

Adaptive Neural Network Dynamic Surface Control for Nonlinear Stochastic Systems in the Strict-Feedback Form with Prandtl-Ishlinskii Hysteresis in the Actuator

Mohammad Mahdi Aghajary¹, *M.Sc.*, Mahnaz Hashemi^{1,2}, *Assistant Professor*

- (1) Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
(2) Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

maghajary2004@gmail.com
m.hashemi@pel.iaun.ac.ir

Abstract:

Using the adaptive radial basis function (RBF) neural network dynamic surface control (DSC) design method, a controller design approach is presented in order to the stabilization of strict-feedback nonlinear stochastic systems subjected to Prandtl-Ishlinskii nonlinearity in the actuator. This method is capable to be applied to nonlinear stochastic systems with any unknown dynamics. According to the universal approximation capability, the RBF neural networks make it possible to approximate the unknown dynamics of the nonlinear stochastic systems. Using the minimal-learning-parameters algorithm the approximation procedure is done with a minimum complexity and required calculations. The stability of the proposed control system is proven analytically and its results are demonstrated using a simulation example. It is shown that the proposed design approach guarantees the boundedness in probability for adaptive control system, and in turn the uniformly ultimately boundedness of all closed-loop signals. It is also shown, that using this method the tracking error can be made arbitrarily small.

Index Terms: Actuator nonlinearity, adaptive RBF neural networks, dynamic surface control, nonlinear stochastic systems, Prandtl-Ishlinskii hysteresis.

Received: 14 January 2020

Revised: 16 April 2020

Accepted: 20 May 2020

Corresponding Author: Dr. Mahnaz Hashemi

Citation: M.M. Aghajary, M. Hashemi, "Adaptive neural network dynamic surface control for nonlinear stochastic systems in the strict-feedback form with Prandtl-Ishlinskii hysteresis in the actuator", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 42, pp. 15-27, Summer 2020 (in Persian).

کنترل سطح دینامیکی با استفاده از شبکه‌های عصبی تطبیقی برای سیستم‌های تصادفی غیرخطی به فرم فیدبک-اکید دارای پسماند پرنتل-ایشلینسکی در عملگر

محمد مهدی آقاجری^(۱)، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهناز هاشمی^(۲)، استادیار

(۱) گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

(۲) مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

maghajary2004@gmail.com

m.hashemi@pel.iaun.ac.ir

چکیده: به منظور پایداری سیستم‌های تصادفی غیرخطی فیدبک-اکید دارای غیرخطی‌گونی پسماند پرنتل-ایشلینسکی در عملگر، با بکارگیری روش طراحی کنترل سطح دینامیکی تطبیقی که از شبکه‌های گوسی بهره‌برده‌اند، یک روش طراحی کنترل-کننده پیشنهاد شده است. این روش قابل اعمال به سیستم‌های غیرخطی تصادفی با هر نوع دینامیک نامعلوم است. شبکه‌های گوسی براساس قابلیت تقریب‌زنی عمومی، امکان تقریب‌زنی دینامیک‌های نامعلوم سیستم‌های تصادفی غیرخطی را فراهم می‌آورند. با استفاده از الگوریتم پارامترهای-یادگیری-کمینه، فرایند تقریب‌زنی دینامیک‌های نامعلوم سیستم با کمترین پیچیدگی و حجم محاسبات صورت می‌پذیرد. پایداری سیستم کنترل پیشنهاد شده، به صورت تحلیلی اثبات شده و نتایج آن نیز به وسیله یک مثال شبیه‌سازی ردگیری، به نمایش گذاشته شده است. نشان داده شده است که روش طراحی پیشنهاد شده برای سیستم کنترل تطبیقی، کران‌داری در احتمال و در نتیجه آن کران‌داری نهایی یکنواخت را برای تمام سیگنال‌های حلقه-بسته تضمین می‌کند. همچنین اثبات شده است که می‌توان با استفاده از این روش خطای ردگیری سیستم را تا اندازه دلخواه کوچک گرداند.

کلمات کلیدی: پسماند پرنتل-ایشلینسکی، سیستم‌های تصادفی غیرخطی، شبکه گوسی، غیرخطی‌گونی عملگر، کنترل سطح دینامیکی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۲/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهناز هاشمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر سیستم‌های غیرخطی مورد توجه فراوانی قرار گرفته‌اند و تلاش‌های بسیاری جهت پایدارسازی آن‌ها صورت گرفته است. وجود غیرخطی‌گونی در یک سیستم کنترل می‌تواند از عوامل ایجاد ناپایداری در یک سیستم باشد و به‌منظور جلوگیری از حوادث جبران‌ناپذیر ناشی از این غیرخطی‌گونی‌ها، باید از راهکارهای کنترلی مناسبی استفاده نمود. از این‌رو، تکنیک‌های نوآورانه‌ای در مرجع [۱] به‌منظور دستیابی به یک رویه طراحی سیستماتیک برای این سیستم‌ها، ارائه شده است. از جمله این تکنیک‌ها، روش طراحی گام-به-عقب^۱ است. با توجه به افزایش پیچیدگی مسأله، این سیستم‌ها در سه کلاس سیستم-های فیدبک-اکید^۲، سیستم‌های فیدبک-خالص^۳ و سیستم‌های فیدبک-خالص-بلوکی^۴ طبقه‌بندی می‌شوند [۱]. در مرجع [۲] با استفاده از تکنیک طراحی گام-به-عقب، به‌کارگیری شبکه‌های گوسی^۵ (RBFNN) و تکنیک الگوریتم پارامترهای-یادگیری-کمینه^۶، کنترل‌کننده خلاقانه‌ای برای سیستم‌های تصادفی غیرخطی فیدبک-اکید دارای دینامیک‌های نامعلوم طراحی شده است. اما یک مشکل ذاتی در روش طراحی گام-به-عقب^۷، موسوم به "انفجار پیچیدگی"^۸ یا "انفجار ترم‌ها"^۹ وجود دارد که طراحی و شبیه‌سازی را با افزایش مرتبه سیستم بسیار پیچیده می‌نماید. در سال ۲۰۰۰ در مقاله‌ای [۳] تکنیک بسیار خلاقانه‌ای ارائه شد که از رخ‌دادن این پدیده جلوگیری می‌کند. این روش کنترل سطح دینامیکی^{۱۰} (DSC) نام دارد. مطالعات متعددی [۴-۸]، با استفاده از این تکنیک به جای استفاده از روش طراحی گام-به-عقب، به‌منظور جلوگیری از رخ‌دادن پدیده "انفجار پیچیدگی"، روش‌هایی جهت پایدارسازی شکل‌های مختلفی از سیستم‌های غیرخطی ارائه نموده‌اند. در ادامه برخی از این مطالعات بررسی خواهند شد. در مرجع [۴] با توسعه روش کنترل سطح دینامیکی با استفاده از شبکه‌های گوسی، کنترل‌کننده‌ای برای سیستم‌های غیرخطی به فرم فیدبک-اکید دارای نامعینی دلخواه، ارائه گردیده است. مقاله [۵] به بررسی مسأله کنترل ردیابی تطبیقی برای یک کلاس از سیستم‌های غیرخطی فیدبک-اکید تک-ورودی تک-خروجی نامعین با مسیر و اغتشاشات کنترلی نامعلوم پرداخته و با به‌کارگیری از روش طراحی کنترل سطح دینامیکی از مشکل "انفجار پیچیدگی" که در طراحی گام-به-عقب معمولی رخ می‌دهد جلوگیری کرده است. در مرجع [۶] نیز براساس روش کنترل سطح دینامیکی و با ترکیب روش کنترل حالت لغزشی و فازی تطبیقی برای ژيروسکوپ سیستم‌های میکرو-الکترومکانیکی، کنترل‌کننده‌ای خلاقانه ارائه شده است. در مرجع [۷] با استفاده از کنترل سطح دینامیکی یک کنترل‌کننده ضداشباع و یک کنترل‌کننده ضداشباع محدود در زمان تطبیقی برای مسأله کنترل ورود امن به پایانه فضاپیما، براساس مدل حرکت نسبی فضاپیما و تابع پتانسیل جلوگیری از برخورد کره ارائه گردیده است.

وقوع و رخ‌دادن خرابی در سیستم‌های کنترل می‌تواند منجر بروز به حوادث فاجعه‌آمیزی گردد. از این‌رو، تلاش‌های فراوانی در زمینه پیشگیری از رخ‌دادن این‌گونه حوادث و مقابله با اثرات نامطلوب آن بر روی سیستم‌های کنترل انجام شده است. خرابی ممکن است در بخش‌های مختلفی از یک سیستم کنترل رخ دهد، از جمله سنسورها، عملگرها، کنترل‌کننده‌ها، خطوط ارتباطی و غیره. از جمله موضوعات مورد توجه پژوهش‌گران در سال‌های اخیر بروز و رخداد خرابی در عملگرهای سیستم‌های کنترل، است. خرابی عملگر به معنی تغییر مشخصه عملگر از حالت خطی به انواع حالت‌های غیرخطی، از جمله عملکرد جزئی عملگر، جام شدن آن و قوق پدیده ناحیه-مرده و پدیده پسماند در عملگر و غیره است. در ادامه، مطالعاتی مرور خواهند شد که به بررسی وقوع هرکدام از این، انواع یادشده، عیب‌ها در عملگرها پرداخته‌اند. مقاله [۹] با استفاده از کنترل سطح دینامیکی، به‌منظور پرهیز از پدیده انفجار پیچیدگی در طراحی گام-به-عقب معمولی و معرفی تابع لیاپانوف انتگرالی، کنترل‌کننده‌ای برای سیستم‌های غیرخطی فیدبک-خالص دارای ناحیه-مرده ارائه می‌کند. در مرجع [۱۰] وقوع خرابی‌های متغیر-با-زمان در سیستم‌های غیرخطی برای کلاسی از سیستم‌های با مرتبه-کسری مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از تکنیک همزمان‌سازی حالت لغزشی تطبیقی کنترل‌کننده‌ای ارائه شده است تا به مشکلات ناشی از نامعلوم بودن پارامترهای سیستم، خرابی عملگر و اغتشاشات بدون شناسایی صریح خطا غلبه شود. در مرجع [۱۱] نیز مسأله کنترل تطبیقی برای سیستم‌های با تأخیر زمانی غیرخطی تصادفی دارای ناحیه-مرده مورد بررسی قرار گرفته است و با استفاده از یک طرح کنترلی تطبیقی برپایه شبکه‌های عصبی با استفاده از تکنیک کنترل سطح دینامیکی و الگوریتم پارامترهای یادگیری کمینه به‌منظور کاهش پیچیدگی در محاسبات، همچنین به منظور حذف اثر نامطلوب تأخیر زمانی از تابع لیاپانوف-کاراسوفسکی، کنترل‌کننده خلاقانه‌ای ارائه شده است. در مقاله [۱۲] نیز

مسئله کنترل ردیابی تطبیقی برای یک کلاس عمومی تر از سیستم‌های دارای تأخیر زمانی غیرخطی تصادفی دارای ناحیه-مرده در ورودی مورد بررسی قرار گرفته است و در این مقاله نیز به منظور حذف اثر نامطلوب تأخیر زمانی از تابع لیاپانوف-کاراسوفسکی و به منظور تشخیص توابع غیرخطی مجهول از شبکه‌های گوسی در کنار تکنیک کنترل سطح دینامیکی استفاده شده است. همچنین وجود پدیده پسماند در ورودی در سیستم‌های غیرخطی دارای تأخیر زمانی با نامعینی در دینامیک‌های آن در [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته شده است و در آن با استفاده از تکنیک کنترل سطح دینامیکی به همراه شبکه‌های عصبی تطبیقی کنترل‌کننده‌ای ارائه شده است که با استفاده از شبکه‌های عصبی توابع غیرخطی و دینامیک‌های نامعلوم سیستم غیرخطی تقریب زده می‌شوند. در مقاله [۱۴] با استفاده از تکنیک کنترل سطح دینامیکی طرحی کنترلی برای کلاسی از سیستم‌های غیرخطی فیدبک-اکید تحریک‌شده نامعین دارای پسماند نامعلوم پرتل-ایشلینسکی ارائه شده است و کران‌داری نهایی یکنواخت نیمه-کلی سیستم را تضمین می‌نمایند. در مقاله [۱۵] به مسئله کنترل دینامیکی سطح مدل هواپیمای باری غیرخطی در طول فرایند پیوسته تخلیه محموله سنگین هوایی در شرایط اغتشاشات و اشباع عملگر پرداخته شده است و تأثیر پارامترهای فرایند متحرک شامل وزن بار، موارد متحرک حین پرواز و دینامیک‌های هواپیما را با استفاده از مشاهده گر اغتشاش و کنترل سطح دینامیکی مورد مطالعه قرار داده است. در مرجع [۱۶] با ارائه یک روش نوآورانه با استفاده از ترکیب تکنیک طراحی کنترل سطح دینامیکی و شبکه‌های عصبی به مسئله سیستم‌های توضیح‌شده چند-عامله غیرخطی مرتبه بالا پرداخته شده است. در مقاله [۱۷] با استفاده از روش کنترل ردیابی مسیر براساس کنترل سطح دینامیکی، طرحی کنترلی برای خودروی سطحی زیرفعال، ارائه شده است. تمرکز نویسندگان در مقاله [۱۸] بر طراحی کنترل سطح دینامیکی تطبیقی برای سیستم‌های غیرخطی تکه‌تکه‌ای نامعین است. در هر گام از طراحی گام-به-عقب، کنترل‌کننده مجازی به‌دست آمده، از یک سطح دینامیکی تکه‌تکه‌ای که مشتقات آن به‌صورت بخش‌بخش ساده‌تر محاسبه خواهد شد، عبور داده خواهد شد. در مقاله [۱۹] نیز کنترل‌کننده ردیابی موقعیت بسیار دقیقی مشتمل بر مشاهده گر حالت گسترده غیرخطی، مشتق‌گیر ردیابی و کنترل سطح دینامیکی طراحی شده است که می‌تواند باعث جلوگیری از آشوب در موتور سنکرون آهنربای دائم، در پی قرارگرفتن پارامترهایش درون نواحی خاصی، گردد. حضور پدیده پسماند^{۱۱} در عملگر موضوع مقالات متعددی از جمله [۱۳، ۱۴، ۲۳-۲۰] بوده است. در این میان در [۲۰] پدیده پسماند PI در سیستم‌های معین غیرخطی با ساختار فیدبک-خالص و بکارگیری شبکه‌های عصبی تطبیقی و تابع لیاپانوف، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین وجود پسماند PI با عملگر اجرا در عملگر در مقاله [۲۱] مورد بررسی قرار گرفته است که برای آن یک کنترل‌کننده مقاوم تطبیقی پیشنهاد شده است. مدل پسماند شبه-پس‌زنی در سیستم‌های غیرخطی تصادفی فیدبک-غیراکید در مقاله [۲۲] مورد مطالعه قرار گرفته است که در آن به‌منظور مواجهه با دشواری ناشی از فیدبک-غیراکید سیستم از تکنیک جداسازی متغیرها و به‌منظور طراحی کنترل‌کننده و شناسایی دینامیک‌های غیرخطی مجهول سیستم از ترکیب تکنیک طراحی گام-به-عقب در کنار شبکه‌های گوسی تطبیقی استفاده شده است. در مقاله [۱۳] از تکنیک کنترل سطح دینامیکی تطبیقی با استفاده از شبکه‌های عصبی برای سیستم‌های غیرخطی معین دارای تأخیر زمانی و پسماند PI در عملگر استفاده شده است. در مرجع [۲۳] از تکنیک کنترل ساختار متغیر تطبیقی^{۱۲} و در مرجع [۱۴] از تکنیک کنترل سطح دینامیکی تطبیقی مقاوم برای سیستم‌های غیرخطی معین استفاده شده است. همانگونه که در ادبیات مرور شده دیده شد، آن دسته از تحقیقاتی که پسماند در عملگر را مورد بررسی قرار داده‌اند در مواردی یا آن را در مورد سیستم‌های معین غیرخطی با ساختارهای مختلف، از جمله فیدبک-اکید، فیدبک-خالص و یا فیدبک-غیراکید، بررسی نموده‌اند، یا اینکه اگر آن را در ساختار سیستم‌های تصادفی غیرخطی بررسی نموده‌اند، از مدلی غیر از مدل پسماند PI، مدل پسماند شبه-پس‌زنی، استفاده کرده‌اند که پیچیدگی محاسبات و همچنین شبیه‌سازی نتایج را به شدت افزایش می‌دهد.

در این تحقیق قصد داریم با استفاده از تکنیک طراحی کنترل DSC در کنار شبکه‌های گوسی و بکارگیری الگوریتم پارامترهای-یادگیری-کمینه برای سیستم‌های تصادفی غیرخطی فیدبک-اکید دارای پسماند در عملگر، کنترل‌کننده‌ای طراحی گردد که پایداری این سیستم را تضمین نماید. به این معنی که تمام سیگنال‌های حلقه-بسته کران‌دار-در-احتمال بمانند و خطای ردیابی آن تا حد دلخواه کمینه گردد. ضمناً، به‌منظور مدل‌سازی رفتار پسماندی عملگر، از مدل پسماند PI با عملگر اجرا استفاده شده

است، زیرا این مدل دارای رابطه خطی میان سیگنال ورودی به عملگر و خروجی آن است از این‌رو، نسبت به سایر مدل‌های رفتار پسماندی، در سال‌های اخیر مورد توجه فراوانی در سیستم‌های کنترل قرار گرفته است.

۲- پیش‌نیازها و بیان مسأله

یک سیستم فیدبک-اکید تصادفی غیرخطی را در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} dx_1 = (g_1 x_2 + f_1)dt + \psi_1 d\psi, \\ \vdots \\ dx_i = (g_i x_{i+1} + f_i)dt + \psi_i d\psi, \\ \vdots \\ dx_n = (g_n u + f_n)dt + \psi_n d\psi, \\ y = x_1, \\ u(t) = p_0 v(t) - d[v](t), \end{cases}, \quad b_m \leq g_i \leq b_M, \quad x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n, \quad 1 \leq i \leq n, \quad (1)$$

که در آن ψ حرکت برونی استاندارد r -بعدی تعریف شده بر روی فضای احتمال کامل (Ω, F, P) با Ω به عنوان فضای نمونه، F به عنوان یک σ -میدان، $\{F_t\}_{t \geq 0}$ به عنوان یک فیلتراسیون، P به عنوان یک معیار احتمال و توابع هموار مجهول زیر:

$$f_i(\cdot), g_i(\cdot): \mathbb{R}^i \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}, \quad \psi_i^T: \mathbb{R}^i \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^{i \times r}, \quad (2)$$

در $x \in \mathbb{R}^i$ با شرط اولیه زیر هستند:

$$f(0) = 0, \psi_i^T(0) = 0, \quad \forall t \geq 0, \quad (3)$$

باید توجه شود که u در (۱) ورودی کنترل، خروجی عملگر، است که می‌تواند در معرض غیرخطی‌گونی‌های فراوانی از جمله پسماند در عملگر باشد.

در انجام این تحقیق و در هر گام از رویه تحلیل پایداری، یک سری از تعاریف، مفاهیم و لم‌ها استفاده خواهند شد که در ادامه به صورت اجمالی توضیح داده می‌شوند. سیستم تصادفی زیر را در نظر بگیرید:

$$dx = f(x, t)dt + h(x, t)d\psi, \quad x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n \quad (4)$$

که در آن x بردار متغیرهای حالت سیستم و ψ یک حرکت برونی استاندارد r -بعدی^{۱۳} تعریف شده بر روی فضای احتمال کامل^{۱۴} (Ω, F, P) است که در آن Ω یک فضای نمونه^{۱۵}، F یک σ -میدان^{۱۶}، $\{F_t\}_{t \geq 0}$ یک فیلتراسیون^{۱۷} و P یک معیار احتمال^{۱۸} است.

توابع زیر:

$$f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^n, \quad h: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^{n \times r}, \quad f(0, t) = 0, \quad h(0, t) = 0, \quad \forall t \geq 0 \quad (5)$$

توابع لیپشیتز محلی^{۱۹} در $x \in \mathbb{R}^n$ هستند [۲].

تعریف ۱: برای هر تابع

$$V(x, t) \in C^{2,1}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^+; \mathbb{R}^+) \quad (6)$$

مربوط به رابطه (۴) عملگر دیفرانسیلی L را به این صورت تعریف می‌کنیم [۲]:

$$LV = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f + \frac{1}{2} \text{Tr} \left\{ h^T \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} h \right\}, \quad (7)$$

رابطه (۷)، رابطه ایتو نام دارد.

توجه ۱: عبارت

$$\frac{1}{2} \text{Tr} \left\{ h^T \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} h \right\} \quad (8)$$

ترم اصلاحی ایتو^{۲۰} نامیده می‌شود که در آن عبارت

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (9)$$

سطح بالایی از پیچیدگی را به رویه طراحی کنترل کننده تصادفی، در مقایسه با حالت معین، القا می کند [۲].

لم ۱: سیستم تصادفی (۴) را در نظر بگیرید و فرض کنید که $f(x,t)$ و $h(x,t)$ در آرگومان هایشان C^1 ، $f(0,t)$ و $h(0,t)$ به صورت یکنواخت محدود در t باشند. اگر توابع:

$$V(x,t) \in C^{2,1}(R^n \times R^+, R^+), \quad \mu_1(\cdot), \mu_2(\cdot) \in K_\infty \quad (10)$$

و ثابت های $a_0 > 0$ ، $b_0 \geq 0$ به گونه ای وجود داشته باشند که:

$$\mu_1(|x|) \leq V(x,t) \leq \mu_2(|x|), \quad LV \leq a_0 V(x,t) + b_0, \quad (11)$$

آنگاه جواب فرایند (۴) محدود در احتمال^{۲۱} است [۲].

لم ۲: در خلال طراحی کنترل کننده و اثبات پایداری آن از یک نامساوی نیز به صورت گسترده استفاده خواهد شد. از این رو، در ابتدا آن نامساوی شرح داده می شود.

نامساوی یانگ: این نامساوی به این صورت است،

$$xy \leq \frac{\alpha^p}{p} |x|^p + \frac{1}{q\alpha^q} |y|^q, \quad (p-1)(q-1) = 1 \quad (12)$$

که در آن ثابت های p ، q و $\alpha > 0$ به صورت مناسب براساس شرایط انتخاب خواهند شد [۲].

لم ۳: برای هر تابع پیوسته [۲]،

$$f(x): R^n \rightarrow R, \quad f(0) = 0, \quad x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, \quad (13)$$

با توابع همواره مثبت:

$$h_j(x_j): R \rightarrow R^+, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (14)$$

به گونه ای وجود دارند که

$$|f(x)| \leq \sum_{j=1}^n |x_j| h_j(x_j), \quad (15)$$

عملگر اجرا: به صورت تحلیلی، فرض کنید $C_m[0, t_E]$ فضایی از توابع پیوسته تکه-تکه یکنواخت باشد. برای یک ورودی $v(t)$ که

$$v(t) \in C_m[0, t_E] \text{ و } t \geq 0, \text{ عملگر اجرا}^{۲۳}$$

$$F_r[\cdot; u_{-1}]: C_m[0, t_E] \times u_{-1} \rightarrow C_m[0, t_E], \quad (16)$$

می تواند به صورت استنتاجی برای یک حالت اولیه عمومی $u_{(-1)} \in R$ ، به صورت زیر تعریف شود:

$$\begin{aligned} F_r[v; u_{-1}](0) &= f_r(v(0), u_{-1}), \\ F_r[v; u_{-1}](t) &= f_r(v(t), F_r[v; u_{-1}](t_i)), \quad t_i < t \leq t_{i+1}, \quad 0 \leq i \leq N-1 \end{aligned} \quad (17)$$

با

$$f_r(v, u) = \max(v - r, \min(v + r, u)), \quad (18)$$

که در آن

$$0 = t_0 < t_1 < \dots < t_N = t_E, \quad (19)$$

پارشی از $[0, t_E]$ به گونه ای است که تابع v روی هر کدام از زیر-بازه های $[t_i, t_{i+1}]$ یکنواخت باشد [۱۴].

پسماند پرنتل-یشلینسکی: یک حالت غیرخطی است که به صورت زیر:

$$u(t) = p_0 v(t) - \int_0^R p(r) F_r[v](t) dr, \quad (20)$$

تعریف می‌شود، در آن $u(t)$ خروجی عملگر، $v(t)$ سیگنال ورودی به عملگر، $p(r)$ تابع چگالی^{۲۲} و

$$p_0 = \int_0^R p(r) dr, \quad (21)$$

یک ثابت است که به تابع چگالی $p(r)$ وابسته است [۱۴]. خروجی پسماند، $u(t)$ می‌تواند صورت زیر نیز بیان شود [۲۳]:

$$u(t) = p_0 v(t) - d[v](t), \quad d[v](t) = \int_0^R p(r) F_r[v](t) dr, \quad p_0 = \int_0^R p(r) dr, \quad (22)$$

باید توجه کرد که این مدل از رفتار پسماندی از دو بخش تشکیل شده است. ترم اول بخش خطی معکوس‌پذیر و ترم دوم بخش غیرخطی رفتار پسماندی آن است [۲۱]. این ترکیب از این جهت دارای اهمیت فراوان است که موجب تسهیل در بکارگیری تکنیک‌های کنترلی موجود برای طراحی کنترل‌کننده می‌شود.

شبکه گوسی: قابلیت تقریب‌زنی عمومی را فراهم می‌آورد که هر تابع پیوسته مجهول $f(Z): R^n \rightarrow R$ را با آن می‌توان به صورت

$$f(Z) = W^{*T} \zeta^T(Z) + \delta(Z) \quad (23)$$

تقریب زد که در آن، $Z \in \Omega_Z \subset R^q$ بردار ورودی با q به عنوان بعد ورودی شبکه‌های عصبی،

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_l]^T \in R^l, \quad (24)$$

بردار وزن‌های شبکه‌های عصبی با $l > 1$ به عنوان تعداد گره‌های شبکه‌های عصبی و

$$\zeta(Z) = [\zeta_1(Z), \zeta_2(Z), \dots, \zeta_l(Z)], \quad (25)$$

به عنوان بردار توابع بنیادی با عناصر $\zeta_i(Z)$ که به صورت تابع گوسی^{۲۵} به فرم،

$$\zeta_i(Z) = \exp\left(-\frac{(Z - \mu_i)^T (Z - \mu_i)}{\eta_i^2}\right), \quad i = 1, \dots, l, \quad (26)$$

هستند که در آن

$$\mu_i = [\mu_{i1}, \dots, \mu_{iq}], \quad (27)$$

مرکز میدان مربوطه و μ_i عرض تابع گوسی است [۲]. W^{*T} بردار وزن‌های ثابت ایده‌آل است و به صورت

$$W^{*T} = \arg \min_{W \in R^l} \left\{ \sup_{x \in \Omega_x} |f(x) - W^T \zeta(x)| \right\} \quad (28)$$

تعریف می‌شود [۲]. برای سادگی، یک ثابت مجهول θ به صورت

$$\theta = \max \left\{ \frac{1}{b_m} \|W_i^{*T}\|; i = 1, 2, \dots, n \right\} \quad (29)$$

تعریف می‌شود [۲]. این تکنیک الگوریتم پارامترهای یادگیری کمینه‌ناهیده می‌شود.

۳- طراحی کنترل‌کننده

همانگونه که در مرور ادبیات بیان شد، در مرجع [۲] رهیافتی جهت پایدارسازی سیستم‌های تصادفی غیرخطی به شکل فیدبک-اکید ارائه گردیده است که مبتنی بر تکنیک طراحی گام-به-عقب و بهره‌گرفته از شبکه‌های گوسی در کنار الگوریتم پارامترهای یادگیری-کمینه است.

روش ارائه شده حاضر توسعه‌ای بر روش پیشنهاد شده در مرجع [۲] است. به این صورت که با جایگزین نمودن روش طراحی گام-به-عقب، ارائه شده در آن مرجع، با روش طراحی کنترل سطح دینامیکی برای سیستم‌های تصادفی غیرخطی به فرم فیدبک-

اکید روش طراحی بهینه‌تری ارائه می‌گردد که همچنان از مزیت‌های روش پیشین نیز در به‌کارگیری از الگوریتم پارامترهای- یادگیری-کمینه بهره‌مند می‌شود. در نهایت نیز روش طراحی حاصل شده برای بررسی وقوع پدیده پسماند PI در عملکرد به‌کار گرفته خواهد شد. این روش براساس یک الگوریتم طراحی بازگشتی چند-مرحله‌ای بنا شده است که در ادامه شرح داده خواهد شد. سیستم غیرخطی تصادفی فیدبک-اکید (۲۰) را در نظر بگیرید، آنگاه برای هر گام i یک سطح خطا $\{S_i\}$ به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$S_i = x_i - z_i, \quad 1 \leq i \leq n, \quad z_1 = y_r, \quad (30)$$

که در آن، S_i سطح خطای i ام، x_i حالت i ام و z_i حالت مطلوب i ام برای سیستم است. رویه طراحی ارائه شده مشتمل بر n گام پی‌درپی محاسبات است. یک ورودی کنترل مجازی $\bar{x}_{(i+1)}$ برای هر گام به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{x}_{i+1} = -k_i S_i - \frac{1}{2a_i} S_i^3 \hat{\theta} \zeta_i^T(Z_i) \zeta_i(Z_i), \quad 1 \leq i \leq n, \quad Z_i = [\bar{x}_i, \hat{\theta}], \quad \bar{x}_i = [x_1, \dots, x_i], \quad (31)$$

$$v = \bar{x}_{n+1} = -k_n S_n - \frac{1}{2a_n} S_n^3 \hat{\theta} \zeta_n^T(Z_n) \zeta_n(Z_n), \quad (32)$$

که در آن، a_i و k_i پارامترهای طراحی، $\zeta_i(Z_i)$ توابع پایه شعاعی و $\hat{\theta}$ تخمین θ است. ورودی کنترل مجازی، به منظور بدست آوردن مقدار مطلوب حالت مرحله بعد، از یک فیلتر پایین-گذر عبور داده می‌شود:

$$\epsilon_{i+1} \dot{z}_{i+1} + z_{i+1} = \bar{x}_{i+1}, \quad 1 \leq i \leq n-1, \quad (33)$$

که در آن ϵ_i پارامتر طراحی می‌باشد. پارامتر y_i خطای فیلتر $1-i$ ام، به ازای $2 \leq i \leq n$ به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$y_i \triangleq z_i - \bar{x}_i = -\epsilon_i \dot{z}_i, \quad (34)$$

که دارای مشتقی به صورت :

$$dy_i = \left(-\frac{y_i}{\epsilon_i} + B_i(S_i, \zeta_i, y_i, \hat{\theta}, \bar{x}_i, \bar{x}_i) \right) dt + G_i(S_i, \zeta_i, y_i, \hat{\theta}, \bar{x}_i, \bar{x}_i) d\psi, \quad (35)$$

می‌باشد و در آن $B_i(\cdot)$ و $\text{Tr}\{G_i^T(\cdot)G_i(\cdot)\}$ توابعی پیوسته و هموار هستند که به ترتیب دارای بیشینه‌های M_i و N_i می‌باشند. نهایتاً وزن‌های RBFNN با استفاده از قانون تطبیق زیر تقریب زده می‌شوند:

$$\hat{\theta} = \sum_{j=1}^n \frac{\lambda}{2a_j^2} S_j^6 \zeta_j^T(Z_j) \zeta_j(Z_j) - k_0 \hat{\theta}, \quad (36)$$

۴- تحلیل پایداری

از روابط (۳۰) و (۳۳) داریم:

$$dS_i = \left(g_i x_{(i+1)} + f_i + \frac{1}{\epsilon_i} (z_i - \bar{x}_i) \right) dt + \psi_i d\psi, \quad (37)$$

ابتدا توابع لیاپانوف تصادفی مرتبه ۴ به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$V_1 = \frac{1}{4} S_1^4 + \frac{1}{2\lambda} b_m \hat{\theta}^2, \quad \hat{\theta} = \theta - \hat{\theta}, \quad (38)$$

$$V_i = V_{(i-1)} + \frac{1}{4} S_i^4 + \frac{1}{4} y_i^4, \quad 2 \leq i \leq n, \quad (39)$$

سپس با استفاده از رابطه ایتو، (۴) و نامساوی ینگ، لم (۲)، توابعی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\bar{f}_1 \triangleq f_1 - y_r + \frac{3}{2} S_1 \phi_{11}^2 + \frac{3}{4} g_1^4 S_1,$$

$$\bar{f}_i \triangleq f_i + \frac{1}{\epsilon_i} (z_i - \bar{x}_i) + \frac{1}{4} g_{(i-1)} S_i + \frac{3}{2} i S_i \phi_{ii}^2 + \frac{3}{4} r_i^{-2} i^2 S_i \left(\sum_{j=1}^{i-1} S_j^2 \phi_{ij}^2 \right)^2 + \frac{3}{4} g_i^4 S_i, \quad 2 \leq i \leq n-1, \quad (41)$$

$$\bar{f}_n \triangleq f_n + \frac{1}{\epsilon_n} (z_n - \bar{x}_n) + \frac{3}{2} n S_n \varphi_{nn}^2 + \frac{3}{4} r_n^{-2} n^2 S_n \left(\sum_{j=1}^{n-1} S_j^2 \varphi_{ij}^2 \right)^2 + \frac{1}{4} g_{(n-1)} S_n + \frac{3}{4} g_n^3 S_n - g_n d[v](t), \quad (40)$$

این توابع در واقع توابع مجهول سیستم، شامل دینامیک‌های نامعلوم، توابع تصادفی و غیرخطی‌گی‌ها، هستند که در هر گام i تولید می‌شوند. به منظور تقریب‌زدن این توابع، رابطه (۴۰)، در هر گام i شبکه‌های عصبی RBF، توصیف‌شده در روابط (۲۳) الی (۲۹)، به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$h_i(Z_i) = g_i^{-1} \bar{f}_i = W_i^{*T} \zeta_i(Z_i) + \delta_i(Z_i), \quad |\delta_i(Z_i)| \leq \epsilon_i, \quad Z_i = [\bar{x}_i, \hat{\theta}], \quad \bar{x}_i = [x_1, \dots, x_i], \quad (41)$$

با استفاده از رابطه ایتو و اعمال نامساوی یانگ به شبکه عصبی رابطه (۴۱)، سیگنال‌های کنترل مجازی به صورت:

$$\bar{x}_{(i+1)} = -k_i S_i - \frac{1}{2a_i^2} S_i^3 \hat{\theta}_i^T(Z_i) \zeta_i(Z_i), \quad 2 \leq i \leq n-1, \quad (42)$$

سیگنال ورودی کنترل به عملگر به صورت:

$$v = -k_n S_n - \frac{1}{2a_n^2} S_n^3 \hat{\theta}_n^T(Z_n) \zeta_n(Z_n), \quad (43)$$

برای پایدارسازی سیستم به دست می‌آیند. با بهره‌گیری از الگوریتم پارامترهای-یادگیری-کمینه قانون تطبیق به شکل:

$$\hat{\theta} = \sum_{j=1}^n \frac{\lambda}{2a_j^2} S_j^6 \zeta_j^T(Z_j) \zeta_j(Z_j) - k_0 \hat{\theta}, \quad (44)$$

حاصل می‌شود. با استفاده از روابط (۳۷) الی (۴۴)، همچنین در نظر گرفتن ثابت‌هایی زیر:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n a_j^2 b_M^2 + \frac{1}{4} \sum_{j=1}^n \epsilon_j^4 + \sum_{j=2}^n \left(\frac{1}{4\xi_j^4} + \frac{3}{4\theta_j^2} \right) + \frac{3}{4} \sum_{j=2}^n r_j^2 = \beta_0 > 0, \\ \left(\frac{1}{\epsilon_j} - \frac{b_M}{4} - \frac{3}{4} (\xi_j M_j)^{\frac{4}{3}} - \frac{3}{4} (\theta_j N_j)^2 \right) = d_j > 0, \quad 2 \leq i \leq n, \end{aligned} \quad (45)$$

در رابطه ایتو، بعلاوه استفاده از نامساوی زیر:

$$\tilde{\theta} \hat{\theta} = -\tilde{\theta}^2 + \tilde{\theta} \theta \leq -\tilde{\theta}^2 + \left(\frac{\tilde{\theta}^2}{2} + \frac{\theta^2}{2} \right) \leq -\frac{\tilde{\theta}^2}{2} + \frac{\theta^2}{2}, \quad (46)$$

می‌توان رابطه ایتو برای V_n ، LV_n ، را به این صورت نوشت:

$$\begin{aligned} LV_n &\leq -\sum_{j=1}^n c_j S_j^4 - \sum_{j=2}^n d_j y_j^4 + \frac{k_0 b_m}{\lambda} \left(-\frac{\tilde{\theta}^2}{2} + \frac{\theta^2}{2} \right) + \beta_0 \\ &\leq -\sum_{j=1}^n c_j S_j^4 - \sum_{j=2}^n d_j y_j^4 - \frac{k_0 b_m}{2\lambda} \tilde{\theta}^2 + \underbrace{\frac{k_0 b_m}{2\lambda} \theta^2}_{\beta_1} + \beta_0, \quad \beta_0 = \frac{k_0 b_m}{2\lambda} \theta^2 + \beta_0, \end{aligned} \quad (47)$$

در نتیجه:

$$LV_n \leq -\sum_{j=1}^n c_j S_j^4 - \sum_{j=2}^n d_j y_j^4 - \frac{k_0 b_m}{2\lambda} \tilde{\theta}^2 + \beta_1 \leq -\alpha_1 V + \beta_1, \quad (48)$$

که در آن

$$c_i = \left(k_i - \frac{3}{2} \right) b_m, \quad \alpha_1 = \min\{4c_j, 4d_j, k_0, j = 1, 2, \dots, n\}, \quad (49)$$

است. نهایتاً، مشتق تابع لیاپانوف تصادفی n م به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$LV_n \leq -\alpha_1 V + \beta_1. \quad (50)$$

بنابراین، براساس لم ۱ با استفاده از سیگنال کنترل v ، رابطه (۴۳)، تمام سیگنال‌های سیستم کران‌دار-در-احتمال باقی خواهند ماند و سیگنال خروجی $y = x_1$ سیگنال مرجع ورودی را با خطایی تا حد دلخواه کوچک دنبال می‌نماید.

۵- مثال شبیه‌سازی

مثال شبیه‌سازی حاضر، مسأله ردیابی را برای یک سیستم تصادفی غیرخطی شاخص، مورد بررسی در ادبیات [۲]، را با فرض داشتن پسماند PI در عملگر، توصیف شده در [۱۴]، مورد ارزیابی و بررسی قرار خواهد داد. سیستم زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} dx_1 &= ((0.3 + x_1^2)x_2 - 0.8 \sin(x_1))dt + x_1 \sin(x_1) d\omega, \\ dx_2 &= ((1 + x_2^2)x_3 - x_2 - 0.5 x_2^3 - x_1^3 - \sqrt{x_1}) dt + x_1 \cos(x_2) d\omega, \\ dx_3 &= \left((1.5 + \sin(x_1 x_2))u - 0.5x_3 - \frac{1}{3}x_3^2 - x_2^2 x_3 - \frac{x_1}{(1 + x_1^2)} \right) dt + 3x_1 e^{-x_2^2} d\omega, \\ y &= x_1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u(t) &= p_0 v(t) + \int_0^R p(r) F_r[v](t) dr, \\ y_r &= \sin(t), \end{aligned} \quad (51)$$

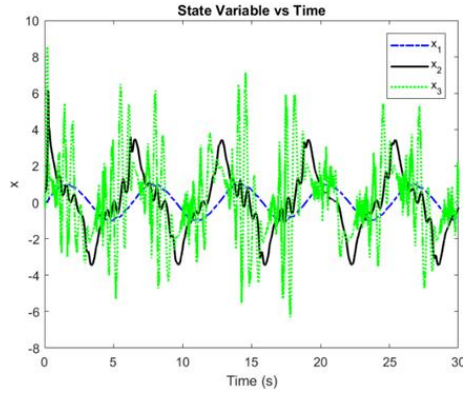
که در آن:

$$p(r) = e^{-0.067(r-1)^2}, \quad (52)$$

$v(t)$ سیگنال ورودی کنترل به عملگر و $u(t)$ خروجی عملگر به فرایند است. پارامترهای طراحی با بهینه‌سازی پارامترهای اولیه ارائه شده در مرجع [۲]، با استفاده از روش سعی و خطا بدست آمده‌اند.

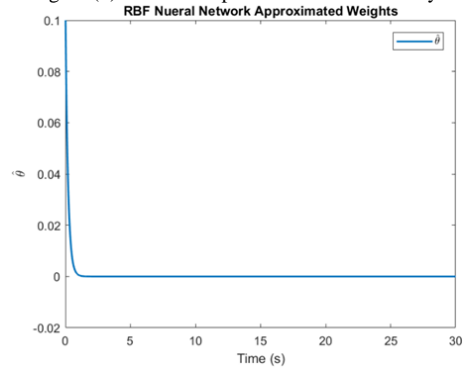
$$[k_0, k_1, k_2, k_3] = [5, 45, 2, 15], \quad [a_1, a_2, a_3] = [5, 5, 12], \quad \lambda = 2. \quad (53)$$

شبکه عصبی نیز به این ترتیب انتخاب شده است که شبکه عصبی $W_1 \zeta_1(Z_1)$ دارای یازده گره با مراکز با فاصله‌های مساوی در بازه $[-5, 5]$ و عرض‌های برابر با ۲ انتخاب شده است. شبکه عصبی $W_2 \zeta_2(Z_2)$ دارای یازده گره با مراکز در فواصل مساوی در بازه $[-5, 5] \times [-5, 5] \times [-5, 5]$ با عرض‌های برابر با ۲ است. همچنین، شبکه عصبی $W_3 \zeta_3(Z_3)$ دارای یازده گره با مراکز فاصله‌های مساوی در بازه $[-5, 5] \times [-5, 5] \times [-5, 5] \times [-5, 5]$ با عرض‌های برابر با ۲ است. علاوه بر این، حالات اولیه به این صورت فرض شده‌اند $\hat{\theta}(0) = 0$ و $[x_1(0), x_2(0), x_3(0)]^T = [0.1, 0.4, 0.2]^T$ الی (۱) نمایش داده شده‌اند. شکل (۱) متغیرهای حالت حلقه-بسته سیستم را نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، تمام حالات حلقه-بسته سیستم کراندار مانده‌اند که این موضوع تصدیق‌کننده پایداری سیستم است. شکل (۲) قانون تطبیق وزن شبکه‌های عصبی را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود قانون تطبیق وزن‌های شبکه عصبی در حدود ۱ ثانیه همگرا می‌شود که در حضور حالت‌های غیرخطی و تصادفی، در مقایسه با نتایج مرجع [۲] که فاقد غیرخطی‌گونی پسماند در عملگر است، معیار مناسبی برای عملکرد و همگرایی شبکه عصبی محسوب می‌گردد. ورودی کنترل، خروجی عملگر، نیز در شکل (۳) نمایش داده شده است. شکل (۴) نیز خروجی سیستم را در کنار خروجی مطلوب نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود خروجی سیستم، با خطای ردگیری بسیار ناچیز، سیگنال خروجی مطلوب را دنبال می‌کند که نشان‌دهنده ردگیری بسیار خوب سیستم است. مشاهده می‌شود، علاوه بر اینکه خروجی سیستم ورودی آن را با خطای بسیار ناچیزی دنبال می‌کند، تمام سیگنال‌های حلقه-بسته سیستم نیز محدود مانده‌اند.



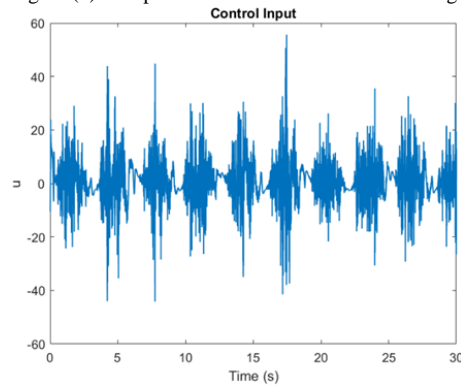
شکل (۱): متغیرهای حالت حلقه-بسته سیستم

Figure (1): Closed-loop state variables of the system



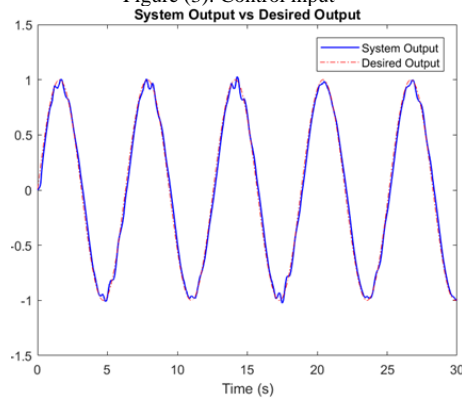
شکل (۲): قانون تطبیق وزن شبکه‌های عصبی

Figure (2): Adaptive law of the neural network weights



شکل (۳): ورودی کنترل

Figure (3): Control input



شکل (۴): خروجی سیستم در مقابل خروجی مطلوب

Figure (4): System output vs. desired output

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، یک رویکرد کنترل سطح دینامیکی برپایه شبکه‌های عصبی تطبیقی برای سیستم‌های غیرخطی تصادفی به فرم فیدبک-اکید دارای پسماند PI در عملگر ارائه شده است. طرح کنترل سطح دینامیکی توسعه یافته مذکور پایداری و کران‌داری-در-احتمال تمام سیگنال‌های حلقه بسته سیستم را با استفاده از تابع لیاپانوف تصادفی مرتبه-چهار تصادفی و تخمین دینامیک‌ها و حالت‌های غیرخطی مجهول با استفاده از شبکه‌های گوسی و الگوریتم پارامترهای-یادگیری-کمینه، با کمترین پیچیدگی در طراحی تضمین می‌کند. به عبارت دیگر، با بهره‌گیری از روش DSC، در مقایسه با روش گام-به-عقب [۲]، موفق شده است از پیچیدگی‌های بوجود آمده در روش گام-به-عقب پرهیز شود و کارایی سیستم را در مواجهه با دینامیک‌های غیرخطی و حالات تصادفی، با همان کیفیت به دست آمده در مرجع [۲]، حفظ گردد. نتایج شبیه‌سازی‌ها مؤثر بودن این روش را هرچه بیشتر نمایان می‌کنند. در نتیجه روش طراحی ارائه شده هم به صورت تحلیلی و هم به صورت عملی تضمین‌کننده پایداری سیستم و کران‌دار ماندن تمام سیگنال‌های حلقه-بسته سیستم است.

سپاسگزاری

از کلیه اعضای محترم هیات علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد مخصوصاً از آقایان دکتر همایون مهدوی‌نسب، دکتر مجید معظمی و اداره انتشارات دانشگاه مخصوصاً سرکار خانم لیلی رضایی که در نشر و چاپ این نشریه کمک می‌کنند صمیمانه سپاسگزاریم. در انتها جای دارد که از منطقه یک عملیات انتقال گاز ایران^{۲۶} به دلیل حمایت مالی از این پروژه و همچنین زحمات فراوان دکتر آرش قره‌باغی از دانشگاه مالاردن سوئد^{۲۷} و آن مرکز، تشکر و قدردانی ویژه داشته باشیم. بدیهی است بدون همکاری همه جانبه ایشان این تحقیق با مشکلات فراوانی مواجه می‌گردید.

References

مراجع

- [1] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotovic, *Nonlinear and adaptive control design*. Wiley New York, 1995.
- [2] H. Wang, B. Chen, C. Lin, "Direct adaptive neural control for strict-feedback stochastic nonlinear systems", *Nonlinear Dynamics*, vol. 67, no. 4, pp. 2703-2718, Mar. 2012 (doi: 10.1007/s11071-011-0182-4).
- [3] D. Swaroop, J. K. Hedrick, P. P. Yip, J. C. Gerdes, "Dynamic surface control for a class of nonlinear systems", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 45, no. 10, pp. 1893-1899, Oct. 2000 (doi:10.1109/tac.2000.880994).
- [4] D. Wang J. Huang, "Neural network-based adaptive dynamic surface control for a class of uncertain nonlinear systems in strict-feedback form", *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 16, no. 1, pp. 195-202, Jan. 2005 (doi:10.1109/TNN.2004.839354).
- [5] H. Ma, H. Liang, Q. Zhou, C. K. Ahn, "Adaptive dynamic surface control design for uncertain nonlinear strict-feedback systems with unknown control direction and disturbances", *IEEE Trans. on Systems, Man, Cybernetics: Systems*, no. 99, pp. 506 - 515, July 2018 (doi:10.1109/TSMC.2018.2855170).
- [6] D. Lei, T. Wang, D. Cao, J. Fei, "Adaptive dynamic surface control of mems gyroscope sensor using fuzzy compensator", *IEEE Access*, vol. 4, pp. 4148-4154, August 2016 (doi:10.1109/ACCESS.2016.2596538).
- [7] G.Q. Wu, S.M. Song, J.G. Sun, "Adaptive dynamic surface control for spacecraft terminal safe approach with input saturation based on tracking differentiator", *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 1129-1141, May 2018 (doi:10.1007/s12555-017-0531-2).
- [8] G. Liu, G. Li, Z. Peng, H. Pan, "Adaptive neural network dynamic surface control algorithm for pneumatic servo system", *Proceedings of the ICMIC*, pp. 821-829, Singapore, 2020 (doi: 10.1007/978-981-15-0474-7_77).
- [9] T.-P. Zhang S. S. Ge, "Adaptive dynamic surface control of nonlinear systems with unknown dead zone in pure feedback form", *Automatica*, vol. 44, no. 7, pp. 1895-1903, July 2008 (doi: 10.1016/j.automatica.2007-11.025).
- [10] M. Bataghva, M. Hashemi, "Adaptive sliding mode synchronisation for fractional-order non-linear systems in the presence of time-varying actuator faults", *IET Control Theory and Applications*, vol. 12, no. 3, pp. 377-383, Jan. 2018 (doi:10.1049/iet-cta.2017.0458).

- [11] Z. Li, T. Li, G. Feng, "Adaptive neural control for a class of stochastic nonlinear time-delay systems with unknown dead zone using dynamic surface technique", *International Journal of Robust Nonlinear Control*, vol. 26, no. 4, pp. 759-781, Mar. 2016 (doi:10.1002/rnc.3336).
- [12] W.J. Si, X.D. Dong, F.F. Yang, "Adaptive neural dynamic surface control for a general class of stochastic nonlinear systems with time delays and input dead-Zone", *International Journal of Control, Automation Systems*, vol. 15, no. 5, pp. 2416-2424, Sep. 2017 (doi:10.1007/s12555-016-0564-y).
- [13] X. Zhang, C.Y. Su, Y. Lin, L. Ma, J. Wang, "Adaptive neural network dynamic surface control for a class of time-delay nonlinear systems with hysteresis inputs and dynamic uncertainties", *IEEE Trans. On Neural Networks Learning Systems*, vol. 26, no. 11, pp. 2844-2860, Feb. 2015 (doi:10.1109/TNNLS.2015.2397935).
- [14] X. Zhang, Y. Lin, J. Mao, "A robust adaptive dynamic surface control for a class of nonlinear systems with unknown Prandtl-Ishilinskii hysteresis", *International Journal of Robust Nonlinear Control*, vol. 21, no. 13, pp. 1541-1561, Sep. 2010 (doi:10.1002/rnc.1652).
- [15] B. Xu, "Disturbance observer-based dynamic surface control of transport aircraft with continuous heavy cargo airdrop", *IEEE Trans. on Systems, Man, Cybernetics: Systems*, vol. 47, no. 1, pp. 161-170, Jan. 2017 (doi: 10.1109/TSMC.2016.2558098).
- [16] M. Hashemi, G. Shahgholian, "Distributed robust adaptive control of high order nonlinear multi agent systems", *ISA transactions*, vol. 74, pp. 14-27, Feb. 2018 (doi: 10.1016/j.isatra.2018.01.023).
- [17] N. Wang, Z. Liu, Z. Zheng, M. J. Er, "Global exponential trajectory tracking control of underactuated surface vehicles using dynamic surface control approach", *Proceeding of the IEEE/ICoIAS*, pp. 221-226, Singapore, March 2018 (doi: 10.1109/ICoIAS.2018.8494037).
- [18] H. Liu, Y. Pan, J. Cao, "Composite learning adaptive dynamic surface control of fractional-order nonlinear systems", *IEEE Trans on Cybernetics*, Sep. 2019 (doi:10.1109/TCYB.2019.2938754).
- [19] G. Li, W. Xu, J. Zhao, S. Wang, B. Li, "Precise robust adaptive dynamic surface control of permanent magnet synchronous motor based on extended state observer", *IET Science, Measurement and Technology*, vol. 11, no. 5, pp. 590-599, July 2017 (doi:10.1049/iet-smt.2016.0252).
- [20] B. Ren, S. S. Ge, C.Y. Su, T. H. Lee, "Adaptive neural control for a class of uncertain nonlinear systems in pure-feedback form with hysteresis input", *IEEE Trans. on Systems, Man, Cybernetics, Part B*, vol. 39, no. 2, pp. 431-443, April 2009 (doi:10.1109/tsmcb.2008.2006368).
- [21] Q. Wang, C.Y. Su, "Robust adaptive control of a class of nonlinear systems including actuator hysteresis with Prandtl-Ishlinskii presentations", *Automatica*, vol. 42, no. 5, pp. 859-867, Mar. 2006 (doi: 10.1016/j.automatica.2006.01.018).
- [22] H. Wang, B. Chen, K. Liu, X. Liu, C. Lin, "Adaptive neural tracking control for a class of nonstrict-feedback stochastic nonlinear systems with unknown backlash-like hysteresis", *IEEE Trans. on Neural Networks Learning Systems*, vol. 25, no. 5, pp. 947-958, May 2014 (doi:10.1109/tnnls.2013.2283879).
- [23] C.Y. Su, Q. Wang, X. Chen, and S. Rakheja, "Adaptive variable structure control of a class of nonlinear systems with unknown Prandtl-Ishlinskii hysteresis", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 50, no. 12, pp. 2069-2074, Dec. 2005 (doi:10.1109/TAC.2005.860260).

زیر نویس‌ها:

- 1- Back-stepping design
- 2- Strict-feedback systems
- 3- Pure-feedback systems
- 4- Block-strict-feedback systems
- 5- Radial basis function neural networks
- 6- Minimal-learning-parameters algorithm
- 7- Back-stepping design
- 8- Explosion of complexity
- 9- Explosion of terms
- 10- Dynamic surface control
- 11- Hysteresis
- 12- Adaptive variable structure
- 13- R-dimensional standard Brownian motion
- 14- Complete probability space
- 15- Sample space
- 16- σ -field
- 17- Filtration
- 18- Probability measure
- 19- Locally Lipchitz functions

20- Itô correction term

21- Bounded in probability

22- Density function

23- Play operator

۲۴- u_{-1} نشان دهنده حالت اولیه پیش از اعمال $v(0)$ در زمان $t = 0$ است.

25- Gaussian function

26- National Iranian Gas Company (NIGC)

27- Arash Gharehbaghi, Mälardalen University · School of Innovation, Design and Engineering (IDT)