

کنترل تطبیقی غیرمتمرکز سیستم دارای تأخیر زمانی غیرافاین غیرخطی ابعاد وسیع با استفاده از شبکه عصبی موجک

الهه سعیدی^(۱) - بهرام کریمی^(۲) - مصطفی پوربهی^(۳)

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

(۲) دانشیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

(۳) کارشناس برق و ابزار دقیق، تام ایران خودرو

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۳

خلاصه: در این مقاله، از یک کنترلر تطبیقی به همراه شبکه عصبی موجک برای یک کلاس از سیستم‌های غیرخطی ابعاد وسیع، با زیر سیستم غیر افاین غیرخطی نامعلوم دارای تأخیر زمانی استفاده شده است. تداخلات وارد شده به زیر سیستم‌ها، غیرخطی و دارای تأخیر در نظر گرفته شده است که در مقایسه با حالتی که تأخیر برای تداخلات، در نظر گرفته نمی‌شود به واقعیت نزدیک‌تر است. در این مقاله، وزن‌های مربوط به لایه خروجی شبکه عصبی موجک، با استفاده از قوانین تطبیقی به دست می‌آیند و سپس به صورت روی خط تنظیم می‌شوند. پایداری سیستم حلقه بسته با استفاده از تحلیل پایداری لیاپانف- کراسفسکی تضمین شده است. علاوه بر پایداری، همگرایی خطای ردیابی به سمت صفر تضمین می‌شود و همچنین تمام سیگنال‌ها در سیستم حلقه بسته کراندار می‌باشند. در انتها، روش ارائه شده به منظور کنترل دو پاندول معکوس که توسط فنر به یکدیگر متصل شده‌اند، اعمال شده و شبیه سازی می‌شود. نتایج شبیه سازی کامپیوتری ارائه شده، کارایی روش پیشنهاد شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: سیستم ابعاد وسیع، سیستم غیرخطی غیرافاین، شبکه عصبی موجک، کنترل تطبیقی.

Decentralized Adaptive Control of Large-Scale Non-Affine Nonlinear Time-Delay Systems Using Wavelet Neural Networks

Elahe Saedi⁽¹⁾ - Bahram Karimi⁽²⁾ - Mostafa Pourbehi⁽³⁾

(1) Msc - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch
elahasaeedi63@gmail.com

(2) Associated Professor - Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan
bahram-karimi@aut.ac.ir

(3) Instrument Expert, IranKhodro Tam, Tehran
m.purbehi@gmail.com

In this paper, a decentralized adaptive controller with using wavelet neural network is used for a class of large-scale nonlinear systems with time- delay unknown nonlinear non- affine subsystems. The entered interruptions in subsystems are considered nonlinear with time delay, this is closer the reality, compared with the case in which the delay is not considered for interruptions. In this paper, the output weights of wavelet neural network and the other parameters of wavelet are adjusted online. The stability of close loop system is guaranteed with using the Lyapanov- Krasovskii method. Moreover the stability of close loop systems, guaranteed tracking error is converging to neighborhood zero and also all of the signals in the close loop system are bounded. Finally, the proposed method, simulated and applied for the control of two inverted pendulums that connected by a spring and the computer results, show that the efficiency of suggested method in this paper.

Index Terms: Large- scale system, non-affine nonlinear system, wavelet neural network, adaptive control.

۱- مقدمه

روشهای متعددی جهت کنترل اینگونه سیستمها مبتنی بر کنترل کلاسیک، مدرن، هوشمند و یا تلفیق آنها، بیان شده است. آتوکی^۱ از اولین کسانی بود که به کنترل غیرمتمرکز، توجه نمود [۴]. این موضوع، تا اواخر دهه هفتاد، گسترش پیدا کرد. ونگ^۲ و دیویسون^۳ مقادیر ویژه تغییرناپذیر تحت کنترل نامتمرکز را معرفی نمودند [۶ و ۵]. سپس روشهای سیستماتیک در مسأله کنترل چندلایه توسط رستوریک^۴ به وجود آمد. همچنین اخیراً پایداری و کنترل برای سیستمهای تأخیردار مورد توجه قرار گرفته است [۸ و ۷]. تأخیر زمانی در سیستمهای فیزیکی و کاربردهای مهندسی، حضور دارد که می تواند عملکرد مطلوب سیستم را از بین ببرد به همین دلیل، سیستمهای تأخیردار، یک بخش فعال از پژوهش در مهندسی کنترل را برای بیش از ۶۰ سال به خود اختصاص داده است. تحول بزرگی در فعالیت‌های عمده بر روی سیستمهای تأخیر دار، در دهه ۷۰ میلادی رخ داد که در طول این سالها ادامه داشته است. کنترل نامتمرکز، یک روش معمول برای حل مسایل سیستمهای ابعاد وسیع به خود جلب کرده است. تعداد نرون‌های کمتری به نتیجه مطلوب رسیدیم همچنین علاوه بر پایداری سیستم حلقه بسته و محدود شدن سیگنالها خطای ردیابی به طور مجانبی به سمت صفر میل می کند.

ساختار این مقاله، به صورت زیر سازمان یافته شده است: در بخش (۲) از مقاله، روابط و فرمولها و دینامیک معادلات بیان شده است. در بخش (۳)، نتایج مربوط به کنترل تطبیقی به همراه شبکه عصبی موجک و تحلیل پایداری بیان شده است. در بخش (۴)، نتایج مربوط به شبیه سازی آورده شده است و در نهایت در بخش (۵)، نتیجه گیری مربوط به مقاله، بیان شده است.

۲- فرمولها و روابط دینامیک سیستم

در این مقاله، یک سیستم غیرخطی غیرافاین ابعادوسیع، در نظر گرفته شده و به وسیله روابط زیر توصیف شده است [۱۰]:

$$\dot{X}_{i,1} = X_{i,2}$$

$$\cdot$$

$$\cdot$$

$$\cdot$$

$$(1)$$

$$\dot{X}_{i,n} = f_i(X_i, u_i) + \sum_{j=1}^N h_{i,j}(X_i(t - \tau_{i,j}(t))) \quad 1 \leq i \leq N$$

و $X_i = [X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,n}]^T$ و $u_i \in \mathbb{R}$ و $y_i \in \mathbb{R}$ به ترتیب، بردارهای حالت و ورودی و خروجی می باشد.

تابع $f_i(X_i, u_i)$ ، تابع نامعلوم و به اندازه کافی هموار می باشد.

دار نامعلوم و کران دار وارد شده به زیر سیستم $\dot{X}_{i,j}(t)$ و $\tau_{i,j}(t)$ یک تأخیر زمانی ناشناخته است و به وسیله نامساوی‌های زیر محدود می شوند:

در دهه گذشته علاقه مندی به نظریه‌های توسعه و کنترل غیرمتمرکز سیستم ابعاد وسیع، افزایش پیدا کرده است [۳]-[۱]. سیستمهای ابعاد وسیع، به سیستمهایی گفته می شود که تعداد متغیرهای حالت و ورودی و خروجی زیادی دارند در نتیجه به دلیل دارا بودن اجزای زیاد، می توانند در یک سطح وسیع، پراکنده شده باشند. در نتیجه نمی توان آنها را به راحتی با یک کنترل کننده واحد، کنترل کرد و برای اینکه هر قسمت از این سیستم بتواند به درستی کار خود را انجام دهد و هماهنگی لازم بین آنها برقرار شود، نیاز است چندین کنترل کننده استفاده شود. به دلیل اینکه در عمل، اکثر سیستمها، رفتاری غیرخطی دارند کارهایی در زمینه طراحی کنترل کننده تطبیقی سیستمهای ابعاد وسیع نامتمرکز غیرخطی صورت گرفته است. از ویژگی اصلی کنترل غیرمتمرکز می توان به کاهش بار محاسباتی همراه با افزایش استحکام و قابلیت اطمینان در برابر اغتشاشات عملیات اشاره کرد که از اوایل دهه ۱۹۷۰ شروع به گسترش نمود. در این راستا تاکنون دلیل اصلی، ساده بودن به کارگیری آن در عمل می باشد. در سالهای اخیر از ترکیب کنترل تطبیقی به همراه شبکه عصبی برای تخمین پارامترهای غیرخطی رواج یافته است [۹].

تحقیق و بررسی در مورد تلفیق روش کنترل تطبیقی به همراه شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی، برای کنترل سیستم غیرخطی غیرافاین ابعاد وسیع در سال ۲۰۱۳ انجام شده است (به [۱۰] مراجعه شود). در [۱۱] از یک کنترل کننده تطبیقی به کمک شبکه عصبی موجک برای سیستم ابعاد وسیع بدون در نظر گرفتن تأخیر زمانی استفاده شده است. در این مقاله از یک کنترل کننده تطبیقی به کمک شبکه عصبی موجک، برای سیستم ابعاد وسیع نامتمرکز و دارای زیر سیستم غیرخطی و غیرافاین و تأخیر دار طراحی شده است. به دلیل آنکه در سیستمهای ابعاد وسیع، تداخلات بین زیر سیستمها تأثیر مهمی دارد به همین دلیل در این مقاله تداخلات وارد شده به هر زیر سیستم غیرخطی، کراندار و دارای تأخیر زمانی و ناشناخته فرض می شود. در نظر گرفتن تأخیر زمانی در تداخلات، موجب می شود که سیستم در نظر گرفته شده در این مقاله، به واقعیت نزدیکتر است. از روش تلفیق کنترل تطبیقی به همراه شبکه عصبی موجک به منظور کنترل سیستم غیرخطی غیرافاین ابعاد وسیع دارای تأخیر زمانی استفاده نشده است که در این مقاله، برای اولین بار به روش تحلیلی، از روش شبکه عصبی موجک برای این منظور استفاده شده است. علت استفاده از شبکه عصبی موجک در این مقاله، در مقایسه با [۱۰]، این است که در شبکه عصبی موجک با تعداد نرون‌های کمتری می توانیم به نتیجه مطلوب برسیم همچنین شبکه‌های موجک دارای خاصیت تقریب زن‌های بهینه هستند و این بدان مفهوم است که برای تقریب یک تابع با دقت دلخواه کمترین تعداد بیت را نیاز دارند.

نتایج مربوط به شبیه سازی انجام شده در این مقاله، نشان می دهد که با استفاده از شبکه موجک، نسبت به شبکه با توابع پایه شعاعی، با

که در رابطه بالا، $f_{u_i} = \frac{\partial f_i(x_i, u_i)}{\partial u_i}$ به ازای $u_i = u_{\lambda_i}$ که مشتق زمانی آن $n_i - 1$ برای $i = 1, \dots, N$ معلوم و محدود می‌باشد. فرض ۲، با توجه به [۱۰] برای هر زیر سیستم، ثابت مثبت f_i^l وجود دارد به طوری که [۱۲]:

$$e_i^{(n_i)} = f_i(x_i, u_i^*) + (u_i - u_i^*)f_{u_i} + \sum_{j=1}^N h_{i,j} - y_{i,d}^{(n_i)} \quad (۱۳)$$

با جایگذاری (۵) در (۱۳)، رابطه زیر را به دست می‌آوریم:

$$e_i^{n_i} = v_i + (u_i - u_i^*)f_{u_i} + \sum_{j=1}^N h_{i,j} - y_{i,d}^{(n_i)} \quad (۱۴)$$

سیگنال شبه کنترل v_i به صورت زیر طراحی می‌شود:

$$v_i - (\alpha_{i,0}e_i + \alpha_{i,1}\dot{e}_i + \dots + \alpha_{i,n_i-1}e_i^{(n_i-1)} + y_{i,d}^{(n_i)}) \quad (۱۵)$$

در رابطه فوق ضرایب، طوری انتخاب می‌شوند که ریشه چندجمله‌ای زیر:

$$L_i(s) = s^{n_i} + k_{i,n_i}s^{n_i-1} + k_{i,n_i-1}s^{n_i-2} + \dots + k_{i,1}$$

سمت چپ محور موهومی صفحه مختلط باشند. به بیان دیگر $L_i(s)$ هورویتز باشد.

از روابط (۱۴) و (۱۵)، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$e_i^{(n_i)} = -(\alpha_{i,0}e_i + \alpha_{i,1}\dot{e}_i + \dots + \alpha_{i,n_i-1}e_i^{(n_i-1)} + (u_i - u_i^*)f_{u_i} + \sum_{j=1}^N h_{i,j}) \quad (۱۶)$$

با جایگذاری رابطه (۱۶) در (۱۰)، خطای ردیابی می‌تواند به فرم ماتریسی به صورت زیر نوشته شود:

$$\dot{e}_i = A_i e_i + b_i [(u_i - u_i^*)f_{u_i} + \sum_{j=1}^N h_{i,j}] \quad (۱۷)$$

A_i ، ماتریس هورویتز است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\alpha_{i,0} & -\alpha_{i,1} & -\alpha_{i,2} & \dots & -\alpha_{i,n_i-1} \end{bmatrix} \quad (۱۸)$$

$$b_i = [0 \ 0 \ \dots \ 1]^T$$

و با توجه به اینکه A_i یک ماتریس هورویتز است در نتیجه، یک ماتریس مثبت معین یکتای P_i وجود دارد که می‌تواند از رابطه زیر محاسبه شود:

$$A_i^T P_i + P_i A_i = -Q_i \quad (۱۹)$$

در رابطه بالا Q_i ، مثبت معین است.

۳- طراحی یک کنترلر تطبیقی غیر متمرکز به همراه شبکه عصبی موجک

در این قسمت از مقاله، از کنترلر تطبیقی به همراه شبکه عصبی موجک، برای معادلات بیان شده در (۱)، استفاده شده است. به منظور انجام این مقاله، از شبکه عصبی موجک با ساختار متغیر استفاده شده است. در شبکه‌های موجک با ساختار متغیر، توابع فعالیت، به فرم موجک‌های تشکیل‌دهنده تبدیل موجک، پیوسته است. پارامترهای مربوط به شبکه

$$0 \leq f_i^l \leq \frac{\partial f_i(x_i, u_i)}{\partial u_i} \quad (۲)$$

فرض ۱، با توجه به [۱۰] بردار ردیابی زمان پیوسته مطلوب $X_{i,d}^d$ و مشتق زمانی آن $n_i - 1$ برای $i = 1, \dots, N$ معلوم و محدود می‌باشد.

فرض ۲، با توجه به [۱۰] برای هر زیر سیستم، ثابت مثبت f_i^l وجود دارد به طوری که [۱۲]:

$$0 \leq f_i^l \leq \frac{\partial f_i(x_i, u_i)}{\partial u_i} \quad (۲)$$

$$\left| \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial f_i(x_i, u_i)}{\partial u_i} \right] \right| \leq H_i, \forall (x_i, u_i) \in \Pi \times \mathbb{R}, \Pi \subset \mathbb{R}^{n_i} \quad (۳)$$

در رابطه بالا، H_i یک ثابت مثبت محدود و P_i و Q_i یک ماتریس مثبت معین است و توسط کاربرد انتخاب می‌شود.

فرض ۳، $\sum_{j=1}^N h_{i,j}(x_i(t - \tau_{i,j}(t)))$ کران ناشناخته تداخلات غیرخطی تأخیردار وارد شده به زیر سیستم نام توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\left| h_{i,j}(x_i(t - \tau_{i,j}(t))) \right| \leq \left| e_j^T(t - \tau_{i,j}(t)) p_j b_j \right| \eta_{i,j} (e_j^T \eta t - \tau_{i,j}(t)) p_j b_j$$

که نامعلوم است. روابط زیر را در نظر می‌گیریم:

$$\dot{x}_{i,n_i} = v_i \quad (۵)$$

در رابطه فوق u_i^* تابع کنترل ایده آل است و v_i به سیگنال شبه کنترل اشاره دارد.

از [۱۰]، داریم:

$$\frac{\partial [v_i - f_i(x_i, u_i^*)]}{\partial u_i} \neq 0 \quad (۶)$$

یک تابع ضمنی $\alpha(x_i, v_i)$ وجود دارد، به طوری که:

$$v_i - f_i(x_i, \alpha(x_i, v_i)) = 0 \quad (۷)$$

و رابطه زیر را در نظر می‌گیریم:

$$u_i^* = \alpha(x_i, v_i) \quad (۸)$$

اکنون خطای ردیابی $e_i = y_{i,d} - y_i$ را تعریف می‌کنیم که خروجی مطلوب می‌باشد و بردارهای e_i و \dot{e}_i به صورت زیر است:

$$e_i = [e_i, \dot{e}_i, \dots, e_i^{(n_i-1)}]^T \quad (۹)$$

$$\dot{e}_i = [\dot{e}_i, e_i^{(2)}, \dots, e_i^{(n_i)}]^T \quad (۱۰)$$

از تعریف خطای ردیابی داریم:

$$(۱۱)$$

$$e_i^{(n_i)} = y_{i,d}^{(n_i)} - y_{i,d}^{(n_i)} = \dot{x}_{i,n_i} - y_{i,d}^{(n_i)} = f_i(x_i, u_i) + \sum_{j=1}^N h_{i,j} - y_{i,d}^{(n_i)}$$

از تئوری مقدار میانگین در [۶]، می‌دانیم که $\lambda_i \in (0, 1)$ وجود دارد به طوری که:

$$f_i(x_i, u_i) = f_i(x_i, u_i^*) + (u_i - u_i^*)f_{u_i} \quad (۱۲)$$

موجک، شامل وزن‌ها (پارامترهای خارجی شبکه موجک) و پارامترهای شیفت و بسط موجک‌ها (پارامترهای داخلی شبکه موجک) می‌باشند، این پارامترها می‌توانند به صورت ضرایبی دیده شوند که به طور پیوسته تغییر کنند و توسط الگوریتم‌های گرادیان و یا مبتنی بر روش‌های کنترل تطبیقی تنظیم شوند.

شبکه‌های موجک، با ساختار متغیر، به طور موفقیت آمیزی در تقریب و دسته‌بندی توابع غیرخطی استاتیکی و مدلسازی سیستم‌های دینامیکی به کار رفته‌اند. سیگنال خروجی در شبکه موجک با ساختار متغیر به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\hat{B}_i = -\Gamma_{b_i} (e_i^T p_i b_i) \hat{\phi}_i \quad (23)$$

$$\hat{c}_i = -\Gamma_{c_i} (e_i^T p_i b_i) \hat{B}_i^T \hat{\phi}_{c_i} \quad (24)$$

$$\hat{w}_i = -\Gamma_{w_i} (e_i^T p_i b_i) \hat{B}_i^T \hat{\phi}_{w_i} \quad (25)$$

$$\hat{d}_i = \Gamma_{d_i} (e_i^T p_i b_i)^2 \hat{\phi}_i \quad (26)$$

$$\hat{s}_i = \Gamma_{s_i} (e_i^T p_i b_i)^2 \hat{D}_i^T \hat{\phi}_{s_i} \quad (27)$$

$$\hat{g}_i = \Gamma_{g_i} (e_i^T p_i b_i)^2 \hat{D}_i^T \hat{\phi}_{g_i} \quad (28)$$

$$\hat{\zeta}_i = \gamma_{\zeta_i} |e_i^T p_i b_i| \quad (29)$$

$$\hat{\theta}_i = \gamma_{\theta_i} (e_i^T p_i b_i)^2 \quad (30)$$

$$\hat{\omega}_i = \gamma_{\omega_i} |e_i^T p_i b_i| \quad (31)$$

که در روابط بالا،

$$\Gamma_{b_i} = \Gamma_{b_i}^T > 0, \Gamma_{d_i} = \Gamma_{d_i}^T > 0, \gamma_{\zeta_i} > 0,$$

$$\gamma_{\theta_i} > 0, \Gamma_{w_i} = \Gamma_{w_i}^T > 0, \Gamma_{c_i} = \Gamma_{c_i}^T > 0,$$

$$\Gamma_{s_i} = \Gamma_{s_i}^T > 0, \Gamma_{g_i} = \Gamma_{g_i}^T > 0$$

پارامترهای ثابت طراحی هستند.

لم: سیستم در نظر گرفته شده در (۱) شرایط داده شده در فرض ۲ را برآورده می‌کند. نامساوی زیر برای هر زیر سیستم برقرار است:

$$\frac{e_i^T Q_i e_i}{2f_{u_i}} + \frac{e_i^T p_i e_i \hat{f}_{u_i}}{2f_{u_i}^2} > 0 \quad (32)$$

اثبات: [۱۳] مشاهده شود.

قضیه بیان شده در زیر، پایداری کنترلر پیشنهاد شده را اثبات می‌کند: **قضیه:** برای سیستم غیرمتمرکز (۱)، زیر سیستم‌های موجود در فرض‌های ۱ و ۲ و ۳ را برآورده می‌کند. قانون کنترل (۲۲) با قوانین تطبیقی (۳۱)-(۲۳) باعث می‌شوند که خطای ردیابی به طور مجانبی به صفر همگرا شوند و همه سیگنال‌ها در سیستم حلقه بسته محدود می‌شوند.

اثبات: با توجه به تابع لیپانف زیر:

$$V = \sum_{i=1}^N (V_{i,1} + V_{i,2} + V_{i,3}) \quad (33)$$

که در رابطه بالا،

$$V_{i,1} = \frac{e_i^T p_i e_i}{2f_{u_i}} \quad (34)$$

$$V_{i,2} = \frac{1}{2} [\tilde{B}_i^T \Gamma_{b_i}^{-1} \tilde{B}_i + \tilde{D}_i^T \Gamma_{d_i}^{-1} \tilde{D}_i + \tilde{w}_i^T \Gamma_{w_i}^{-1} \tilde{w}_i + \tilde{c}_i^T \Gamma_{c_i}^{-1} \tilde{c}_i] \quad (35)$$

$$+ \tilde{s}_i^T \Gamma_{s_i}^{-1} \tilde{s}_i + \tilde{g}_i^T \Gamma_{g_i}^{-1} \tilde{g}_i + \frac{\tilde{\zeta}_i^2}{\gamma_{\zeta_i}} + \frac{\tilde{\theta}_i^2}{\gamma_{\theta_i}} + \frac{\tilde{\omega}_i^2}{\gamma_{\omega_i}}$$

موجک، شامل وزن‌ها (پارامترهای خارجی شبکه موجک) و پارامترهای شیفت و بسط موجک‌ها (پارامترهای داخلی شبکه موجک) می‌باشند، این پارامترها می‌توانند به صورت ضرایبی دیده شوند که به طور پیوسته تغییر کنند و توسط الگوریتم‌های گرادیان و یا مبتنی بر روش‌های کنترل تطبیقی تنظیم شوند.

شبکه‌های موجک، با ساختار متغیر، به طور موفقیت آمیزی در تقریب و دسته‌بندی توابع غیرخطی استاتیکی و مدلسازی سیستم‌های دینامیکی به کار رفته‌اند. سیگنال خروجی در شبکه موجک با ساختار متغیر به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sum B_j \phi_j(x, w_j, c_j) = B^T \phi(x, w, c)$$

در رابطه فوق، $\phi_j(x, w_j, c_j)$ تابع موجک j امین نرون لایه مخفی است.

بردار تابع موجک می‌باشد. Bz ها، مشخص‌کننده ضرایب وزن بین خروجی و نرون‌های لایه مخفی مربوط به شبکه عصبی موجک هستند. $B = [B_1, \dots, B_m]^T \in R^m$ بردار وزن‌های لایه خروجی شبکه موجک می‌باشد.

$w_j = [w_{1j} \ w_{2j} \ \dots \ w_{nj}]^T \in R^n$ و $c_j = [c_{1j} \ c_{2j} \ \dots \ c_{nj}]^T \in R^n$ به ترتیب، پارامترهای مربوط به شیفت و بسط شبکه عصبی موجک است و $w = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T \in R^{(n \times m) \times 1}$ بردار بسط شبکه موجک و $c = [c_1, c_2, \dots, c_m]^T \in R^{(n \times m) \times 1}$ بردار شیفت شبکه موجک است. سیگنال کنترل ایده‌آل محلی u_i^* را می‌توانیم به وسیله تابع شبکه عصبی موجک یا هر ساختار تقریب [۹]، به صورت زیر نمایش دهیم:

$$u_i^* = B_i^{*T} \phi_i(z_i, w_i^*, c_i^*) + \varepsilon_i \quad (20)$$

که در رابطه بالا، $Z_i = [x_i^T, u_i^T]^T$ و $\phi_i(z_i, w_i, c_i)$ بردار پایه شبکه عصبی موجک و B_i^{*T} بردار ایده آل وزن شبکه موجک است.

W_i^* پارامتر بسط ایده آل تابع موجک و همچنین C_i^* پارامتر شیفت ایده آل تابع موجک است. ε_i خطای تقریب شبکه عصبی موجک است که در شرایط زیر صدق می‌کند:

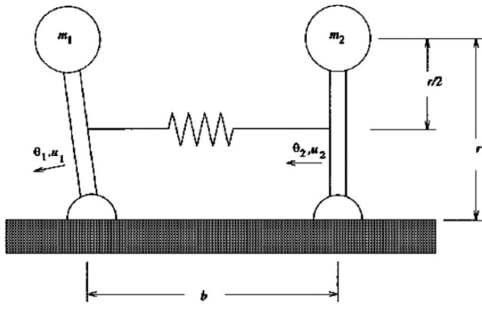
$$|\varepsilon_i| \leq \varepsilon_{m_i}, \varepsilon_{m_i} > 0$$

الگوریتم تطبیقی به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$u_i = \hat{B}_i^T \phi_{b_i}(z_i, \hat{w}_i, \hat{c}_i) - (e_i^T p_i b_i) \hat{D}_i^T \phi_{d_i}(e_i^T p_i b_i, \hat{s}_i, \hat{g}_i) - \frac{N}{2(f_i^1)^2} e_i^T p_i b_i + u_{i,R} \quad (31)$$

$$u_{i,R} = -\hat{\zeta}_i \operatorname{sgn}(e_i^T p_i b_i) - (e_i^T p_i b_i) \hat{\theta}_i - \hat{\omega}_i \operatorname{sgn}(e_i^T p_i b_i) \quad (22)$$

در (۲۱)، عبارت $\hat{B}_i^T \phi_{b_i}(z_i, \hat{w}_i, \hat{c}_i)$ نشان‌دهنده شبکه عصبی موجک به کار برده شده برای کنترلر ایده آل برای سیستم مورد نظر و عبارت $(e_i^T p_i b_i) \hat{D}_i^T \phi_{d_i}(e_i^T p_i b_i, \hat{s}_i, \hat{g}_i)$ به منظور جبران تداخلات غیر خطی، به کار برده شده است.



شکل (۱): مربوط به دو پاندول معکوس متصل شده توسط فنر

Fig. (1): Related to the connected two inverted pendulums by a spring

معادلات غیرخطی برای بیان دینامیک پاندولها به صورت زیر، در نظر گرفته می شود [۱۰]:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1,1} = x_{1,2} \\ \dot{x}_{1,2} = \left(\frac{m_1 g r}{j_1} - \frac{kr^2}{4j_1}\right) \sin(x_{1,1}) + \frac{kr}{2j_1} (1-b) \\ + a_1 \frac{\text{sat}(u_1)}{j_1} + \frac{kr^2}{4j_1} \sin(x_{2,1}(t - \tau_{1,2}(t))) \\ y_1 = x_{1,1} \\ \dot{x}_{2,1} = x_{2,2} \\ \dot{x}_{2,2} = \left(\frac{m_2 g r}{j_2} - \frac{kr^2}{4j_2}\right) \sin(x_{2,1}) + \frac{kr}{2j_2} (1-b) \\ + a_2 \frac{\text{sat}(u_2)}{j_2} + \frac{kr^2}{4j_2} \sin(x_{1,1}(t - \tau_{2,2}(t))) \\ y_2 = x_{2,1} \end{cases}$$

که در روابط بالا، $\theta_1 = x_{1,1}$ و $\theta_2 = x_{2,1}$ مربوط به تغییر مکان زاویه ای پاندولها از حالت افقی است. مقادیر $m_1=2\text{kg}$ و $m_2=2.5\text{kg}$ جرم های انتهای پاندولها، $j_1=0.5\text{kg}$ و $j_2=0.625\text{kg}$ اینرسی، $k=100\text{N/kg}$ ثابت فنر، $r=0.5\text{m}$ ارتفاع فنر، $l=0.5\text{m}$ طول طبیعی فنر و $g=9.81\text{m/s}^2$ شتاب جاذبه می باشد. $a_1=a_2=25$ بهره ورودی کنترل می باشد.

عبارتهای $\sin(x_{2,1}(t - \tau_{1,2}(t)))$, $\sin(x_{1,1}(t - \tau_{2,2}(t)))$ نشان دهنده اثر تداخلات غیرخطی تأخیر دار وارد شده به زیر سیستمها می باشد. عبارت $\text{sat}(\cdot)$ بیانگر غیرخطی بودن عملگرها می باشد که در شبیه سازی به جای آن $\tanh(\cdot)$ جایگزین شده است. فاصله بین مراکز پاندولها تا یکدیگر برابر با $b=0.4\text{m}$ است و $\tau_{1,2}(t) = \tau_{2,2}(t) = 0.5(1 + \sin(t))$ در شرط زیر را برآورده می کند:

$$\tau_{i,2}(t) \leq \tau_{\max} < 1, (i = 1,2)$$

سعی می شود موقعیت های فنرها روی صفر تنظیم شود، به عبارت دیگر $e_i = -\theta_i$ [i.e., $x_i^d = 0, i = 1,2$] به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهاد شده در این مقاله، کنترلر تطبیقی نامتمرکز بر مبنای شبکه

برای به دست آوردن قوانین تطبیقی با استفاده از (۴۵)، روابط زیر را تعریف می کنیم:

$$B_i^{*T} \varphi_i(z, w_i^* c_i^*) + \varepsilon_i = f^*$$

$$\hat{B}_i^T \varphi_i(z, \hat{w}_i, \hat{c}_i) = \hat{f}$$

در نهایت، برای به دست آوردن قوانین تطبیقی، می توانیم تابع \tilde{f} را به صورت رابطه معرفی شده در زیر، تعریف کنیم:

$$\tilde{f} = \hat{f} - f^* = \tilde{B}_i^T \hat{\varphi}_i + \hat{B}_i^T \varphi_{w_i} \tilde{w}_i + \hat{B}_i^T \varphi_{c_i} \tilde{c}_i + \omega(t) \quad (46)$$

در رابطه در نظر گرفته شده برای f^* ، بردارهای بهینه B^* و C^* به صورتی وجود دارد که در آن، B^* بردار وزن های ایده آل شبکه موجک است که با \hat{B} تخمین زده می شود. پارامترهای w^* و c^* به ترتیب، بردار پارامترهای شیفت و بسط ایده آل تابع موجک می باشند که به ترتیب با \hat{w} و \hat{c} تخمین زده می شوند و $\varphi(\cdot) = [\varphi_{10}(\cdot) \varphi_{20}(\cdot) \dots \varphi_m(\cdot)]^T \in R^m$ مربوط به بردار توابع موجک است. $\omega(t)$ ، نامعینی است که به صورت رابطه زیر در نظر گرفته می شود:

$$\omega(t) = -\hat{B}^T h - \tilde{B}^T \tilde{\varphi} - \varepsilon(t)$$

که این نامعینی، توسط مقدار ثابت و مثبت ω_{m_1} ، محدود فرض می شود. $|\omega(t)| = |-\hat{B}^T h - \tilde{B}^T \tilde{\varphi} - \varepsilon| < \omega_{m_1}$ به منظور اثبات کردن رابطه بیان شده در (۴۶) به [۹]، مراجعه شود. همچنین به صورت مشابه:

$$D_i^{*T} \varphi_i(z, s_i^*, g_i^*) + \delta_i = F^*$$

$$\hat{D}_i^T \varphi_i(z, \hat{s}_i, \hat{g}_i) = \hat{F} \quad (47)$$

$$\hat{F} = \hat{F} - F^* = \tilde{D}_i^T \hat{\varphi}_i + \hat{D}_i^T \varphi_{s_i} \tilde{s}_i + \tilde{D}_i^T \varphi_{g_i} \tilde{g}_i + \omega'(t)$$

که در رابطه بالا، $\omega'(t)$ ، نامعینی است که این نامعینی، توسط مقدار ثابت و مثبت ω_{m_2} ، محدود فرض می شود.

$$|\omega'(t)| < \omega_{m_2}$$

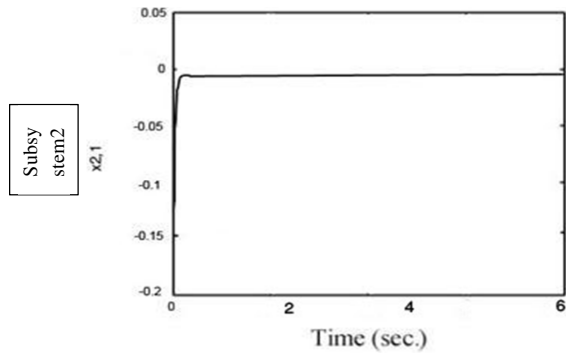
در نتیجه با جایگذاری روابط (۴۶) و (۴۷) در (۴۵)، قوانین تطبیقی به صورت روابط بیان شده در (۳۱)–(۳۲) به دست می آیند در نتیجه با استفاده از قوانین تطبیقی رابطه زیر به دست می آید:

$$\dot{V} \leq \sum_{i=1}^N \left[-\frac{e_i^T Q_i e_i}{2f_{u_i}} + \frac{e_i^T P_i e_i \dot{f}_{u_i}}{2f_{u_i}^2} \right] \quad (48)$$

برای کامل شدن اثبات، باید نشان دهیم که رابطه (۳۲) برقرار است، که به طور مستقیم، با استفاده از لم بیان شده اثبات می شود. با استفاده از لم باربالت و همچنین با مراجعه با اثبات همین موضوع، در مراجع [۱۰] و [۱۳]، تضمین می شود که خطای ردیابی به طور مجانبی به سمت صفر همگرا می شود.

۴- شبیه سازی

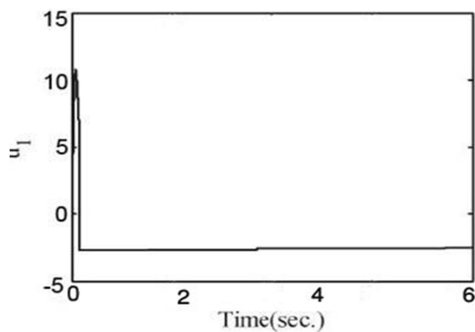
در این قسمت از مقاله برای نشان دادن کارایی روش ارائه شده، کنترل تطبیقی نامتمرکز به کمک شبکه عصبی موجک پیشنهاد شده برای کنترل دو پاندول معکوس که توسط فنر به یکدیگر متصل شده اند، در نظر گرفته شده است [۱۰].



شکل (۳): عملکرد کنترلر پیشنهاد شده برای زیر سیستم دوم

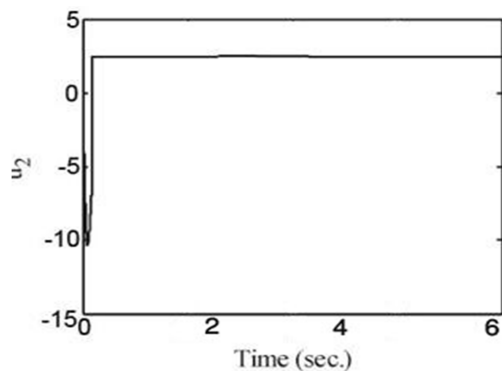
Fig. (3): Performance of the proposed controller for the second subsystem

رفتار سیگنال کنترل کننده برای هر دو زیر سیستم، در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است.



شکل (۴): سیگنال کنترل ورودی u_1 برای زیر سیستم اول

Fig. (4): Input control signal (u_1) for the first subsystem



شکل (۵): سیگنال کنترل ورودی u_2 برای زیر سیستم دوم

Fig. (5): Input control signal (u_2) for the second subsystem

در شکل (۶) می‌توانیم شکل وزن‌های لایه خروجی شبکه عصبی موجک را مشاهده کنیم.

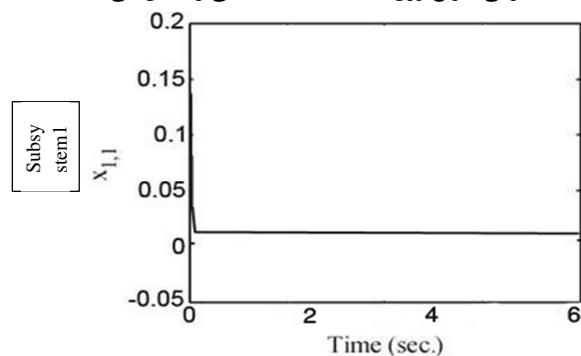
عصبی موجک ارائه شده به سیستم بیان شده، اعمال می‌شود. به منظور کنترل سیستم حلقه بسته، کنترل تطبیقی با کمک شبکه عصبی موجک پیشنهاد شده در این مقاله، با سه نرون در لایه مخفی به سیستم، اعمال خواهد شد. ساختار کنترل کننده به صورت رابطه در نظر گرفته شده در (۲۱) می‌باشد و پارامترهای \hat{B}_i ، \hat{W}_i ، \hat{C}_i ، \hat{D}_i ، \hat{S}_i ، \hat{g}_i ، \hat{c}_i ، $\hat{\theta}_i$ و $\hat{\omega}_i$ به وسیله قوانین تطبیقی (۳۱)-(۲۳) به روز رسانی می‌شوند. ساختار شبکه عصبی موجک در (۲۱) استفاده شده است. $\hat{\phi}_j(\cdot)$ که تابع موجک j امین نرون لایه مخفی شبکه است که از نوع موجک کلاه مکزیکی در نظر گرفته می‌شود.

$$\hat{\phi}_j(\cdot) = \prod_{k=1}^j (1 - \hat{w}_{kj}^2 (z_k - \hat{c}_{kj})^2) \exp\left(\frac{-\sum_{k=1}^j \hat{w}_{kj}^2 (z_k - \hat{c}_{kj})^2}{2}\right)$$

که در رابطه فوق، $z \in \mathbb{R}$ ورودی موجک و \hat{W} و \hat{C} به ترتیب پارامترهای شیفت و بسط تابع موجک می‌باشند که به صورت روی خط تنظیم می‌شوند. همچنین تابع موجک استفاده شده در شبکه عصبی (۴۳)، از نوع موجک کلاه مکزیکی استفاده شده است. پارامترهای کنترلر به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

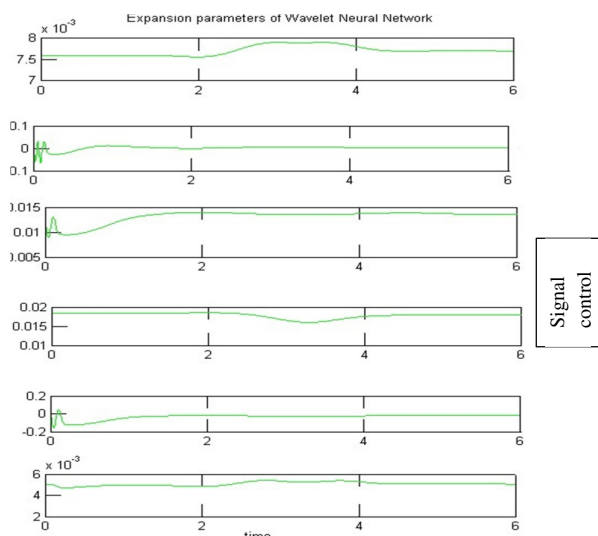
$$\begin{aligned} \Gamma_{b_i} &= \Gamma_{d_i} = 100 \\ \Gamma_{w_i} &= \Gamma_{s_i} = \Gamma_{g_i} = \Gamma_{c_i} = 50 \\ f_i^1 &= 1 \\ \gamma_{\xi_i} &= \gamma_{\theta_i} = \gamma_{\omega_i} = 5 \end{aligned}$$

شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب، عملکرد کنترلر پیشنهاد شده در مقاله، برای زیر سیستم اول و دوم را نشان می‌دهد، همان طور که ملاحظه می‌شود کنترل کننده تطبیقی عصبی موجک نامتمرکز، عملکرد مطلوبی دارد که همگرایی سریع وزن‌های شبکه‌های عصبی را نشان می‌دهد.

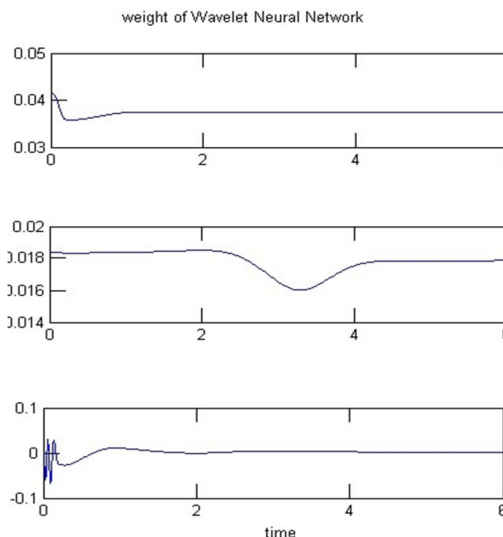


شکل (۲): عملکرد کنترلر پیشنهاد شده برای زیر سیستم اول

Fig. (2): Performance of the proposed controller for the first subsystem



شکل (۸): تخمین آنلاین پارامترهای بسط شبکه عصبی موجک
 Fig. (8): Online estimation of the extension parameters of the wavelet neural network



شکل (۶): وزن‌های لایه خروجی شبکه عصبی موجک
 Fig. (6): Output layer weight of wavelet neural network
 در شکل (۷) می‌توانیم شکل مربوط به تخمین آنلاین پارامترهای شیفت مربوط به شبکه عصبی موجک را مشاهده کنیم:

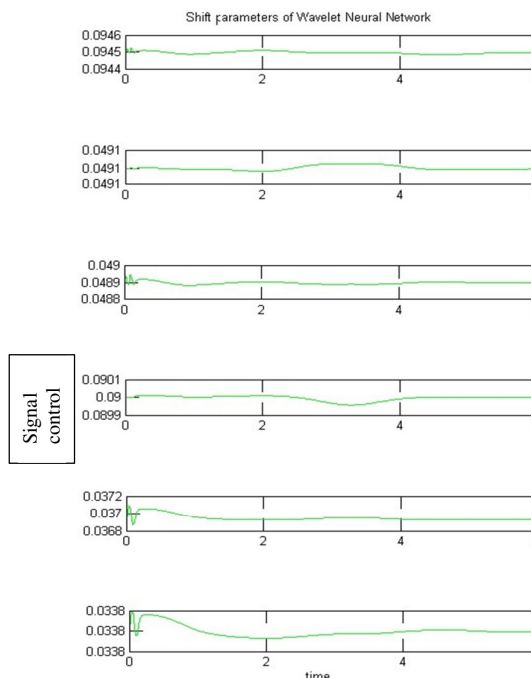
۵- نتیجه گیری

در این مقاله، از یک کنترل کننده تطبیقی به کمک شبکه عصبی موجک، برای سیستم ابعاد وسیع نامتمرکز و همچنین، دارای زیر سیستم غیر خطی و غیرافاین و تأخیردار، طراحی شده است. به دلیل آنکه در کنترل سیستم‌های ابعاد وسیع، تداخلات بین زیر سیستم‌ها تأثیر مهمی دارد به همین دلیل در این مقاله تداخلات وارد شده به هر زیر سیستم غیر خطی، کراندار، دارای تأخیر و ناشناخته فرض می‌شود. در نظر گرفتن تأخیر در تداخلات، موجب می‌شود که سیستم در نظر گرفته شده در این مقاله، به واقعیت نزدیکتر باشد. به منظور اثبات پایداری، از قضایای لیاپانف-کراسفسکی استفاده می‌شود.

در این مقاله، از شبکه عصبی موجک برای تقریب تابع عمومی، استفاده شده است. در مقایسه بین استفاده از شبکه با توابع پایه شعاعی [۱۰] و شبکه موجک به کار برده شده در این مقاله، در شبکه موجک با تعداد نرون‌های کمتری به جواب مطلوب دست پیدا کردیم. با استفاده از روش شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی [۱۰]، با ۱۰۰ نرون به جواب مطلوب دست پیدا کرده بود در حالی که در روش پیشنهاد شده در این مقاله، با استفاده از روش شبکه عصبی موجک با تعداد ۳ نرون به جواب مطلوب رسیدیم و همچنین در مقایسه بین روش به کار برده شده در مرجع [۱۰] و روش شبکه عصبی موجک به کار برده شده در این مقاله، توانستیم پارامترهای مربوط به شبکه موجک، از جمله پارامترهای وزن و شیفت و بسط شبکه موجک را طراحی کرده و همچنین برای آن‌ها قوانین تطبیقی به دست آوریم.

پی‌نوشت:

- 1- Aoki
- 2- Wang
- 3- Divison
- 4- Restorick



شکل (۷): تخمین آنلاین پارامترهای شیفت شبکه عصبی موجک
 Fig. (7): Online estimation of the shift parameters of the wavelet neural network

در شکل (۸) می‌توانیم شکل مربوط به تخمین آنلاین پارامترهای بسط مربوط به شبکه عصبی موجک را مشاهده کنیم:

References

- [1] S. Jain, F. Khorrami, "Decentralized adaptive output feedback design for large-scale nonlinear systems", *IEEE Trans. Automat. Control*, Vol. 42, pp. 729-735, May 1997.
- [2] P. Ioannou, "Decentralized adaptive control of interconnected systems", *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. Ac-31, No. 4, pp. 291-298, April 1986.
- [3] J.T. Spooner, K.M. Passino, "Adaptive control of a class of decentralized nonlinear systems", *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 41, No. 2, pp. 280-284, Feb. 1996.
- [4] M. Aoki, "Some control problems associated decentralized dynamical systems", *IEEE Trans. Aut. Cont.*, Vol. 16, pp. 515-516, 1971.
- [5] S.H. Wang, E.J. Davison, "On the stabilization of decentralized control systems", *IEEE Trans. Aut. Cont.*, Vol. 18, No. 5, pp. 473-479, 1973.
- [6] E.J. Davison, N.K. Tripathi, "The optimal decentralized control of a large power system load and frequency control", *IEEE Trans. Aut. Cont.*, Vol. 23, No. 2, pp. 312-325, 1978.
- [7] S.S. Ge, F. Hong, T. H.Lee, "Adaptive neural control of nonlinear time-delay systems with unknown virtual control coefficients", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.B, Cybern.*, Vol. 34, No. 1, pp. 499-516, Feb. 2004.
- [8] M. Wang, B. Chen, P. Shi, "Adaptive neural control for a class of perturbed strict-feedback nonlinear time-delay systems", *IEEE Trans. Sys., Man, Cybern.B, Cybern.*, Vol. 38, No. 3, pp. 721-730, June 2008.
- [9] E. Saeedi, "Adaptive control for non-affine nonlinear with actuator hysteresis using wavelet neural network", Department of Electrical Engineering Islamic Azad University Najafabad branch, winter 2013, In Persian.
- [10] M.S. Sadeghi, B. Karimi, "Decentralized adaptive control of large-scale non affine nonlinear time-delay systems using neural networks", 21th Iranian Conference on Electrical Engineering, Mashhad, Iran, 2013.
- [11] F. Momeni, B. Karimi, M.B. Menhaj, "Decentralized adaptive control of large- scale non- affine nonlinear systems using wavelet networks", *Int. Conf. on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA)*, Shiraz, 2011.
- [12] B. Karimi, M.B. Menhaj, I. Saboori, "Robust adaptive control of non-affine nonlinear systems using radial basis function neural networks", *Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 495-500, Paris, France, Nov. 2006.
- [13] B. Karimi, M.B. Menhaj, M. Karimi-Ghartemani, I. Saboori, "Decentralized adaptive control of large-scale affine and non-affine nonlinear systems", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 58, No. 8, pp. 2459-2467, Aug. 2009.
- [14] R.M. Sanner, J.E. Slotine, "Gaussian networks for direct adaptive control", *IEEE Trans. Neural Networks*, Vol. 3, pp. 837-863, Nov. 1992.
- [15] B. karimi, M.B. Menhaj, I. Saboori, "Multilayer feed forward neural networks for controlling decentralized large-scale non-affine nonlinear systems with guaranteed stability", *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, Vol. 6, No. 11, pp. 4825-4841, Nov. 2010.
- [16] S. Lang, *Read Analysis*, Addison Wesley, Reading, MA, 1983.
- [17] M. Krstic, *Delay compensation for nonlinear, Adaptive, and PDE Systems*, Boston, MA: Birkhauser, 2009.
- [18] H. Xu, "Decentralized robust control for a class of large-scale systems including delayed state perturbations in the interconnections", *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 47, No. 10, pp. 1745-1751, Oct. 2002.
- [19] H.S. Wu, "Decentralized adaptive robust state feedback for uncertain large-scale interconnected systems with time delays", *J.Optim. Theory Appl.*, Vol. 126, No. 2, pp. 439-462, Aug. 2005.
- [20] C. Hua, X. Guan, P. Shi, "Decentralized robust model reference adaptive control for interconnected time-delays systems", *J.Comout. APPL. Math.*, Vol. 193, No. 2, pp. 383-396, Sep. 2006.
- [21] S.C. Tong, Y.M. Li, H. Zhang, "Adaptive neural network decentralized back stepping output feedback control for nonlinear large scale systems with time delays", *IEEE Trans. Neural Netw.*, Vol. 22, No. 7, pp. 1073-1086, July 2011.
- [22] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, P. Kokotovic, *Nonlinear and adaptive control design*, Hoboken, NJ: Wiley, 1995.
- [23] S.S. Sastry, *Nonlinear Systems*, Springer, 1999.
- [24] R.G. Bartle, *The Elements of Real Analysis*, Wiley & Sons, 1964.
- [25] S. Jain, F. Khorrami, "Decentralized adaptive output feedback design for large-scale nonlinear systems", *IEEE Trans. Automat Control*, Vol. 42, pp. 729-735, May 1997.

