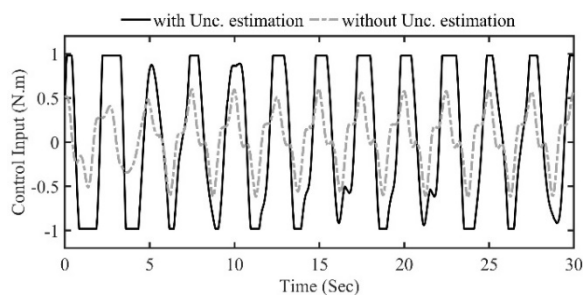


(ب)

شکل (۷): نتایج تجربی کنترل‌کننده پیشنهادی با و بدون رؤیت‌گر برای ورودی مرجع $2 \sin 0.4\pi t$ (الف) جابجایی زاویه‌ای؛ (ب) نیروی کنترلی.

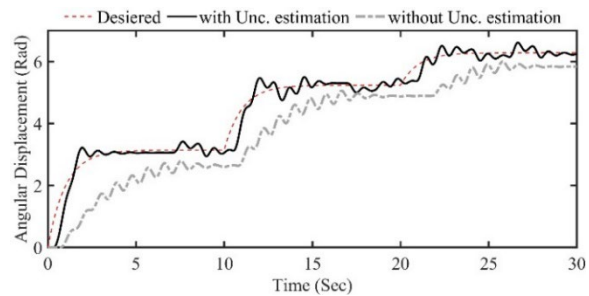


(الف)

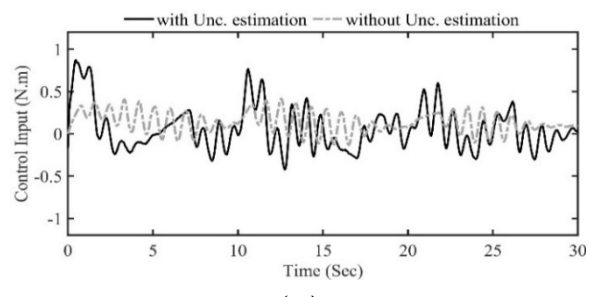


(ب)

شکل (۸): نتایج تجربی کنترل‌کننده پیشنهادی با و بدون رؤیت‌گر برای ورودی مرجع $1.5 \sin 0.8\pi t$ (الف) جابجایی زاویه‌ای؛ (ب) نیروی کنترلی.

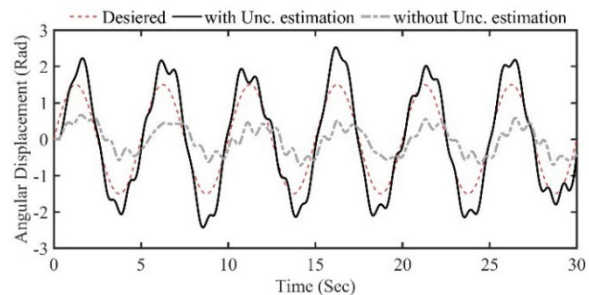


(الف)

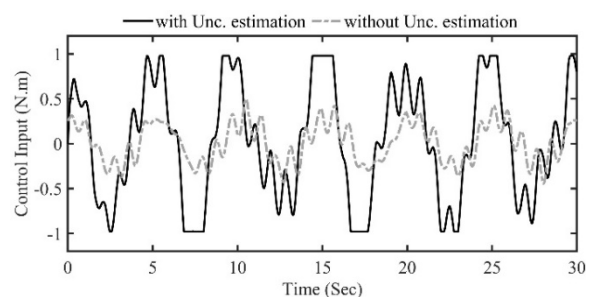


(ب)

شکل (۵): نتایج تجربی کنترل‌کننده پیشنهادی با و بدون رؤیت‌گر برای ورودی مرجع پله متغیر: (الف) جابجایی زاویه‌ای؛ (ب) نیروی کنترلی.



(الف)



(ب)

شکل (۶): نتایج تجربی کنترل‌کننده پیشنهادی با و بدون رؤیت‌گر برای ورودی مرجع $1.5 \sin 0.4\pi t$ (الف) جابجایی زاویه‌ای؛ (ب) نیروی کنترلی.

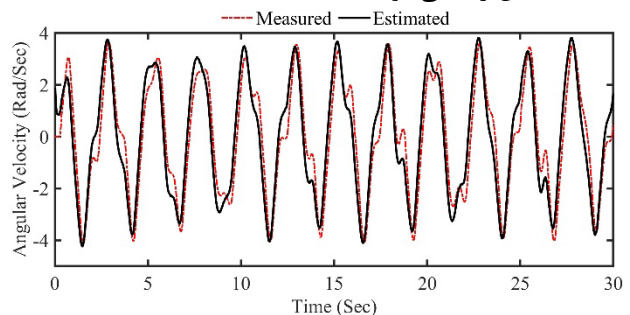
به‌منظور بررسی بهتر عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی در حضور اغتشاشات خارجی و نامعینی‌های مدل، جذر مربع میانگین خطای ردیابی مسیر و ورودی کنترلی در حالت با و بدون رؤیت‌گر در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس جدول ۲، الگوریتم پیشنهادی با تخمین مناسب عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات خارجی باعث کاهش چشمگیر خطای ردیابی شده است. برای مقایسه عملکرد روش کنترل پیشنهادی با سایر روش‌های کنترلی، نتایج به‌دست‌آمده با یک کنترل‌کننده مد لغزشی مقایسه می‌شوند. در این حالت یک مسیر متغیر با زمان به‌عنوان مسیر مرجع در نظر گرفته می‌شود. هر دو کنترل‌کننده از مدل دینامیکی با مرتبه کاهش‌یافته استفاده می‌کنند.

جدول (۲): مقایسه جذر مربع میانگین خروجی‌ها در حالت با و بدون رؤیت‌گر.

مسیر مرجع	بدون رؤیت‌گر		با رؤیت‌گر	
	خطای ردیابی (rad)	ورودی کنترلی (N)	خطای ردیابی (rad)	ورودی کنترلی (N)
پله متغیر	۰/۹۲	۰/۱۸	۰/۲۵۴	۰/۲۵۸
$1.5 \sin 0.4\pi t$	۰/۸	۰/۲۲	۰/۴۷	۰/۶۴
$1.5 \sin 0.8\pi t$	۰/۷۹	۰/۳۲	۰/۵۵	۰/۷۶
$2 \sin 0.4\pi t$	۰/۹۹	۰/۲۷	۰/۸	۰/۷۵

با توجه به شکل ۱۰، روش کنترل پیشنهادی از دقت بیشتری در ردیابی مسیر مرجع برخوردار است. مشاهده می‌شود که کنترل مد لغزشی برای جبران عدم قطعیت‌ها، نوسانات بالایی را در ورودی کنترلی دارد. جذر مربعات میانگین خطاهای ردیابی و ورودی کنترلی نیز در جدول ۳ گزارش شده است. بر همین اساس، تفاوت بین روش پیشنهادی و کنترل مد لغزشی را می‌توان در افزایش دقت ردیابی در روش پیشنهادی با صرف انرژی کنترلی کم‌تر برجسته نمود. شایان‌ذکر است که روش پیشنهادی به‌عنوان یک روش کنترل تطبیقی از مدل به‌روز شده برای محاسبه ورودی کنترلی استفاده می‌کند. حال آن‌که کنترل مد لغزشی به‌عنوان یک روش کنترل مقاوم سعی می‌کند مسیر مرجع را در حضور دینامیک‌های مدل نشده و اغتشاشات خارجی ردیابی کند.

حال آن‌که در صورت عدم تخمین این عدم قطعیت‌ها، نتایج کنترلی خطای بسیار بالایی را نشان می‌دهند این نکته لازم به ذکر می‌باشد که حداکثر ورودی کنترلی به دلیل ظرفیت محدود موتور الکتریکی به‌عنوان محرک سیستم، $\tau^{max} = 1N.m$ می‌باشد. بنابراین بخش عمده‌ای از منابع خطای ردیابی در حالت استفاده از رؤیت‌گر به محدودیت ورودی کنترلی مربوط می‌شود که در شکل‌های ۶ (ب)، ۷ (ب) و ۸ (ب) به‌وضوح دیده می‌شود. این در حالی است که در مانور شکل ۵ ورودی کنترلی به اشباع نرسیده و خطای ردیابی در حضور رؤیت‌گر به‌مراتب کم‌تر می‌باشد. نکته‌ی دیگری که باید به آن توجه شود تخمین سرعت زاویه‌ای بازوست که برای محاسبه ورودی کنترلی توسط کنترل‌کننده لازم است. این متغیر توسط رؤیت‌گر حالت توسعه‌یافته در کنار عدم قطعیت‌های مدل تخمین زده می‌شود و نیازی به حسگر اضافی برای اندازه‌گیری آن وجود ندارد. به‌عنوان نمونه سرعت زاویه‌ای بازو در مانور آخر در شکل ۹ ملاحظه می‌شود. برای اعتبار سنجی تخمین سرعت زاویه‌ای از حسگر ژيروسکوپ MPU6050 استفاده می‌شود. ملاحظه می‌گردد که تخمین حالت توسعه‌یافته با دقت مناسبی سرعت زاویه‌ای بازو را تخمین می‌زند. لازم به ذکر است حسگر ژيروسکوپ صرفاً برای اعتبارسنجی تخمین سرعت زاویه‌ای استفاده می‌شود و در سیستم کنترلی نقشی ندارد، درواقع سیستم کنترلی متشکل از رؤیت‌گر و کنترل‌کننده تنها از داده‌های حسگر زاویه‌سنج استفاده می‌کند و سایر حالت‌ها که دربرگیرنده سرعت زاویه‌ای و عدم قطعیت‌های مدل‌سازی است، تخمین زده می‌شود.



شکل (۹): مقایسه سرعت زاویه‌ای اندازه‌گیری شده و تخمینی برای ورودی مرجع $1.5 \sin 0.8\pi t$.

شد. نتایج حاکی از کارایی روش کنترل پیشنهادی در کاهش خطای ردیابی در حضور منابع مختلفی از عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات است. از سوی دیگر، کنترل‌کننده صرفاً بر پایه‌ی داده‌های حسگر زاویه‌سنج بوده و نیازی به حسگر اضافی برای اندازه‌گیری سایر متغیرهای حالت وجود ندارد.

۸- مراجع

[1] Fayazi A, Rafsanjani HN. Fractional order fuzzy sliding mode controller for robotic flexible joint manipulators. In 2011 9th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA) 2011: 1244-1249, IEEE.

[2] Park CW. Robust stable fuzzy control via fuzzy modeling and feedback linearization with its applications to controlling uncertain single-link flexible joint manipulators. Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2004;39:131-47.

[3] Spong MW. Modeling and control of elastic joint robots. Mathematical and Computer Modelling. 1989;12(7):912.

[4] Samiei SK, Mirzaei M, Yarinia N, Rafatnia S. Design and practical implementation of an input-constrained nonlinear controller for a single-link flexible joint robotic manipulator. In 2022 10th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM) 2022: 551-556, IEEE.

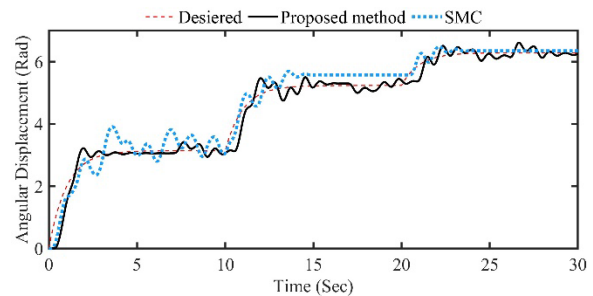
[5] Spong MA, Khorasani K, Kokotovic P. An integral manifold approach to the feedback control of flexible joint robots. IEEE Journal on Robotics and Automation. 1987;3(4):291-300.

[6] Wang L, Shi Q, Liu J, Zhang D. Backstepping control of flexible joint manipulator based on hyperbolic tangent function with control input and rate constraints. Asian Journal of Control. 2020;22(3):1268-79.

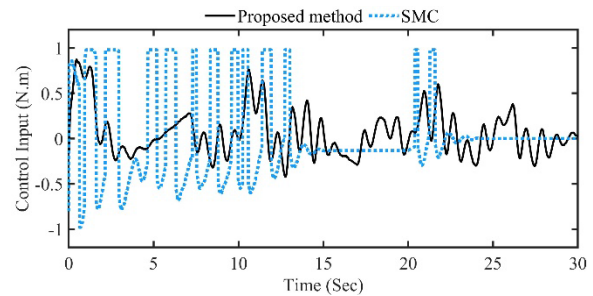
[7] Hong M, Gu X, Liu L, Guo Y. Finite time extended state observer based nonsingular fast terminal sliding mode control of flexible-joint manipulators with unknown disturbance. Journal of the Franklin Institute. 2023;360(1):18-37.

[8] Cheng X, Liu H, Lu W. Chattering-suppressed sliding mode control for flexible-joint robot manipulators. Actuators. 2021; 10(11): 288.

[9] Montoya-Cháirez J, Moreno-Valenzuela J, Santibáñez V, Carelli R, Rossomando FG, Pérez-Alcocer R. Combined adaptive neural network and regressor-based trajectory tracking control of flexible joint robots. IET Control Theory & Applications. 2022;16(1):31-50.



(الف)



(ب)

شکل (۱۰): نتایج تجربی مقایسه کنترل‌کننده پیشنهادی با کنترل‌کننده مد لغزشی برای ورودی مرجع پله متغیر: الف) جابجایی زاویه‌ای؛ ب) نیروی کنترلی.

جدول (۳): مقایسه جذر مربع میانگین خروجی‌ها روش پیشنهادی با روش مد لغزشی.

روش کنترلی	خطای ردیابی (rad)	ورودی کنترلی (N)
روش کنترل پیشنهادی	۰/۲۵۴	۰/۲۵۸
کنترل مد لغزشی	۰/۵۳	۰/۶۳

۷- نتیجه نهایی

در این مقاله، یک کنترل‌کننده خطی‌ساز پسخور تطبیقی برای ردیابی مسیر یک بازوی اهرمی با مفصل انعطاف‌پذیر طراحی شده است. به این ترتیب، قابلیت اطمینان کنترل‌کننده مبتنی بر مدل با تخمین عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات افزایش می‌یابد. یک سیستم حاوی بازوی اهرمی با مفصل انعطاف‌پذیر مبتنی بر ترموپلاستیک پلی اورتان طراحی و ساخته شده است. از حسگر زاویه‌سنج برای انجام اندازه‌گیری زاویه بازو استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی با آزمایش‌های مختلف تحت مانورهای دینامیکی مختلف ارزیابی

Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021;23(6):5871-80.

[22] Khalil HK. Nonlinear control. 2015. New York: Pearson.

[10] Kelekci E, Kizir S. Trajectory and vibration control of a flexible joint manipulator using interval type-2 fuzzy logic. ISA transactions. 2019;94:218-33.

[11] Chen Y, Guo B. Sliding mode fault tolerant tracking control for a single-link flexible joint manipulator system. IEEE Access. 2019;7:83046-57.

[12] Huang X, Yan Y, Zhou Y. Neural network-based adaptive second order sliding mode control of Lorentz-augmented spacecraft formation. Neurocomputing. 2017;222:191-203.

[13] Sun W, Diao S, Su SF, Wu Y. Adaptive fuzzy tracking for flexible-joint robots with random noises via command filter control. Information Sciences. 2021;575:116-32.

[14] Iskandar M, van Ommeren C, Wu X, Albu-Schäffer A, Dietrich A. Model predictive control applied to different time-scale dynamics of flexible joint robots. IEEE Robotics and Automation Letters. 2022;8(2):672-9.

[15] Li J, Zhang L, Luo L, Li S. Extended state observer based current-constrained controller for a PMSM system in presence of disturbances: Design, analysis and experiments. Control Engineering Practice. 2023;132:105412.

[16] Razmjooei H, Palli G, Abdi E, Terzo M, Strano S. Design and experimental validation of an adaptive fast-finite-time observer on uncertain electro-hydraulic systems. Control Engineering Practice. 2023;131:105391.

[17] Bhaskarwar T, Hawari HF, Nor NB, Chile RH, Waghmare D, Aole S. Sliding Mode Controller with Generalized Extended State Observer for Single Link Flexible Manipulator. Applied Sciences. 2022;12(6):3079.

[18] Yang H, Yu Y, Yuan Y, Fan X. Back-stepping control of two-link flexible manipulator based on an extended state observer. Advances in space research. 2015;56(10):2312-22.

[19] Moberg S, Hanssen S. On feedback linearization for robust tracking control of flexible joint robots. IFAC Proceedings Volumes. 2008;41(2):12218-23.

[20] Rafatnia S, Mirzaei M. Estimation of reliable vehicle dynamic model using IMU/GNSS data fusion for stability controller design. Mechanical Systems and Signal Processing. 2022;168:108593.

[21] Rafatnia S, Mirzaei M. Adaptive estimation of vehicle velocity from updated dynamic model for control of anti-lock braking system. IEEE



Design and Experimental Implementation of an Adaptive Feedback Linearization Controller Based on Extended State Observer for a Flexible-joint Arm

Seyed Kianoosh Samiei¹, Mehdi Mirzaei^{2*}, Sadra Rafatnia³

¹ M.Sc., Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

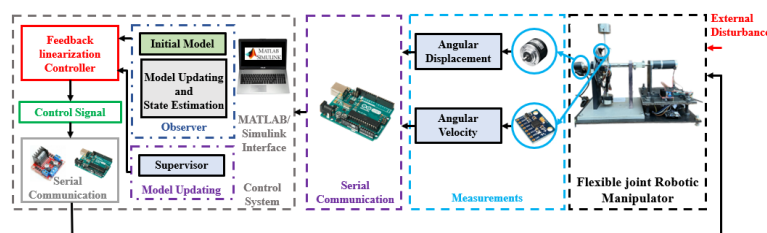
² Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

³ Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

HIGHLIGHTS

- Designing an adaptive control system for an arm with a flexible joint
- Online estimation of model uncertainties
- Using minimal sensors due to application of reduced order model
- Experimental implementation of the control system

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 1 March 2023

Received in revised form: 19 March 2023

Accepted: 17 April 2023

Available online: 7 May 2023

*Correspondence: mirzaei@sut.ac.ir

How to cite this article:

S.K. Samiei, M. Mirzaei, S .Rafatnia. Design and experimental implementation of an adaptive feedback linearization controller based on extended state observer for a flexible-joint arm. Journal of Aerospace Mechanics. 2023; 19(4):71-83.

Keywords:

Flexible joint

Extended state observer

Model updating

Adaptive feedback linearization control

control

Experimental implementation

ABSTRACT

This study deals with the design and experimental implementation of an adaptive feedback linearization controller for a flexible joint lever-arm (FJLA) in the presence of uncertainties and external disturbances. An extended state observer is proposed to upgrade the reduced-order model to an accurate and reliable model with the same order. In the proposed method, the uncertainties and external disturbances are assumed as an extended state and the link position information is used to estimate this state in combination with the angular velocity of the link states. The control system designed based on the proposed observer can adapt itself to real conditions, and use enough information about uncertainties and disturbances. The proposed controller with and without using the observer is examined on a fabricated flexible-joint lever arm. The results indicate that the uncertainties and disturbances are well estimated online for being used in the controller. Therefore, the proposed adaptive controller using just one sensor has a higher accuracy in controlling the position of the FJLA under different trajectories. Also, the proposed control method is fast and suitable for online implementation.