

Research Paper; 

Adaptive Robust Control for a Class of Under-Actuated Nonlinear Systems With Uncertainties

S. Moghtader Arbatsofla¹, A.H. Mazinan², M.J. Mahmoodabadi³

1. Department of Control Engineering, Faculty of of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: Smoghtader@gmail.com

2. Department of Control Engineering, Faculty of of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: ahmazinan@gmail.com

3. Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran. E-mail: mohammadjavadmahmoodabadi@gmail.com

Article Information

Abstract

Accepted:
2024/05/14

Received:
2024/02/09

Keywords:

Feedback linearization; Optimal control; Robust control; adaptive control; multi-objective artificial hummingbird algorithm.

Corresponding Author:
A.H. Mazinan

Email:ahmazinan@gmail.com

In recent years, due to the widespread use of nonlinear under-actuated systems, many efforts have been made to design a controller compatible with these systems. In fact, the defect in stimulation is done in order to reduce the number of system actuators, in order to lighten the mechanism and reduce the cost of production. Such applications require a high degree of precision and innovation in control and sustainability. This paper proposes an optimal adaptive control method for the stabilization of under-actuated fourth-order balls and beam system, which is a classical example of inherently unstable systems. The basic structure for this controller is the feedback linearization (FBL) technique, while a sliding surface is applied using the sliding mod along with an adaptive method to calculate the interest coefficients. In addition, the control coefficients are optimized using the hummingbird algorithm by considering two opposing objective functions. Finally, the effectiveness of the proposed method for controlling the nonlinear ball and beam system is investigated. The results of the simulations show the high efficiency of the proposed method compared to similar works.

Sariyeh Moghtader Arbat Sofla; Amir hooshang Mazinan; Mohammad Javad Mahmoodabadi. (2024). Adaptive Robust Control for A Class Of Under-Actuated Nonlinear Systems With Uncertainties, Journal of Aerospace Defense, Vol. 3, No1. 2024.



فصلنامه علمی دفاع هوافضایی

دوره ۳، شماره ۱
بهار ۱۴۰۳
صص ۶۵-۴۸

مجله علمی



مقاله پژوهشی؛ **تجدید**

کنترل مقاوم تطبیقی برای دسته سامانه‌های غیر خطی تحریک ناقص دارای نامعینی

سریه مقتدر اربط سفلی^۱، امیر هوشنگ مزینان^۲، محمد جواد محمودآبادی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق کنترل، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: Snmoghtader@gmail.com

۲. دانشیار، گروه مهندسی برق کنترل، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: ahmazinan@gmail.com

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران. رایانامه: mahmoodabadi@sirjantech.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۱/۲۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۲/۲۵

کلیدواژه‌ها:

خطی سازی بازخورد؛ کنترل
بهینه؛ کنترل مقاوم؛ کنترل
تطبیقی؛ الگوریتم مرغ مگس
خوار مصنوعی چند هدفه

نویسنده مسئول:

امیر هوشنگ مزینان

ایمیل:

ahmazinan@gmail.com

در سال‌های اخیر به دلیل کاربرد فراوان سامانه‌های غیرخطی تحریک ناقص، تلاش‌های فراوانی برای طراحی کنترل‌کننده سازگار با این سامانه‌ها ارائه شده است. در واقع، نقص در تحریک به علت کاهش تعداد عملگرهای سامانه، به منظور سبک‌سازی مکانیزم و کاهش هزینه تولید صورت می‌گیرد. چنین کاربردهایی، درجه‌ی بالایی از دقت و نوآوری را در کنترل و پایداری طلب می‌کند. این مقاله یک روش کنترل تطبیقی مقاوم مرتبه کسری فازی بهینه برای پایداری سامانه تحریک ناقص مرتبه چهارم گوی و میله به عنوان یک نمونه کلاسیک از سامانه‌های ذاتا ناپایدار پیشنهاد می‌دهد. ساختار پایه برای این کنترل‌کننده، تکنیک خطی‌سازی پس‌خورده (FBL) است، در حالیکه یک سطح لغزش با استفاده از روش مدل‌غزشی جدا شده به همراه یک روش تطبیقی به منظور محاسبه ضرایب بهره اعمال می‌شود. علاوه بر این، ضرایب کنترل با استفاده از الگوریتم مرغ مگس خوار با ترکیب دو تابع هدف متضاد بهینه می‌شوند. در نهایت، اثربخشی روش پیشنهادی برای کنترل سامانه توپ و میله غیرخطی پیاده‌سازی و بررسی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده‌ی کارایی بالایی روش ارائه شده در مقایسه با سایر روش‌های ارائه شده در تحقیقات است.

استناد: سریه مقتدر اربط سفلی، امیر هوشنگ مزینان، محمد جواد محمودآبادی. کنترل مقاوم تطبیقی برای دسته سامانه‌های غیرخطی

تحریک ناقص دارای نامعینی. مجله علمی پژوهشی دفاع هوافضایی. دوره ۳، شماره ۱ بهار ۱۴۰۳.

۱- مقدمه

کنترل‌کننده‌های خودکار امروزه کاربرد وسیعی در صنعت دارند. هدف از طراحی کنترل‌کننده این است که با روشی معقول پاسخ دستگاه را به سمت مقدار مطلوب سوق دهد. برای مثال، طراحی سامانه هدایت و کنترل پرواز موشک‌های مختلف بر اساس نوع و نحوه عملیات آنها از تنوع ویژه‌ای برخوردارند. تقریباً در تمامی موشک‌ها سامانه هدایت و کنترل به دو بخش مجزا تقسیم می‌شود. بخش اول که حلقه داخلی را تشکیل می‌دهد، سامانه کنترل پرواز نامیده می‌شود و وظیفه پایدارسازی حرکت موشک و کنترل آن را بر عهده دارد. بخش دوم، سامانه هدایت موشک است که حلقه خارجی را تشکیل می‌دهد. این بخش در هر لحظه با توجه به موقعیت و مقصد موشک، فرمانهای هدایتی لازم را به سامانه کنترل پرواز اعمال می‌کند. سامانه کنترل پرواز، حرکت موشک را در سه کانال زاویه چرخ، زاویه سمت و زاویه اوج کنترل می‌کند و هدف کنترل پرواز، پایداری هم‌زمان تمام متغیرهای حالت است. هنگامی که بخش هدایت، فرمان برای مانور صادر می‌کند، وظیفه خود خلبان^۱ است که با کمترین ثابت زمانی، کمترین فراجش^۲ و کمترین زمان نشست^۳، این فرمان را با حرکت دادن بالک‌ها به میزان لازم به انجام برساند.

انگیزه کنترل سامانه‌های تحریک ناقص، کاربردهای آنها مانند هواپیماها، روبات‌های صنعتی و وسایل نقلیه پرنده است. علاوه بر این وجود ترم‌های غیرخطی، فرآیند پایداری را پیچیده و یا غیر ممکن می‌سازد. به این ترتیب یکی از سامانه‌های کلاسیک در دینامیک و مبانی کنترلی سامانه توپ و تیر است. این سامانه به لطف ویژگی‌هایی همچون غیرخطی بودن، مرتبه بالا، ناپایداری ذاتی و غیره، سامانه‌ای مطلوب به منظور ارزیابی انواع روش‌های کنترلی محسوب می‌گردد. به عبارت دیگر، پویایی پیچیده این سامانه می‌تواند قابلیت‌های تکنیک‌های کنترل بازخورد را به چالش بکشد [۱]-[۲]. خطی‌سازی پس‌خورد^۴ یکی از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در کنترل غیرخطی می‌باشد [۳]-[۴]. ایده اصلی خطی‌سازی پس‌خورد مبتنی است بر تبدیل دینامیک غیرخطی با استفاده از پس‌خورد حالت، که خطی‌سازی ورودی - حالت به خطی‌سازی کامل و خطی‌سازی ورودی - خروجی به خطی‌سازی جزئی مربوط می‌شود [۵]-[۶]. اما مهمترین محدودیت این روش‌ها در حالت‌هایی است که عدم قطعیت پارامتری^۵ و یا دینامیک‌های مدل نشده در سامانه حضور داشته باشند. هانگ و چن با استفاده از یک کنترل‌کننده مدلفزشی تطبیقی^۶ برای یک بازوی انعطاف‌پذیر، در برابر نامعینی‌ها، سامانه را مقاوم نمودند [۷]. از سوی-

¹ Auto pilot

² Overshoot

³ Undershoot

⁴ Feedback linearization

⁵ Parametric uncertainty

⁶ Adaptive Sliding Mode control

دیگر، روش‌های تطبیقی، به ویژه رویکردهای مبتنی بر گرادیان نزولی، روش‌های کارآمدی برای اصلاح بهره‌های کنترلی در هنگام تغییر پارامترهای سیستم با داشتن مقادیر عدم قطعیت اولیه هستند. به این ترتیب، ژانو و همکارانش در سال ۲۰۲۱ یک روش کنترل تطبیقی برای مکانیسم حرکتی عضلات مصنوعی پنوماتیک بر اساس یک مشاهده‌گر توسعه یافته پیشنهاد دادند [۸]. در مطالعه دیگری، کوکسال و همکارانش در سال ۲۰۲۰ یک روش کنترل تطبیقی گام به عقب^۱ و یک طراحی کنترل تطبیقی مستقیم جایگزین با عملکرد در ردیابی گذرا و حالت پایدار تضمین شده برای ردیابی مسیر یک هواپیمای بدون سرنشین کوادروتور ارائه کردند [۹]. نجف‌پور و همکارانش در سال ۲۰۲۲ برای کنترل مسیر موشک اتوپیلوت از روش رگولاتور دو مجذوری طراحی و با استفاده از جستجوگر برای تخمین و سرعت نزدیکی موشک به هدف بهره بردند. [۱۰]. طریقی و همکارانش در سال ۲۰۲۴ با استفاده از تکنیک فیلتر کالمن برای ردیابی یک رادار با هدف پشتیبانی حال و آینده برای مانورهای سیستم‌های پروازی کنترل‌کننده را طراحی کردند [۱۱]. باتوجه به اینکه هیچ تضمینی درباره مقاوم بودن سامانه در برابر نامعینی موجود ندارد، جهت رفع این محدودیت پیاده‌سازی دو کنترل‌کننده مدلغزشی^۲ و خطی‌سازپس‌خورد به‌طور همزمان جهت استفاده از مزایای دو کنترل‌کننده اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. محمودآبادی و همکارانشان در سال ۲۰۱۸ از این روش جهت سامانه‌های دینامیکی غیرخطی بهره بردند و با طرح بهینه‌ای از ترکیب کنترل‌کننده مدلغزشی مجزا^۳ و خطی‌سازی پس‌خورد تقریبی بروی سامانه‌های کنترل غیرخطی آونگ و ارون جهت بهینه نمودن پارامترهای کنترلی انجام دادند [۱۲]. کنترل مدلغزشی یک روش غیرخطی، ساختار متغیر است، که با تغییر دینامیک یک سامانه غیرخطی با استفاده از یک سیگنال کنترل ناپیوسته، سامانه را وادار به لغزش در امتداد یک سطح مقطع از رفتار طبیعی یک سامانه می‌کند. به عبارت دیگر روش کنترل لغزشی یکی از حالت‌های کنترل ساختار متغیر است که در این روش حالت‌های سامانه توسط قوانین کنترلی روی مسیر از پیش تعیین شده‌ای (خط یا سطح سوئیچ) قرار می‌گیرد و با دینامیک مشخصی که توسط طراح مشخص می‌شود و می‌تواند غیر دینامیک سامانه باشد به سمت نقطه مورد نظر حرکت می‌کند. در سال ۲۰۱۳ محمودآبادی و همکارانشان طراحی بهینه را با بکارگیری مدلغزشی مجزا بروی یک پاندول معکوس انجام دادند [۱۳]. گاهی اوقات هدف، بهینه کردن بیش از یک تابع به طور همزمان می‌باشد [۱۴]. با توجه به محدودیت‌های موجود در سیستم‌های فضایی در زمینه تامین انرژی، این توان باید بهینه و در حداقل ممکن باشد. به همین منظور ملک زاده فرد و همکارانش در سال ۲۰۲۴ سیستم بهینه‌ای برای کنترل دمای ماهواره ارائه نمودند [۱۵]. در سال ۲۰۱۵ طاهرخرسندی

¹ PID controller

² Backstepping

³ Decoupled Sliding Mode

و همکاری‌شان با ترکیب کنترل‌کننده مد لغزشی و کنترل‌کننده تناسبی - انتگرالی - مشتقی توانستند یک سامانه توپ و تیر را کنترل و بهینه نمایند [۱۶]. منظور از بهینه‌سازی^۱، یافتن متغیر-های تصمیم‌گیری (متغیرهای طراحی) یک تابع به گونه ایست که تابع مورد نظر بهترین جواب و عملکرد را از خود بروز دهد [۱۷]. در این نوع بهینه‌سازی که بهینه‌سازی چندهدفی^۲ نام دارد، متغیرهای تصمیم‌گیری باید به نحوی تعیین شوند که تمامی توابع مورد نظر باهم بهینه گردند. به دلیل تضاد موجود در توابع، دست یافتن به جوابی که همه توابع را به سمت مطلوب و بهینه هدایت نماید، عملاً امکان پذیر نمی‌باشد. آنچه در این نوع بهینه‌سازی حاصل می‌گردد، نه یک جواب منحصر به فرد بهینه، بلکه یک دسته پاسخ‌های نقاط غیربرتر^۳ می‌باشد [۱۸]. پس از طراحی کنترل‌کننده‌ای که بتواند به خوبی سامانه مورد نظر را کنترل و پایدار نماید، باید با استفاده از مفاهیم بهینه‌سازی، ضرایب کنترلی را به نحوی یافت که کنترل سامانه مورد نظر به صورت مقتضی و مورد انتظار با بهترین عملکرد ممکن صورت پذیرد [۱۹]. استفاده از الگوریتم‌های تکاملی یک تکنیک کارآمد برای دستیابی به عملکرد بهینه برای یک تلاش کنترلی بر اساس معیارهای طراحی از پیش تعریف شده می‌باشد. بر این اساس، الگوریتم مرغ مگس خوار^۴ به عنوان یکی از راهکارهای بهینه‌سازی هوشمند اخیر معرفی شد. در این مقاله، از الگوریتم یادشده جهت بهینه‌سازی ضرایب کنترلی استفاده می‌شود [۲۰].

ترکیب جدید سامانه‌های فازی به همراه مشتقات مرتبه کسری^۵ و سطوح حالت لغزشی مجزا^۶، با متد خطی‌سازی پس‌خورد دستاورد و نوآوری اصلی این مقاله است. در استراتژی معرفی شده، از ایده خطی‌سازی پس‌خورد برای انتقال مدل دینامیکی به یک فضای حالت^۷ جدید استفاده شده است. سپس، قوانین تطبیق بر مبنای روش گرادیان نزولی^۸ و سطوح حالت لغزشی مجزا جهت محاسبه تطبیقی پارامترهای کنترل طراحی می‌گردد. در مرحله بعد، برای دستیابی به عملکرد بهینه برای تلاش کنترلی طراحی شده، خطاهای سامانه به عنوان توابع هدف^۹ در نظر گرفته شده و حداکثر مصرف انرژی به عنوان محدودیت در فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. آنگاه جبهه‌های پارتو مربوط به رویکردهای کنترلی مختلف برای نشان دادن برتری سناریوی کنترل تطبیقی مقاوم^{۱۰} به تصویر کشیده شده‌اند. در نهایت، یک سامانه توپ و میله غیرخطی دوبعدی، برای به چالش کشیدن عملکرد کنترل‌کننده پیاده‌سازی شده است.

¹ optimization

² Multi-Objective Optimization

³ paretofront

⁴ Hummingbird algorithm

⁵ Derivative Fractional order

⁶ sliding surface

⁷ State space

⁸ Descending gradient

⁹ Objective function

¹⁰ Robust adaptive control

ساختار مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. بخش ۲ استراتژی پیشنهادی را که شامل خطی-سازی پسخورده، محاسبات مرتبه کسری، سامانه فازی، قوانین تطبیقی و بهینه‌سازی را تعریف می‌کند. بخش ۳ اجرای کنترل‌کننده معرفی شده را برای یک سامانه توپ و میله ارائه می‌کند. علاوه بر این، به منظور اثبات کارایی و عملکرد مناسب سیستم کنترلی نتایج شبیه‌سازی‌ها و مقایسه آن‌ها در نرم افزار متلب در این بخش به نمایش گذاشته شده و مورد بحث قرار گرفته است. در نهایت، بخش ۴ نتیجه‌گیری را ارائه می‌کند.

۲- استراتژی پیشنهادی

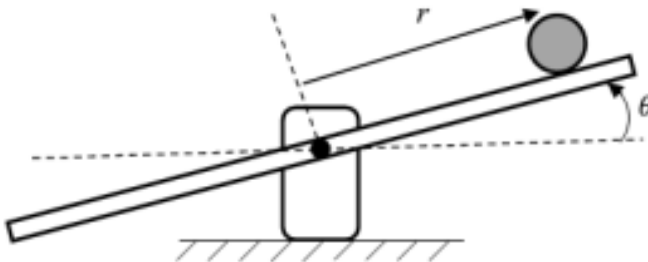
برای سامانه غیرخطی مرتبه چهارم تحریک ناقص^۱ توپ و میله نشان داده شده در شکل ۱، با در نظر گرفتن متغیرهای $[x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)] = [\theta(t), \dot{\theta}(t), r(t), \dot{r}(t)]$ معادلات فضای حالت را به صورت زیر است:

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) \quad (۱)$$

$$\dot{x}_2(t) = u(t) + d(t) \quad (۲)$$

$$\dot{x}_3(t) = x_4(t) \quad (۳)$$

$$\dot{x}_4(t) = x_3(t)x_2^2(t) - g \sin x_1(t) \quad (۴)$$



شکل ۱: ساختار توپ و میله مد نظر در این مقاله

که در آن J_b , $B = \frac{MR^2}{J_b + MR^2}$ و M به ترتیب ممان اینرسی توپ، جرم توپ و شعاع توپ را نمایش می‌دهند. معادلات فوق با فرضیات ساده‌ای مانند مرکز چرخش بدون اصطکاک و غلتش بدون لغزش توپ بر روی تیر لحاظ شده‌اند. مشخصات فیزیکی سامانه و همچنین مقادیر اولیه حالت‌ها در نظر گرفته شده در مرجع [۲۱] برای شبیه‌سازی طبق جدول (۱) ارائه شده است.

^۱ Under-actuated

علاوه بر مفروضات فوق، برای بدست آوردن سطح لغزشی S_1 و S_2 از ایده‌ای استفاده شده است که در آن برای طراحی یک قانون کنترلی، چندین زیرسامانه به طور همزمان با استفاده از تنها یک ورودی، کنترل می‌شوند. همچنین برای جلوگیری از ایجاد چترینگ^۱ از تابع اشباع^۲ (sat) استفاده شده است.

$$u_{DSMC}(t) = U_{eq}(t) \quad (۵)$$

$$= C_1(\dot{z} - x_2(t)) - Sat(S_1 G)P_S$$

جدول ۱: توصیف‌های فیزیکی سامانه توپ و میله مد نظر در این مقاله

ردیف	پارامتر	توصیف	واحد اندازه گیری	مقادیر
۱	$B = \frac{MR^2}{J_b + MR^2}$	ثابت اینرسی	Nm/A	۰.۷۱۴۳
۲	J_b	ممان اینرسی توپ	$kg \cdot m^2$	۲×۱۰^{-۲}
۳	M	جرم توپ	kg	۰.۰۵
۴	R	شعاع توپ	m	۰.۰۱
۵	g	ثابت گرانشی	$\frac{m}{s^2}$	۹.۸
۶	$d(t)$	اغتشاش خارجی	$\frac{m}{s^2}$	$ \leq ۰.۰۸$
۷	$\theta(0)$	شرایط اولیه زاویه میله	deg	۶۰.۰
۸	$\dot{\theta}(0)$	شرایط اولیه سرعت زاویه ای میله	deg	۰
۹	$r(0)$	شرایط اولیه موقعیت توپ	m	۱.۰
۱۰	$\dot{r}(0)$	شرایط اولیه سرعت توپ	$\frac{m}{s^2}$	۰

۲.۱- خطی سازی پسخورد

برای پیاده‌سازی خطی‌سازی پسخورد [۱۲]، حالت اولیه $x_3(t) = \emptyset(\mathbf{x}) = \zeta_1$ در نظر گرفته شده است. آنگاه سایر معادلات فضای حالت بشکل زیر با استفاده از مرجع [۲۲] استخراج شده است.

$$\dot{\zeta}_1 = \zeta_2 = L_f \emptyset(\mathbf{x}) = x_4(t) \quad (۶)$$

$$\dot{\zeta}_2 = \zeta_3 = L_f^2 \emptyset(\mathbf{x}) \quad (۷)$$

$$= B(x_3(t)x_2^2(t) - g \sin x_1(t))$$

^۱ Chattering

^۲ Saturation Function

از آنجا که $B(x_3(t)x_2^2(t))$ یک عبارت غیرخطی مرتبه بالا بوده و از طرفی هنوز عبارت نیروی کنترلی هم ظاهر نشده است، لذا با نادیده گرفتن این عبارت خواهیم داشت:

$$\dot{\zeta}_3 = \zeta_4 = L_f^3 \phi(\mathbf{x}) = -B g x_2(t) \cos x_1(t) \quad (۸)$$

$$\zeta_4 = L_f^4 \phi(\mathbf{x}) + L_g L_f^3 \phi(\mathbf{x}) u(t) = -B g x_2^2(t) \sin x_1(t) + (-B g(t) \cos x_1(t)) u(t) \quad (۹)$$

$$u(t) = \frac{v - L_f^4 \phi(\mathbf{x})}{L_g L_f^3 \phi(\mathbf{x})} \quad (۱۰)$$

آنگاه تلاش کنترلی به شکل ذیل بدست آمده است :

$$u_{\text{FBL}}(t) = \frac{v - B g x_2^2(t) \sin x_1(t)}{-B g(t) \cos x_1(t)} \quad (۱۱)$$

که در آن v ، به عنوان ورودی کنترل خطی، می‌تواند به صورت زیر تعریف شود.

$$v = -k_1 \zeta_1 - k_2 \zeta_2 - k_3 \zeta_3 - k_4 \zeta_4 \quad (۱۲)$$

همچنین k_1, k_2, k_3 و k_4 ضرایب ثابت هستند و به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که قطب‌های سامانه‌های حلقه بسته در سمت چپ محورهای فرضی قرار گیرند.

۲.۲- محاسبه پارامترهای تطبیقی

روش‌های تطبیقی، به ویژه رویکردهای مبتنی بر گرادیان نزولی، روش‌های کارآمدی برای اصلاح بهره‌های کنترلی در هنگام تغییر پارامترهای سامانه یا داشتن مقادیر عدم قطعیت اولیه هستند. لذا با استفاده از روش تقریبی گرادیان نزولی، ضرایب ثابت k_1, k_2, k_3 و k_4 به عنوان ورودی کنترل که در معادله (۱۲) نمایش داده شده است، به استناد مرجع [۲۳] به شرح ذیل تنظیم شده است:

$$\dot{k}_i = -\gamma_i \frac{\partial s_1 \dot{s}_1}{\partial k_i} \equiv -\gamma_i s_1 \dot{\zeta}_i \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (۱۳)$$

که در آن γ_i یک پارامتر ثابت مثبت است و به عنوان نرخ یادگیری شناخته می‌شود. علاوه بر این، سطح لغزش s_1 از معادلات حالت مدل‌گزشی استخراج و محاسبه می‌شود. ایده اصلی مدل‌گزشی، دینامیکی خواهد بود که از آن سورفیس سطوح حالت لغزشی جدا شده و به عنوان قانون کنترل طراحی استفاده شده است. بطوریکه در آن چندین زیرسامانه به طور همزمان با استفاده از تنها یک ورودی کنترل می‌شوند. برای سامانه مرتبه چهارم ذکر شده در معادلات (۴-۱) با استفاده از متغیرهای حالت x_1 و x_2 برای تشکیل زیرسامانه اول (درجه آزادی اول) انتخاب می‌شوند. علاوه

بر این، از متغیرهای حالت x_3 و x_4 برای تشکیل زیرسامانه دوم (درجه آزادی دوم) استفاده می‌شود. بر این اساس سطوح لغزشی به صورت زیر تعریف شده است:

$$\begin{cases} s_1 = c_1(x_1(t) - z) + x_2(t) \\ s_2 = c_2x_3(t) + x_4(t) \end{cases} \quad (14)$$

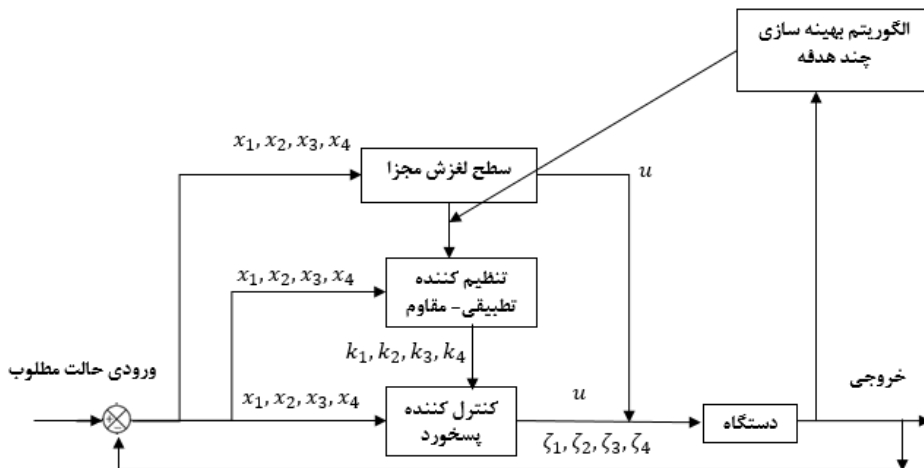
شایان ذکر است C_1 و C_2 پارامترهای کاملاً مثبت طراحی هستند. علاوه بر این، z یک متغیر واسطه تک سیگنالی، در حالت نوسانی است که مقدار آن به S_2 وابسته است و می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$z = \text{sat}\left(\frac{S_2}{\Phi_z}\right) z_{upper} \quad (15)$$

که در آن z_{upper} پارامتر S_2 را به محدوده مناسب $x_1(t)$ هدایت کرده است:

$$|z| \leq z_{upper}; 0 < z_{upper} < 1 \quad (16)$$

علاوه بر این Φ_z یک لایه مرزی برای S_2 است. همچنین از تابع sat که در معادله (۵) قید شده استفاده شده است. در پایان، نیروی کنترلی پیشنهادی به صورت مجموع وزنی خطی با معادلات (۵) و (۱۱) محاسبه و اعمال می‌شود که در ذیل ساختار کنترل کننده طراحی شده نمایش داده شده است.



شکل ۲: ساختار گرافیکی کنترل کننده پیشنهادی مورد نظر در این مقاله

۲.۳- محاسبات بهینه سازی چند هدفه

در طی چندین دهه گذشته، برای رفع مسائل بهینه‌سازی مختلف، رویکردهای بهینه‌سازی متعددی طراحی شده است. با این وجود، توسعه جامعه انسانی و فرآیندهای صنعت مدرن در

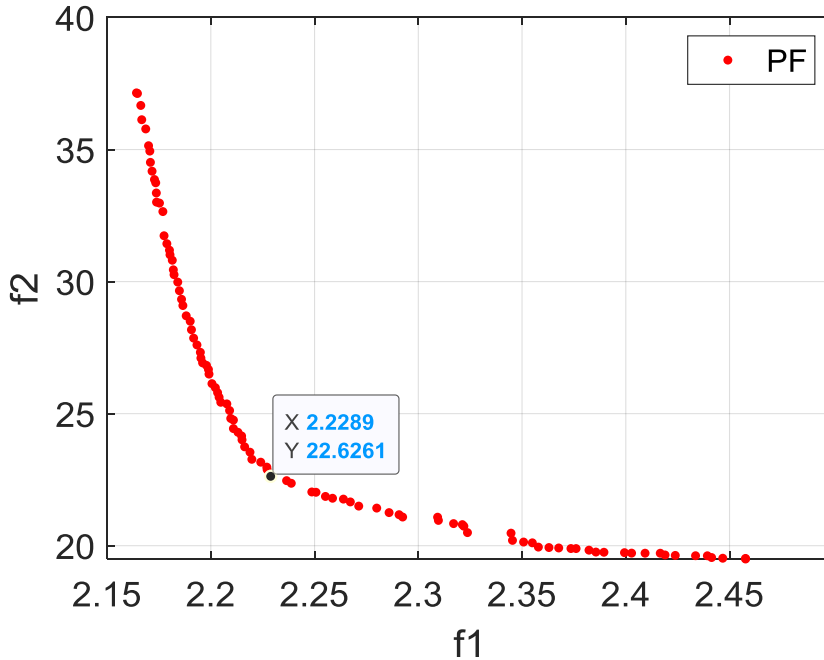
سال‌های اخیر، به طور قابل ملاحظه‌ای منجر به پیچیدگی مسائل بهینه‌سازی در دنیای واقعی شده است و چالش‌های قابل توجهی را برای تکنیک‌های بهینه‌سازی ایجاد می‌کند. به طور کلی، تکنیک‌های بهینه‌سازی موجود به الگوریتم‌های قطعی و فرا ابتکاری طبقه‌بندی می‌شوند. بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کننده‌ای که بتواند به خوبی سامانه مورد نظر را کنترل و پایدار نماید از جمله دلایلی بود که بسیاری از محققان، استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری را در دستور کار خود قرار دادند. در این مقاله برای حل مسائل بهینه‌سازی، از یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید الهام گرفته شده از طبیعت، تحت عنوان الگوریتم مرغ‌مگس‌خوار مصنوعی استفاده شده است. همچنین، الگوریتم مرغ‌مگس‌خوار از قابلیت شبیه‌سازی مهارت‌های ویژه پرواز و راهبردهای جستجوی هوشمندانه مرغ‌مگس‌خوار در طبیعت برخوردار است. برای این منظور، در زمینه راهبردهای جستجوی غذا، سه نوع از مهارت‌های پرواز نظیر پروازهای محوری، مورب و تمام جهته مدل‌سازی شده است. علاوه بر این، جدول بازدید برای مدل‌سازی عملکرد حافظه مرغ‌مگس‌خوار برای منابع غذایی ایجاد می‌شود. همچنین، با استفاده از دو مجموعه از توابع تست عددی، مرغ‌مگس‌خوار اعتبار سنجی شده است و نتایج حاصل از کنترل با این روش با نتایج حاصل از کنترل‌کننده‌های قبلی مورد مقایسه قرار گرفته است. برای این منظور، الگوریتم مرغ‌مگس‌خوار چندهدفه برای انتخاب پارامترهای کنترل‌کننده مقاوم تطبیقی مرتبه‌کسری فازی اعمال شده است. جبهه‌های پرتو الگوریتم بهینه‌سازی برای اندازه جمعیت ۵۰ و حداکثر تولید ۱۰۰ در نظر گرفته شده است، سامانه دارای توابع هدف با دودرجه آزادی است و در واقع قدر مطلق انتگرال نیروی کنترلی و قدر مطلق انتگرال خطاها به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده است. با رعایت شروط ذیل، توابع هدف انتگرال خطاهای زاویه میله (θ) و موقعیت توپ (X) تعریف شده است، که باید با یک محدودیت در زمان انتگرال‌گیری، کاهش تلاش کنترلی ($ITAC$) را به مقدار حداقل برسد.

جدول ۲: مقادیر توابع هدف در نقطه بهینه شکل ۲.

ردیف	هدف	مقدارنهایی روش کنترلی پیشنهادی (FFRA FBL)
۱	انتگرال خطای زاویه $ITAE(\theta)$	۲.۲۲۸۹
۲	انتگرال خطای موقعیت $ITAE(x)$	۲۲.۶۲۶۴

با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه، مقادیر آنها بر روی روش پیشنهادی در جبهه پارتو مطابق شکل ۳ نشان داده شده است. علاوه بر این، مقادیر توابع هدف تعیین شده در جبهه پارتو، در

جدول ۲ مشخص شده است. همچنین جدول ۳ نشان دهنده متغیرهای طراحی نقاطی است که در جبهه پارتو مشخص شده است. پاسخ‌های زمانی نقاط بهینه طراحی شده در شکل‌های ۴ تا ۶ بیانگر توانایی بالای کنترل‌کننده پیشنهادی در پایداری سامانه محک (توپ و میله) با زمان نشست کم و حداقل فرافروش است.



شکل ۳: جبهه پارتو بدست آمده توابع هدف متضاد با استفاده از الگوریتم مرغ مگس خوار

جدول ۳: متغیرهای طراحی برای نقاط بهینه شکل ۳.

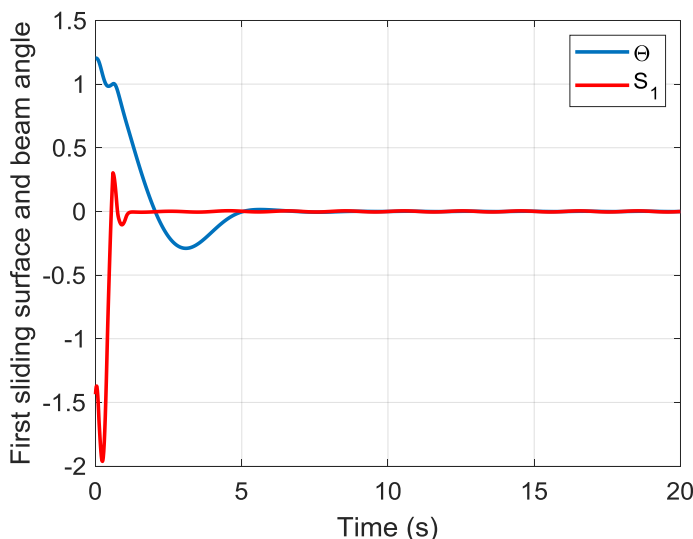
ردیف	توصیف	مقدارنهایی روش کنترلی پیشنهادی (FFRA FBL)
۱	$c1$	۲.۹۰۰۰
۲	$c2$	۰.۶۹۰۰
۳	ϕ_z	۳.۸۵۷۵
۴	Z_{upper}	۰.۹۵۰۰
۵	γ_1	۸.۹۸۷۲
۶	γ_2	۱۰.۱۰۰۰
۷	γ_3	۰.۰۳۴۷
۸	γ_4	۰.۰۲۶۲-
۹	P_S	۰.۹۹۳۱

۲۰.۸۷۴۰	G	۱۰
۰.۹۰۰۰	CS	۱۱
۰.۴۴۰۰	CF	۱۲

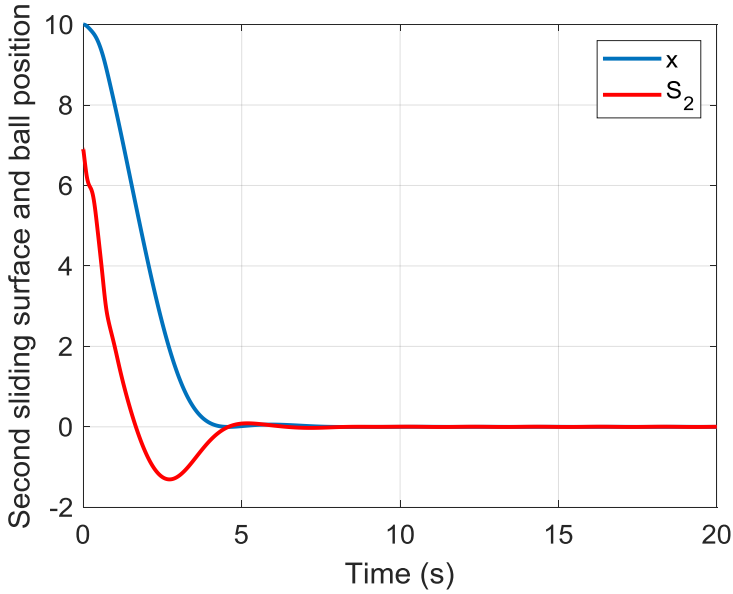
۳- شبیه سازی

در این قسمت، توانایی ایده پیشنهادی در کنترل سامانه مکانیکی غیرخطی و تحریک ناقص توپ و میله مورد بررسی قرار گرفته است. به این ترتیب، الگوریتم مرغ مگس خوار برای طراحی بهینه خطی سازی پسخورده تطبیقی مقاوم اعمال شده است. توابع هدف و جبهه های پارتو که شامل خطای زاویه میله و خطای فاصله توپ در نظر گرفته شده، که در شکل (۳) نشان داده شده است به ترتیب برابر است با ۲۰.۲۲۸۹ و ۲۲.۶۲۶۴ همچنین پاسخ های زمانی حاصل از پیاده سازی روش کنترلی پیشنهادی بر اساس مقادیر توابع هدف مربوط به نقاط طراحی بهینه و متغیرهای طراحی آنها به ترتیب در جداول (۲) و (۳) نشان داده شده است. نمودارهای ۴ تا ۶ به وضوح نشان می-دهد که راهبردهای پیشنهادی، روش های معتبری برای بهبود عملکرد کنترل کننده کلاسیک هستند.

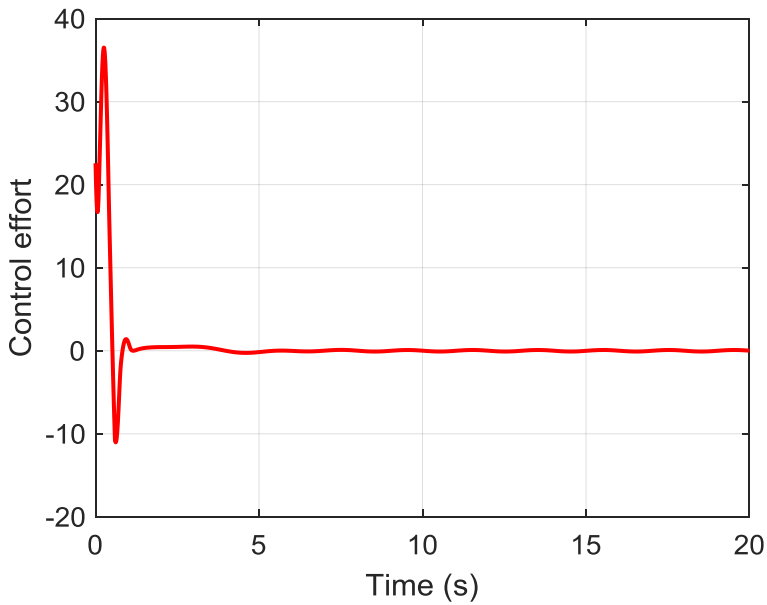
علاوه بر این، در نمودارهای نشان داده شده در شکل های ۷ و ۸، زاویه میله و موقعیت توپ را برای روش کنترلی معرفی شده در این تحقیق و روش ارائه شده در مرجع [۲۴] با یکدیگر مقایسه شده اند.



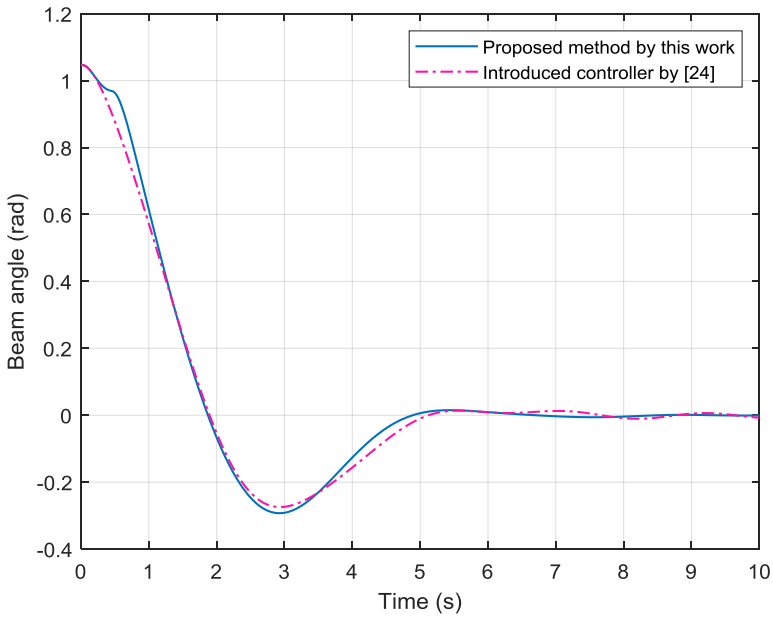
شکل ۴: زاویه میله و سطح لغزش اول برای نقطه برتر بدست آمده از جبهه پارتو توابع هدف بهینه شده با الگوریتم مرغ مگس خوار



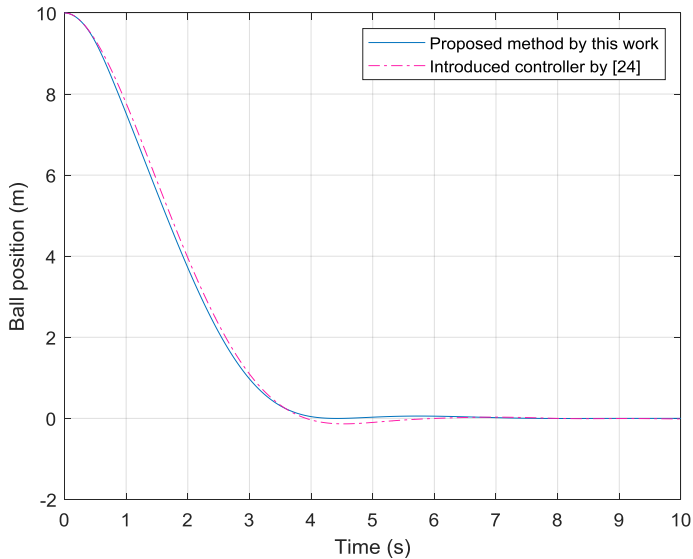
شکل ۵: موقعیت توپ و سطح لغزش دوم برای نقطه برتر بدست آمده از جبهه پارتو توابع هدف بهینه شده با الگوریتم مرغ مگس خوار



شکل ۶: گشتاور کنترلی برای نقطه برتر بدست آمده از جبهه پارتو توابع هدف بهینه شده با الگوریتم مرغ مگس خوار



شکل ۷: زاویه میله برای روش‌های پیشنهادی در این تحقیق و در مرجع [۲۴]



شکل ۸: موقعیت توپ برای روش‌های پیشنهادی در این تحقیق و در مرجع [۲۴]

۴- بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی در این مقاله این بود که کنترل‌کننده جدید طراحی شده، پایداری را در قبال نامعینی مدل حفظ نماید. که برای رسیدن به این هدف، با تلفیق روش‌های کنترلی به منظور استفاده همزمان از مزایای روش‌های مختلف اقدام و حذف عوامل غیرخطی با بکارگیری خطی‌ساز پس‌خورده انجام شد. پاسخ‌های زمانی حاصل از پیاده‌سازی روش کنترلی پیشنهادی و نمونه‌های انجام شده، با توجه به زاویه میله و موقعیت توپ به ترتیب در شکل (۴) و (۵) به تصویر کشیده شده و عملکرد مناسب و سریع کنترل‌کننده پیشنهادی کاملاً نمایان است. چرا که با دقت در اشکال فوق، به ترتیب سیستم در زاویه میله دارای زمان نشست حدود ۵ ثانیه و آندرشوت کمتر از ۰.۲۵ رادیان بر ثانیه دارد و در موقعیت توپ با زمان نشست حدود ۴.۵ ثانیه و سیستم بدون آندرشوت و اوورشوت است. با نوآوری انجام شده درخصوص طراحی کنترل‌کننده جدید با تلفیق همزمان پس‌خورده و روش‌های تطبیقی جهت ارتقاء عملکرد کنترلی، اصلاح قوانین کنترلی جهت مقاوم نمودن سامانه با به کارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری برپایه پارتو برای دریافت پاسخ مطلوب دریافت و نتایج آن در محیط نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شد و همانطور که مشاهده شد، نتایج ارائه شده دارای مشخصات کنترلی موفق نظیر حداقل خطا، کمترین زمان نشست، حداقل فراجهش است که این فرآیند اثبات برتری سامانه را به همراه دارد.

۵-منابع

- [1] A. Isidori, "Nonlinear Control", 3rd ed. Springer-Verlag, Great Britain, London, 2001.
- [2] S. Sastry, "Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control", Springer-Verlag, New York, 1991.
- [3] J. Hauser, S. Sastry, and P. Koktovic, "Nonlinear Control via Approximate Input-Output Linearization: The Ball and Beam Example", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 37, No. 3, 1992.
- [4] Aoustin, Y., Formal'skii, A. Ball on a beam: stabilization under saturated input control with large basin of attraction. *Multibody Syst Dyn* 21, 71–89 (2009). doi.org/10.1007/s11044-008-9128-0.
- [5] W. R. Abdul-Adheem, I. K. Ibraheem "On The Active Input-Output Feedback Linearization of Single-Link Flexible Joint Manipulator: An Extended State Observer Approach", IEEE transactions on industrial electronics, Engineering Department, Baghdad University, 2018.
- [6] Muftah, M.N.; Faudzi, A.A.M.; Sahlan, S.; Mohamaddan, S. Intelligent Position Control for Intelligent Pneumatic Actuator with Ball-Beam (IPABB) System. *Appl. Sci.* 2022.

- [7] A. -C. Huang and Y. -C. Chen, "Adaptive sliding control for singlelink flexible-joint robot with mismatched uncertainties" IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004.
- [8] Zhao, L., Cheng, H., Zhang, J and Xia, Y. 2021. Adaptive control for a motion mechanism with pneumatic artificial muscles subject to dead-zones. Mechanical Systems and Signal Processing. 2020.
- [9] Koksals, N., An, H and Fidan, B., 2020. Backstepping-based adaptive control of a quadrotor UAV with guaranteed tracking performance. ISA Transactions 2020.
- [10] VahidNajafpour, Rasool Ramezani, Investigation of stability and deformation of earthen walls reinforced with geosynthetics under explosion with passive defense approach, Journal of Airspace Defense Vol. 1, No, 3, 1401.
- [11] Reza Tarighi, M.H Khaledi, M.H. Kazemi, Target Tracking in Radar using the Kalman Filter Technique, Journal of Airspace Defense, Vol. 2, No 3, 1402.
- [12] M. Andalib Sahnehsaraei, M.J. Mahmoodabadi and A Bagheri "Pareto optimum control of a 2-DOF inverted pendulum using approximate feedback linearization and sliding mode control " Transactions of the Institute of Measurement and Control Vol. 36(4) 496–505, 2014.
- [13] M. J. Mahmoodabadi, S. Arabani Mostaghim, A. Bagheri, , Nariman-zadeh, N. Pareto "Optimal Design of the Decoupled Sliding Mode Controller for an Inverted Pendulum System and Its Stability Simulation via Java Programming" Mathematical and Computer Modelling, 2013.
- [14] J. Rezapour, M. Sharifi, & Nariman-zadeh, "Application of fuzzy sliding mode control to robotic manipulator using multi-objective genetic algorithm". In publish of IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications. (INISTA), PP. 455 – 459. Doi: 10. 1109/inista. 2011. 5946144, 2011.
- [15] Keramat Malakzadeh Fard, Ali Reza Pourmoayed, Hamid Akbarbeyglou, Mohammad Ali Ranjbar, Optimal Design of Satellite Thermal Control Subsystem Using Appropriate Choice of Surface Finishes, Journal of Aerospace Defense, Vol. 2, No 2, 1402.
- [16] M. J. Mahmoodabadi, M. Taherkhorsandi, M. Talebipour, Castillo-Villar, K. K. Adaptive "Robust PID Control Subject to Supervisory Decoupled Sliding Mode Control Based upon

- Genetic Algorithm Optimization. Transactions of the Institute of Measurement and Control", 2015.
- [17] S. K Oh, H. J. Jang and W. Pedrycz, "The Design of a Fuzzy Cascade Controller for Ball and Beam System: A Study in Optimization with the Use of Parallel Genetic Algorithms", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 22, pp. 261–271, 2009.
- [18] Zhao, W., Zhang, Z., Mirjalili, S., Wang, L., Khodadadi, N. and Mirjalili, S.M. An effective multi-objective artificial hummingbird algorithm with dynamic elimination -based crowding distance for solving engineering design problems. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 398:115223, 2022.
- [19] A. Khalkhali, M. Sadafi, J. Rezapour, H. Safikhani "Pareto based Multi-Objective optimization of solar thermal energy storage using genetic algorithm" Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 3–4, 2010.
- [20] Fathy, A. A novel artificial hummingbird algorithm for integrating renewable based biomass distributed generators in radial distribution systems. Applied Energy, 2022.
- [21] Chang, B.C., Kwatny, H. and Hu, S.S. An application of robust feedback linearization to a ball and beam control problem., 1998.
- [22] J. E. Slotine and W. Li, "Applied nonlinear control" Ed, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- [23] Yousri Silaa, M., Bencherif, A., and Barambones, O. A novel robust adaptive sliding mode control using stochastic gradient descent for PEMFC power system. International Journal of Hydrogen Energy. Available online , 2023.
- [24] Mahmoodabadi, M.J., Soleimani, T. and Sahnehsaraei, M.A., 2018. A hybrid optimal controller based on the robust decoupled sliding mode and adaptive feedback linearization. Information Technology and Control, 47(2), pp.295-309.