



کنترل مقاوم بازوهای رباتیک با بکارگیری تخمین گر تطبیقی عصبی عدم قطعیت

محمد مهدی فاتح^{1*} و سید محمد احمدی²¹ استاد کنترل، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود² کارشناس ارشد، گروه مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

تاریخ دریافت: 1392/06/14، تاریخ بازنگری: 1392/09/30، تاریخ پذیرش: 1393/02/29

چکیده

این مقاله روشی نوین برای کنترل مقاوم بازوهای رباتیک با تخمین گر تطبیقی عدم قطعیت و راهبرد کنترل ولتاژ ارائه می نماید. تخمین گر پیشنهادی یک شبکه عصبی چند لایه است که پارامترهای آن با الگوریتم پس انتشار خطا تنظیم می شوند. نوآوری طرح مذکور در بکارگیری راهبرد کنترل ولتاژ است که با راهبرد متداول کنترل گشتاور فرق اساسی دارد. مزیت کنترل پیشنهادی آن است که مستقل از مدل دینامیکی ربات است. بعلاوه، مشکل فقدان اطلاعات برای تخمین تابع عدم قطعیت حل می شود. در واقع، بجای بکارگیری خطای تخمین در الگوریتم پس انتشار خطا از خطای ردگیری و مشتق آن بطور موثری استفاده می گردد. پایداری سیستم کنترل با تحلیل ریاضی اثبات می گردد. کارایی روش کنترل پیشنهادی و تخمین گر عدم قطعیت با شبیه سازی بر روی ربات اسکرا مجهز به موتورهای الکتریکی جریان مستقیم مغناطیس دائم نشان داده می شود. عملکرد روش کنترل پیشنهادی با روش کنترلی دیگر که از سیستم فازی برای تخمین عدم قطعیت استفاده می کند مقایسه می شود. نتایج شبیه سازی ها برتری روش پیشنهادی را در ردگیری، نقطه تنظیم و تخمین عدم قطعیت نشان می دهند.

کلمات کلیدی: تخمین عدم قطعیت؛ کنترل مقاوم؛ شبکه عصبی چند لایه؛ بازوی رباتیک؛ راهبرد کنترل ولتاژ.

Robust control of robotic manipulators using an adaptive neural network estimator of uncertainty

M.M. Fateh^{1,*} and S.M. Ahmadi²¹ Prof. of Control Eng., University of Shahrood, Shahrood, Iran² M.Sc., Mechatronic Eng., University of Shahrood, Shahrood, Iran

Abstract

This paper presents a novel robust control approach for robotic manipulators by using a neural network estimator and the voltage control strategy. The proposed estimator is an adaptive multi-layer neural network that its parameters are regulated by a propagation algorithm. The novelty of the proposed design is the use of voltage control strategy that is different with the common torque control strategy. As an advantage, it is free from the dynamical model of the robotic manipulator. Compared with the conventional robust control, it does not require the determination of the bounds of uncertainty and bounding functions. In addition, the problem of lacking data for estimation of uncertainty is solved. In fact, the back-propagation algorithm uses the tracking error and its derivative instead of the estimation error. Stability of the control system is proven by analysis. The efficiency of the proposed control approach and the estimator of uncertainty are shown by simulation of the SCARA robot driven by permanent magnet dc motors. The control performance of the proposed control is compared with a control approach which uses a fuzzy system to estimate the uncertainty. The simulation results show the superiority of the proposed control in tracking control, set point control and estimation of uncertainty.

Keywords: Estimation of uncertainty; robust control; multilayer neural network; robotic manipulator; voltage control strategy.

1- مقدمه

از بازوهای رباتیک برای انجام کارهای صنعتی بطور موثر استفاده می‌شود. از دلایل بکارگیری بازوهای رباتیک در صنعت می‌توان به کاهش هزینه‌ی تولید، بهبود کیفیت، دقت و افزایش تولید اشاره نمود [1]. ماهیت غیرخطی و چندمتغیره مدل بازوی رباتیک و حضور عدم قطعیت، شرایط را برای ردگیری دقیق موقعیت بخصوص در سرعت بالا با مشکل مواجه می‌سازد. بنابراین، برای عملکرد مطلوب کنترل کننده باید عوامل مذکور مهار و جبران شوند. برای حذف دینامیک‌های غیرخطی، در ابتدا روش‌های کنترل گشتاور محاسباتی [2] و کنترل خطی سازی پسخورد [3] پیشنهاد شدند. این روش‌ها بر اساس مدل دینامیکی ربات بوده و نیازمند محاسبات سنگین می‌باشند. در عمل، پارامترهای سیستم از جمله بارهای گرانشی با توجه به کارهای گوناگون ربات، متفاوت بوده و تعیین دقیق آنها در کاربردهای عملی امکان پذیر نخواهد بود. بعلاوه، عدم قطعیت‌های غیر ساختاری مانند اغتشاش خارجی و دینامیک‌های مدل نشده نیز حضور دارند.

روش‌های کنترل تطبیقی و مقاوم برای غلبه بر عدم قطعیت پیشنهاد شده‌اند. کنترل تطبیقی [4] نظریه‌ای پرتطرفدار است که برای کنترل سیستم‌هایی با ساختار دینامیکی معلوم اما با پارامترهای نامعلوم استفاده می‌شود. با این وجود، کنترل تطبیقی عملکرد ضعیفی در برابر عدم قطعیت غیر ساختاری مانند اغتشاش خارجی و دینامیک مدل نشده دارد [5]. وجود عدم قطعیت غیرساختاری موجب شد تا کنترل مقاوم مورد توجه قرار گیرد. برای طراحی کنترل مقاوم، کران عدم قطعیت باید معلوم باشد. بنابراین، طراح باید احتیاط لازم را به عمل آورد تا پایداری سیستم حلقه بسته تضمین شود [6 و 7]. یکی از مسائل مهم در طراحی کنترل مقاوم بازوی ربات، انتخاب صحیح و منطقی حدود عدم قطعیت‌ها است. اگر حدود عدم قطعیت‌ها کوچکتر از مقدار لازم انتخاب شود، خطای ردگیری افزایش می‌یابد و چنانچه بزرگتر انتخاب شود، باعث اشباع ورودی و لرزش سیگنال کنترل می‌شود [8].

در سال‌های اخیر، توجه فراوانی به تئوری کنترل ساختار متغیر به عنوان کنترل مقاوم ربات شده است. این روش کنترلی مزایای فراوانی مانند مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت

و تضمین پایداری دارد ولی کلید زنی در قانون کنترل باعث لرزش سیگنال کنترل می‌گردد. تحریک دینامیک‌های مدل نشده، ارتعاش قطعات مکانیکی و دشواری اجرای قانون کنترل از آثار نامطلوب پدیده لرزش می‌باشد [9]. در نتیجه، الگوریتم‌های هموارسازی سیگنال کنترل مانند روش لایه مرزی [10] و روش تطبیقی [11] پیشنهاد شدند. از دیگر روش‌های کنترل مقاوم، کنترل پسگام [11] است که بصورت بازگشتی با پسخورد از حالت‌های سیستم پایداری را تضمین می‌نماید. در طراحی کنترل مقاوم پسگام نیز باید کران عدم قطعیت‌ها معلوم باشد.

کنترل کننده‌های هوشمندی مانند کنترل فازی، عصبی و فازی-عصبی نیز برای کنترل ربات مطرح شدند. کنترل فازی [12-14]، روش مقاومی است که طراحی آن به مدل دینامیکی سیستم بستگی ندارد و می‌تواند سیستم‌های پیچیده نامعین را کنترل نماید. روش‌های تخمین توابع توسط منطق فازی [15] و شبکه‌های عصبی [16 و 17] برای کنترل سیستم‌های غیرخطی نیز استفاده شده‌اند. روشهای کنترل تطبیقی مستقیم و غیر مستقیم توسط شبکه‌های عصبی [18 و 19] و منطق فازی [12-14] نتایج چشمگیری را نشان داده‌اند. کنترل نرو-فازی مقاوم نیز برای دستیابی به موقعیت دقیق ربات پیاده سازی شده است [20]. با وجود توانایی‌های منحصر بفرد، تضمین پایداری سیستم-های کنترل فازی و عصبی دشوار است [21].

بسیاری از طرح‌های قبلی کنترل ربات مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور هستند [22]. به علت پیچیدگی معادلات دینامیکی ربات، راهبرد کنترل گشتاور بازوی ماهر پیچیده می‌شود. بعلاوه، از دینامیک محرکه‌ها نیز صرف نظر می‌شود. در مقایسه، راهبرد کنترل ولتاژ بدلیل مستقل بودن از دینامیک ربات، آسانتر و کم محاسبه‌تر است [23]. در واقع، کنترل سیستم بر مبنای مدل موتور الکتریکی انجام می‌شود که ساده‌تر از مدل ربات است. در این راهبرد، کنترل بازوی رباتیک توسط محرکه‌های آن انجام می‌شود و ورودی سیستم کنترل بجای گشتاور مفاصل ربات، ولتاژ موتورهای ربات است.

در این مقاله روشی نوین برای کنترل مقاوم بازوی ماهر ربات مطرح می‌شود. این روش کنترلی متفاوت با روش‌های پیش گفته است. کنترل کننده مبتنی بر مدل نامی است و از

2- مدل سازی ربات با در نظر گرفتن محرکه ها

معادلات دینامیکی ربات مجهز به موتورهای جریان مستقیم مغناطیس دائم را می توان بصورت زیر در نظر گرفت [22]:

$$\mathbf{D}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau}_r - \boldsymbol{\tau}_f(\dot{\mathbf{q}}) \quad (1)$$

$$\mathbf{J}\mathbf{r}^{-1}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\mathbf{r}^{-1}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{r}\boldsymbol{\tau}_r = \boldsymbol{\tau}_m \quad (2)$$

که در آن $\mathbf{q} \in R^n$ بردار متغیرهای مفصلی، $\dot{\mathbf{q}} \in R^n$ بردار شتاب های مفصلی، $\mathbf{D}(\mathbf{q}) \in R^{n \times n}$ ماتریس تانسور اینرسی بازوی ربات، $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^n$ مجموع بردارهای گشتاورهای کوریولیس و جانب مرکز و نیروهای گرانشی، $\boldsymbol{\tau}_r \in R^n$ بردار گشتاور ورودی، $\boldsymbol{\tau}_f(\dot{\mathbf{q}}) \in R^n$ بردار گشتاور اصطکاک، \mathbf{r} ماتریس ضریب کاهشی چرخ دنده ها، \mathbf{J} ماتریس ممان اینرسی روتورها و \mathbf{B} ماتریس ضریب اصطکاک روتورها می باشد. \mathbf{r} ، \mathbf{J} و \mathbf{B} ماتریس های قطری $n \times n$ می باشند. برای بدست آوردن ولتاژ به عنوان ورودی سیستم رباتیک، معادله الکتریکی موتور بصورت زیر بیان می گردد:

$$\mathbf{R}\mathbf{I}_a + \mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_a + \mathbf{K}_b\mathbf{r}^{-1}\dot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\phi} = \mathbf{v} \quad (3)$$

که در آن $\mathbf{v} \in R^n$ بردار ولتاژ موتورها، $\mathbf{I}_a \in R^n$ بردار جریان موتورها، $\boldsymbol{\phi} \in R^n$ بردار اغتشاش خارجی، \mathbf{R} ، \mathbf{L} و \mathbf{K}_b ماتریس های $n \times n$ که به ترتیب معرف مقاومت سیم پیچ ها، اندوکتانس سیم پیچ ها و ضریب های ثابت القا می باشد. در موتورهای جریان مستقیم مغناطیس دائم، شار مغناطیسی مربوط به استاتور ثابت می باشد:

$$\mathbf{K}_m\mathbf{I}_a = \boldsymbol{\tau}_m \quad (4)$$

که در آن \mathbf{K}_m ماتریس $n \times n$ ضریب های ثابت گشتاور می باشد. با استفاده از روابط (1) تا (4)، مدل فضای حالت سیستم بصورت زیر توصیف می شود:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}\mathbf{v} - \mathbf{b}\boldsymbol{\phi} \quad (5)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_2 \\ (\mathbf{J}\mathbf{r}^{-1} + \mathbf{r}\mathbf{D}(\mathbf{x}_1))^{-1}(-\mathbf{B}\mathbf{r}^{-1}\mathbf{x}_2 - \mathbf{r}(\mathbf{h}(\mathbf{x}_1) + \boldsymbol{\tau}_f(\mathbf{x}_2)) + \mathbf{K}_m\mathbf{x}_3) \\ \mathbf{L}^{-1}(\mathbf{K}_b\mathbf{r}^{-1}\mathbf{x}_2 + \mathbf{R}\mathbf{x}_3) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{L}^{-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{I}_a \end{bmatrix} \quad (6)$$

تخمین گر تطبیقی عصبی چند لایه با بهره گیری از الگوریتم پس انتشار برای تخمین و جبران عدم قطعیت استفاده می کند و پارامترهای شبکه عصبی را توسط روش گرادیان نزولی تنظیم می نماید. مشکل فقدان اطلاعات برای تخمین تابع عدم قطعیت حل می شود. در الگوریتم پس انتشار بجای خطای تخمین تابع بطور موثری از خطای ردگیری و مشتق آن استفاده می گردد. این طرح در مقایسه با طرحهای کنترل مقاوم، نیازی به دانستن حدود عدم قطعیت یا توابع محدودیت ندارد و آزاد از کلیدزنی است. در نتیجه، لرزش سیگنال کنترل نیز وجود نخواهد داشت. مزیت دیگر طرح کنترل پیشنهادی بکارگیری راهبرد کنترل ولتاژ است که با راهبرد متداول کنترل گشتاور فرق اساسی دارد. در مقایسه با طرح آمده در [24] بجای سیستم فازی از شبکه عصبی برای تخمین عدم قطعیت استفاده شده است و البته الگوریتم تنظیم پارامترها نیز متفاوت است.

در یک مسئله بهینه سازی ممکن است روش گرادیان نزولی در کمینه محلی گیر کند. ولی توجه شود که بهینه سازی محلی یا سراسری با وجود عدم قطعیت در مسئله کنترل ربات میسر نمی شود. ضمناً بکارگیری بسیاری از روشهای بهینه سازی که در حالت "خارج خط" برای سیستمهای استاتیکی بکار رفته است به دلیل محدودیت زمانی و تغییر داده ها در حالت زمان واقعی برای کنترل سیستمهای دینامیکی قابل استفاده نمی باشد. در این مقاله هر دو مسئله کنترل سیستم دینامیکی و وجود عدم قطعیت مطرح هستند. بنابراین، بهینه سازی محقق نمی گردد ولی هدف سیستم کنترل یعنی کاهش خطای ردگیری با بکارگیری روش گرادیان نزولی در حالت "روی خط" برای تنظیم پارامترهای شبکه عصبی محقق شده است.

ادامه مقاله بصورت زیر تدوین شده است: بخش دوم به مدل سازی بازوی رباتیک مجهز به موتورهای الکتریکی جریان مستقیم مغناطیس دائم می پردازد. بخش سوم کنترل مقاوم پیشنهادی را معرفی می کند. بخش چهارم تخمین گر تطبیقی عدم قطعیت ها را معرفی می نماید. بخش پنجم به تحلیل پایداری می پردازد. بخش ششم نتایج شبیه سازی را ارائه نموده و بخش هفتم نتیجه گیری می نماید.

F نامعلوم است. بنابراین، از \hat{F} در قانون کنترل استفاده می‌شود. برای محافظت از موتور، ولتاژ اعمالی به آن باید کمتر از ماگزیمم مجاز v_{\max} باشد. بنابراین، از محدود کننده ولتاژ (11) برای هر موتور استفاده شده است. طرح کنترل پیشنهادی در شکل 1 نشان داده شده است.

4- تخمین گر تطبیقی عدم قطعیت

با اعمال قانون کنترل (11) به سیستم (9)، سیستم حلقه بسته به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\hat{R}I_a + \hat{k}_r \dot{q} + F = v_{\max} \text{sat}(u / v_{\max}) \quad (14)$$

در حالتی که $u > v_{\max}$ ، با توجه به رابطه (12) داریم:

$$\hat{R}I_a + \hat{k}_r \dot{q} + F = v_{\max} \quad (15)$$

هم چنین در حالتی که $u < -v_{\max}$ ، با توجه به رابطه (12) داریم:

$$\hat{R}I_a + \hat{k}_r \dot{q} + F = -v_{\max} \quad (16)$$

در این حالت‌ها، تاثیر تخمین عدم قطعیت \hat{F} دیده نمی‌شود. اما در حالتی که $|u| \leq v_{\max}$ ، با توجه به روابط (9) - (13)، سیستم حلقه بسته بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\dot{e} + k_p e = \hat{k}_r (F - \hat{F}) \quad (17)$$

که در آن $e = q_d - q$ ، خطای ردگیری است. با در نظر گرفتن رابطه (14)، داریم:

$$F - \hat{F} = \hat{k}_r^{-1} (\dot{e} + k_p e) \quad (18)$$

که در رابطه فوق، $F - \hat{F}$ خطای تخمین عدم قطعیت است. نکته قابل توجه این که سیگنال واقعی عدم قطعیت F ، در دسترس نیست. با این وجود، با توجه به رابطه (18)، خطای تخمین به عنوان سیگنال خطای خروجی تخمین گر عصبی با استفاده از خطای ردگیری و مشتق آن $\dot{e} + k_p e$ قابل محاسبه خواهد بود. در این پژوهش، از شبکه عصبی سه لایه برای تخمین عدم قطعیت استفاده شده است. مطابق شکل 2، یک نرون در لایه پنهان بنام نرون j ام و یک نرون در لایه خروجی بنام نرون k ام وجود دارد. معیار خطای شبکه عصبی تعریف می‌شود:

$$J = \frac{1}{2} (F - \hat{F})^2 \quad (19)$$

در لایه خروجی، سیگنال v_k به صورت زیر بدست می‌آید:

$$v_k = p_4 y_j + p_5 \quad (20)$$

مدل فضای حالت (5) یک سیستم چند متغیره غیر خطی با تزویج در فرم غیرهمراه را نشان می‌دهد. سیستم رباتیک با در نظر گرفتن دینامیک موتورها بسیار پیچیده است. بنابراین، کنترل آن با چالش مواجه است. در بسیاری از کارهای تحقیقاتی برای ساده سازی از دینامیک موتورها صرف نظر شده است، ولی دینامیک موتورها نقش مهمی در کنترل ربات در حرکت‌های سریع و دقیق ایفا می‌کنند.

3- طراحی کنترل مقاوم

فرم اسکالر معادله ولتاژ (3) را می‌توان چنین بیان کرد:

$$RI_a + LI_a + k_r \dot{q} + \varphi = u \quad (7)$$

که در رابطه فوق $k_r = K_b r^{-1}$ فرض می‌شود. به منظور پیشنهاد قانون کنترل، مدل نامی را بصورت زیر انتخاب می‌کنیم:

$$\hat{R}I_a + \hat{k}_r \dot{q} = u \quad (8)$$

طبق رابطه (8) مدل نامی سیستم معلوم بوده و پارامترهای نامی \hat{R} و \hat{k}_r به ترتیب تخمین پارامترهای R و k_r می‌باشند. معادله (7) را بازنویسی نمایید:

$$\hat{R}I_a + \hat{k}_r \dot{q} + F = u \quad (9)$$

طبق روابط (7) تا (9)، F بدست می‌آید:

$$F = (R - \hat{R})I_a + LI_a + (k_r - \hat{k}_r)\dot{q} + \varphi \quad (10)$$

در واقع F بیانگر عدم قطعیت سیستم می‌باشد. با توجه به رابطه (10)، این عدم قطعیت شامل اغتشاش خارجی φ ، دینامیک مدل نشده LI_a و عدم قطعیت پارامتری $(R - \hat{R})I_a + (k_r - \hat{k}_r)\dot{q}$ است.

قانون کنترل مقاوم بصورت زیر پیشنهاد می‌شود:

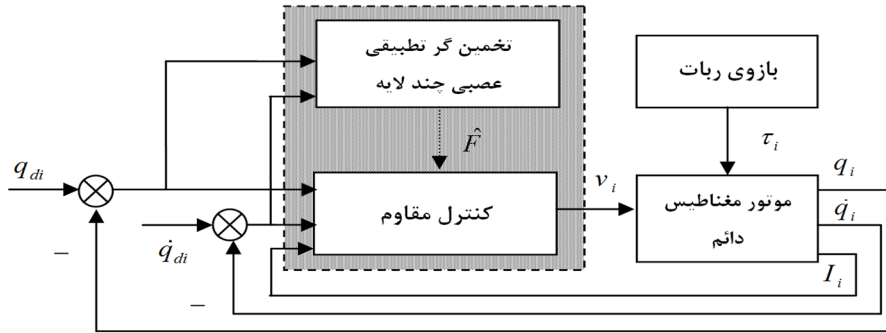
$$v = v_{\max} \text{sat}(u / v_{\max}) \quad (11)$$

که در آن

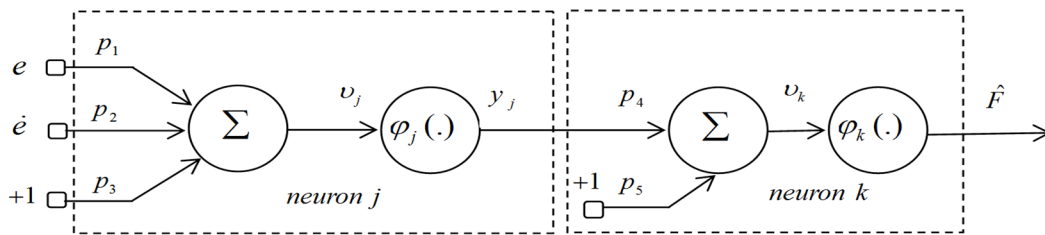
$$\text{sat}(u / v_{\max}) = \begin{cases} 1 & \text{if } u > v_{\max} \\ u / v_{\max} & \text{if } |u| \leq v_{\max} \\ -1 & \text{if } u < -v_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

$$\hat{R}I_a + \hat{k}_r (\dot{q}_d + k_p (q_d - q)) + \hat{F} = v \quad (13)$$

که در این روابط \hat{F} مقدار تخمینی F می‌باشد که در بخش بعد معرفی می‌گردد. q_d مسیر مطلوب مفصل و k_p پارامتر طراحی کنترل می‌باشد. شایان ذکر است که مقدار



شکل 1- بلوک دیاگرام سیستم کنترل



شکل 2- طرح تخمین گر عصبی عدم قطعیت‌ها

$$\Delta p_4 = -\gamma_4 \frac{\partial J}{\partial p_4} \quad (25)$$

که در آن γ_4 پارامتری مثبت می باشد. (25) را می توان بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\Delta p_4 = -\gamma_4 \frac{\partial J}{\partial v_k} \frac{\partial v_k}{\partial p_4} \quad (26)$$

$$= \gamma_4 (F - \hat{F}) \phi'_k y_j$$

با تعریف گرادیان محلی نرون k ام $\delta_k = -\frac{\partial J}{\partial v_k}$ می توان نوشت: $\Delta p_4 = \gamma_4 \delta_k y_j$ ، پس:

$$\delta_k = -\frac{\partial J}{\partial v_k} = (F - \hat{F}) \phi'_k \quad (27)$$

با توجه به روابط (18) و (26) قانون تطبیق برای اصلاح وزن p_4 بصورت زیر پیشنهاد می گردد:

$$\hat{p}_4(t) = \int_0^t \gamma_4 k_r^{-1} (\dot{e} + k_p e) y_j d\tau + \hat{p}_4(0) \quad (28)$$

که در آن مقدار اولیه وزن p_4 می باشد. مطابق روش قبل با تعریف $\Delta p_5 = -\gamma_5 \frac{\partial J}{\partial p_5}$ که در آن γ_5 پارامتری ثابت می باشد. به راحتی می توان اثبات کرد که قانون تطبیق برای وزن p_5 از رابطه زیر بدست می آید:

که در آن y_j ورودی به لایه خروجی شبکه عصبی، p_4 و p_5 وزن های لایه خروجی می باشد. در نهایت، سیگنال خروجی \hat{F} ، از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\hat{F} = \phi_k(v_k) \quad (21)$$

که در آن ϕ_k تابع فعال سازی لایه خروجی تابعی از v_k می باشد. در لایه خروجی از تابع فعال سازی خطی به صورت زیر استفاده شده است:

$$\phi_k = v_k \quad (22)$$

برای تصحیح ضریبهای نرون k ام، از الگوریتم پس انتشار استفاده می کنیم. برای ضریب p_4 داریم:

$$\frac{\partial J}{\partial p_4} = \frac{\partial J}{\partial (F - \hat{F})} \frac{\partial (F - \hat{F})}{\partial \hat{F}} \frac{\partial \hat{F}}{\partial v_k} \frac{\partial v_k}{\partial p_4} \quad (23)$$

با توجه به روابط (19)، (20)، (21) و (22) داریم:

$$\frac{\partial J}{\partial p_4} = -(F - \hat{F}) \phi'_k y_j \quad (24)$$

با توجه به رابطه (21) و (22)، $\phi'_k = \frac{\partial \hat{F}}{\partial v_k} = 1$ می باشد.

تصحیح وزن Δp_4 اعمالی به p_4 را با روش گرادیان نزولی به صورت زیر تعریف می کنیم:

که در آنها γ_1 ، γ_2 و γ_3 نیز پارامترهایی مثبت می باشند. قوانین تطبیق برای اصلاح وزن های p_1 ، p_2 و p_3 بصورت زیر پیشنهاد می گردد:

$$\hat{p}_1(t) = \int_0^t \gamma_1 \delta_j e d\tau + \hat{p}_1(0)$$

$$\hat{p}_2(t) = \int_0^t \gamma_2 \delta_j \dot{e} d\tau + \hat{p}_2(0) \quad (39)$$

که در آن $\hat{p}_1(0)$ ، $\hat{p}_2(0)$ و $\hat{p}_3(0)$ مقادیر اولیه وزن های نرون j ام می باشند. تخمین گر \hat{F} می تواند بر اساس خاصیت تقریب گر عمومی بودن شبکه های عصبی چند لایه [29]، تابع عدم قطعیت F را تخمین بزند. بنابراین داریم:

$$|F - \hat{F}| \leq \rho \quad (40)$$

که در آن ρ یک اسکالر مثبت است.

برای کنترل موقعیت هر مفصل از یک کنترل کننده استفاده شده است. هر کنترل کننده مجهز به یک تخمین گر عصبی سه لایه است که از لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی تشکیل می گردد. به دلیل آن که کنترل کننده از نوع تک خروجی است یک نرون در لایه خروجی بکار می رود. تعداد نرون لایه پنهان از روش اعتبار سنجی متقابل [25] تعیین می گردد که با تعداد نرونهای مختلف از کم به زیاد امتحان می شود. برای مقایسه عملکرد آنها یک معیار عملکرد مانند انتگرال مجذور خطا را تعریف می کنیم. سپس چهار آزمایش به ترتیب با تعداد 1، 5، 11 و 16 نرون واقع در لایه پنهان هر شبکه انجام می شود. برای هر آزمایش معیار عملکرد محاسبه می گردد. در مسئله مورد مطالعه در این مقاله، مشاهده می شود که نتایج چهار آزمایش تقریباً یکسان است. مثلاً معیار عملکرد برای مفصل 1 تقریباً برابر 1.024×10^{-5} در چهار آزمایش است. بنابراین، وجود یک نرون در لایه پنهان کفایت می کند که از کوچک بودن حجم محاسبات نیز برخوردار است.

5- تحلیل پایداری

یافتن تابع لیاپانوف یک چالش اساسی است که از دیرباز تاکنون مسئله تحلیل پایداری نقطه تعادل سیستمهای غیرخطی با روش لیاپانوف با آن روبرو بوده است. زیرا هیچ روش عمومی برای یافتن تابع لیاپانوف وجود ندارد و در این مورد، بررسی پایداری نقطه تعادل سیستمهای غیرخطی با

$$\hat{p}_5(t) = \int_0^t \gamma_3 k_r^{-1} (\dot{e} + k_p e) d\tau + \hat{p}_5(0) \quad (29)$$

با توجه به رابطه (27)، برای تصحیح وزن p_1 متعلق به نرون j ام، گرادیان محلی δ_j را می توان بصورت زیر در نظر گرفت:

$$\delta_j = -\frac{\partial J}{\partial v_j} = -\frac{\partial J}{\partial y_j} \frac{\partial y_j}{\partial v_j} = -\frac{\partial J}{\partial y_j} \phi'_j \quad (30)$$

که در آن ϕ'_j مشتق تابع فعال سازی لایه پنهان بر حسب v_j می باشد. در لایه پنهان شبکه عصبی، از تابع فعال سازی سیگموئید استفاده شده است. داریم:

$$\phi_j(v_j) = \frac{1}{1 + \exp(-v_j)} \quad (31)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\phi'_j(v_j) = \frac{\exp(-v_j)}{[1 + \exp(-v_j)]^2} \quad (32)$$

سیگنال v_j به صورت زیر تعریف می شود:

$$v_j = p_1 e + p_2 \dot{e} + p_3 \quad (33)$$

در رابطه (33)، p_1 ، p_2 و p_3 وزن های لایه پنهان می باشند. برای محاسبه مشتق جزئی $\frac{\partial J}{\partial y_j}$ ، با استفاده از رابطه (19) داریم:

$$\frac{\partial J}{\partial y_j} = (F - \hat{F}) \frac{\partial(F - \hat{F})}{\partial y_j} \quad (34)$$

در ادامه با استفاده از قانون زنجیره ای مشتق، رابطه (34) به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\frac{\partial J}{\partial y_j} = (F - \hat{F}) \frac{\partial(F - \hat{F})}{\partial v_k} \frac{\partial v_k}{\partial y_j} \quad (35)$$

با در نظر گرفتن روابط (20)، (21) و (22)، داریم:

$$\frac{\partial J}{\partial y_j} = -(F - \hat{F}) \phi'_k p_4 = -\delta_k p_4 \quad (36)$$

در نهایت با جایگذاری رابطه (36) در (30)، گرادیان محلی نرون j ام یعنی δ_j ، بصورت زیر توصیف می شود:

$$\delta_j = \phi'_j \delta_k p_4 \quad (37)$$

تصحیح وزن های p_1 ، p_2 و p_3 به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$\Delta p_1 = \gamma_1 \delta_j e$$

$$\Delta p_2 = \gamma_2 \delta_j \dot{e} \quad (38)$$

$$\Delta p_3 = \gamma_3 \delta_j$$

نتیجه 2: موقعیت مفصل q محدود است.

با حاصلضرب دو طرف رابطه (7) در I_a ، معادله انرژی به صورت زیر بدست خواهد آمد [26]:

$$vI_a = RI_a^2 + Li_a \dot{I}_a + k_b r^{-1} \dot{q} I_a + \phi I_a \quad (47)$$

در واقع موتور با دریافت انرژی الکتریکی vI_a ، انرژی مکانیکی $k_b r^{-1} \dot{q} I_a$ را تولید می‌کند. توان RI_a^2 بیان گر اتلاف سیم پیچ‌ها و توان $Li_a \dot{I}_a$ ، تغییرات زمانی انرژی مغناطیسی می‌باشد. با انتگرال‌گیری از دو طرف رابطه (47) برای $t \geq 0$ داریم:

$$\int_0^t (v - \phi) I_a dt = \int_0^t RI_a^2 dt + \int_0^t Li_a \dot{I}_a dt + \int_0^t k_b r^{-1} \dot{q} I_a dt \quad (48)$$

با $I_a(0) = 0$ داریم:

$$\int_0^t (v - \phi) I_a dt = RI_a^2 t + 0.5LI_a^2 + \int_0^t k_b r^{-1} \dot{q} I_a dt \quad (49)$$

با توجه به این که $RI_a^2 t \geq 0$ و $0.5LI_a^2 \geq 0$ ، نتیجه می‌شود:

$$\int_0^t k_b r^{-1} \dot{q} I_a dt \leq \int_0^t (v - \phi) I_a dt \quad (50)$$

در رابطه (50)، عبارت $\int_0^t (v - \phi) I_a dt$ ، حد بالای انرژی مکانیکی $\int_0^t k_b r^{-1} \dot{q} I_a dt$ می‌باشد. بنابراین در حد بالای انرژی مکانیکی می‌توان گفت:

$$\int_0^t k_b r^{-1} \dot{q} I_a dt = \int_0^t (v - \phi) I_a dt \quad (51)$$

یا

$$k_b r^{-1} \dot{q} = v - \phi \quad (52)$$

نتیجه 3: سرعت مفصلی \dot{q} به صورت زیر محدود است:

$$|\dot{q}| \leq (|\phi| + |v|) r / k_b \quad (53)$$

با استفاده از فرضیات 2 و 3 می‌توان گفت:

$$|\dot{q}| \leq (v_{\max} + \phi_{\max}) r / k_b = \dot{q}_{\max} \quad (54)$$

که در آن \dot{q}_{\max} ماکزیمم سرعت موتور می‌باشد.

با استفاده از رابطه (7) داریم:

$$RI_a + Li_a \dot{I}_a = w \quad (55)$$

که در آن

حضور عدم قطعیت دشوارتر است. در این پژوهش با رویکردی جدید، پایداری بررسی شده است. در این بررسی، کراندار بودن متغیرهای حالت q ، \dot{q} و I_a اثبات می‌گردد.

به منظور اثبات پایداری، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

فرض 1: مسیر مطلوب حرکت بازوی ربات q_d هموار است، به این معنی که q_d و مشتقات آن تا مرتبه مورد نیاز در دسترس و همگی محدود باشند.

فرض 2: اغتشاش خارجی محدود است، یعنی $|\phi| \leq \phi_{\max}$.

فرض 3: ولتاژ موتورها محدود است. یعنی $|v| \leq v_{\max}$.

تابع پیشنهادی معین مثبت V را بصورت زیر پیشنهاد می‌دهیم:

$$V = 0.5 e^2 \quad (41)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (41) داریم:

$$\dot{V} = e \dot{e} \quad (42)$$

از رابطه (17) می‌توان نشان داد که

$$\dot{e} = -k_p e + \hat{k}_r (F - \hat{F}) \quad (43)$$

حال با جایگذاری رابطه (43) در (42) نتیجه می‌شود که

$$\dot{V} = -k_p e^2 + \hat{k}_r e (F - \hat{F}) \quad (44)$$

چنانچه $\dot{V} < 0$ باشد، خطای ردگیری کاهش می‌یابد. پس باید

$$F - \hat{F} < k_p \hat{k}_r^{-1} e \quad (45)$$

بنابراین به منظور برقراری رابطه (45)، با استفاده از نامساوی کوشی شوارتز و رابطه (40)، داریم:

$$\rho \hat{k}_r / k_p = \delta_0 < |e| \quad (46)$$

که در آن δ_0 یک ثابت مثبت می‌باشد. بنابراین تا زمانی که $|e| < \delta_0$ باشد، $\dot{V} < 0$ برقرار است. رابطه (46) به این معنی است که خطای ردگیری در خارج از دایره ای به شعاع δ_0 کاهش می‌یابد، تا زمانی که خطای ردگیری وارد دایره می‌شود. در نتیجه خطای ردگیری محدود خواهد ماند. بنابراین می‌توان گفت:

نتیجه 1: خطای ردگیری e محدود می‌ماند و در نهایت وارد دایره ای به شعاع δ_0 می‌شود.

با استفاده از فرض 1، نتیجه 1 و رابطه $e = q_d - q$ ، می‌توان گفت:

جدول 2- پارامترهای دینامیکی ربات

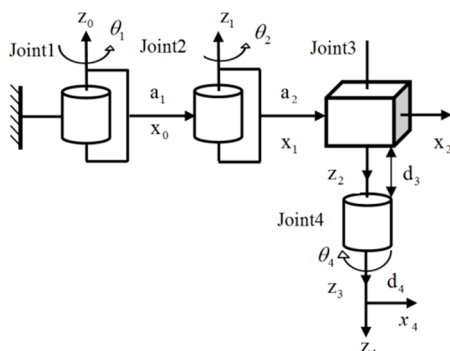
محور 4	محور 3	محور 2	محور 1	
0	0	-0/192	-0/257	$x_i (m)$
0	0	0	0	$y_i (m)$
-0/0244	-0/205	-0/0854	-0/0623	$z_i (m)$
0/321	0/263	37/973	11/94	$m_i (kg)$
0/0001	0/0037	0/2564	0/0297	$I_{xxi} (kgm^2)$
0	0/0037	0/8817	0/1863	$I_{yyi} (kgm^2)$
0/0001	0	0/7373	0/1899	$I_{zzi} (kgm^2)$
0	0	-0/0017	0	$I_{xyi} (kgm^2)$
0	0	0/1015	0/001	$I_{xzi} (kgm^2)$
0	0	-0/0016	0	$I_{yzi} (kgm^2)$

جدول 3- پارامترهای موتور

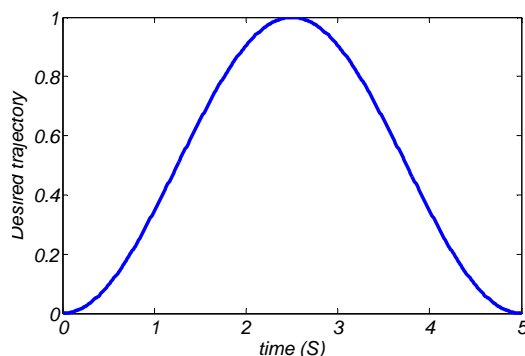
موتور	B	J	L	K_b	R	r
۱،۲،۳،۴	0/001	0/0002	0/001	0/26	1/6	0/01

$$\gamma_1 = \gamma_2 = 20, k_p = 70$$

$$\hat{p}_m(0) = \hat{p}_n(0) = 0 \quad (58)$$



شکل 3- ربات اسکارا



شکل 4- مسیر مطلوب ردگیری

$$w = v - k_b r^{-1} \dot{q} - \phi \quad (56)$$

متغیرهای q, \dot{q} و v به ترتیب طبق نتیجه 3، فرض 2 و فرض 3 محدود هستند. بنابراین ورودی w در رابطه (47) محدود می باشد. معادله دیفرانسیل خطی (55) طبق معیار راوث- هرویتز یک سیستم خطی پایدار است. با توجه به این که ورودی w محدود است، بنابراین خروجی I_a نیز محدود است.

نتیجه 3: جریان I_a محدود است

با توجه به نتایج، موقعیت مفصلی q ، سرعت مفصلی \dot{q} و جریان موتور I_a محدود می باشند. بنابراین حالات سیستم q, \dot{q} و I_a همگی محدود هستند و پایداری سیستم تضمین می شود.

6- نتایج شبیه سازی

طرح پیشنهادی توسط قانون کنترل (13) و قوانین تطبیق (28)، (29) و (39) توصیف شده است و روی ربات اسکارا شبیه سازی می گردد. ربات مورد نظر یک ربات سری با سه مفصل لولایی و یک مفصل کشویی می باشد که در شکل 3 نشان داده شده است. پارامترهای ربات با استفاده از روش دناویت- هارتنبرگ در جدول 1 آمده است که در آن a_i, θ_i, d_i به ترتیب بیان گر طول، انحراف، زاویه و پیچش هستند. پارامترهای دینامیکی ربات و پارامترهای موتور به ترتیب در جدول های 2 و 3 آمده است.

مسیر مطلوب ردگیری برای همه مفاصل در شکل 4 نشان داده شده است. موقعیت مطلوب برای تمامی مفاصل با تابع زیر تعریف شده است:

$$q_d = 0.5(1 - \cos(\pi t / 2.5)) \quad \text{for } 0 \leq t < 5 \quad (57)$$

پارامترهای مورد نیاز در کنترل ردگیری ربات برای همه مفاصل بصورت یکسان و بصورت زیر انتخاب شده اند:

جدول 1- پارامترهای ربات با روش دناویت- هارتنبرگ

محور	$\alpha_i (rad)$	$\theta_i (rad)$	$d_i (m)$	$a_i (m)$
1	0	θ_1	0	0/33
2	π	θ_2	0	0/27
3	0	0	d_3	0
4	0	θ_4	0/061	0

تنظیم نیز در شکل 10 قابل مشاهده است. پارامترها به خوبی به مقدار ثابتی همگرا شده اند. زیرا در پایان ربات متوقف است و به مفصل ولتاژ ثابتی اعمال می شود. در شکل 11 خطای تنظیم مفاصل را نشان می دهد. خطای ماندگار تقریباً صفر می شود و فراجش دیده نمی شود. در پایان زمان شبیه سازی، خطای ردگیری تمامی مفاصل به کمتر از 4×10^{-9} می رسد که نشان دهنده کنترل مناسب سیستم در حالت تنظیم می باشد.

همگرایی وزن‌ها در شبکه عصبی صرفاً در صورت تحقق بهینه سازی توسط روش گرادیان نزولی رخ می دهد. از آنجا که با وجود عدم قطعیت بهینه سازی محقق نمی گردد همگرایی وزن‌ها نیز شکل نمی گیرد. از سوی دیگر، طرح پیشنهادی از نوع کنترل تطبیقی است. در کنترل تطبیقی نیز برای حالت ردگیری تحت شرایط خاصی که سیگنال تحریک به اندازه کافی غنی باشد یعنی حاوی فرکانس‌های مختلف باشد صرفاً همگرایی پارامترها رخ می دهد. در حالی که شرط مذکور در این مسئله کنترل تطبیقی برای حالت ردگیری برقرار نیست. شکل 7 نشان می دهد که همگرایی وزن‌ها برای ردگیری برقرار نشده است. در مقایسه، مسئله همگرایی وزن‌ها در حالت نقطه تنظیم متفاوت با حالت ردگیری است. قابل توجه آنکه شکل 10 نشان می دهد که در حالت نقطه تنظیم بدون حضور اغتشاش خارجی در همسایگی نقطه مطلوب همگرایی وزن‌ها رخ داده است. می توان گفت که کنترل پیشنهادی دارای عملکرد ردگیری و تنظیم مناسبی است. این روش در مقابله با عدم قطعیت‌ها مقاوم است. با این مزیت که سیستم کنترل پیشنهادی، به مدل دینامیکی بازوی ماهر ربات نیز وابسته نمی باشد.

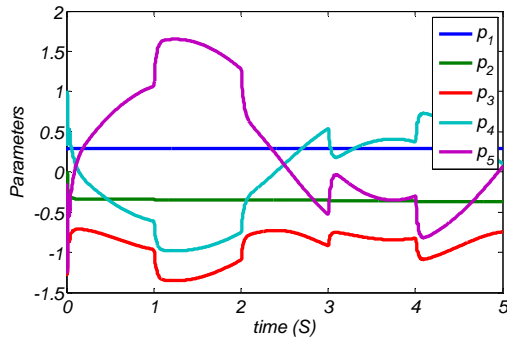
مقایسه: روش کنترل پیشنهادی در این مقاله (NNC) با روش کنترل فازی تطبیقی (AFC) در مرجع [24] مقایسه شده است. هر دو روش مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ بوده و برای ربات بدون انعطاف و با حضور عدم قطعیت مطرح شده اند. با این تفاوت که مرجع [24] برای جبران عدم قطعیت از سیستم فازی استفاده کرده است و روش شبه لیاپانوف را برای تنظیم پارامترهای سیستم کنترل بکار برده است. در حالی که در این مقاله از شبکه عصبی برای جبران عدم قطعیت استفاده شده است و تطبیق پارامترها با روش گرادیان نزولی انجام شده است. روش کنترل فازی تطبیقی

برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های پارامتری، \hat{R} و \hat{k}_r 90 درصد مقادیر واقعی شان در نظر گرفته شده اند. زمان اجرای شبیه سازی 5 ثانیه انتخاب شده است. خطای اولیه برای مفاصل اول، دوم و چهارم 0.02 رادیان و برای مفصل سوم 0.02 متر در نظر گرفته شده است. اغتشاش خارجی توسط یک تابع تولید پالس با پریود زمانی 2 ثانیه، تاخیر 1 ثانیه، دامنه 1 و پهنای پالس 1 ثانیه به سیستم کنترل اعمال می شود. بدین ترتیب، می توان تاثیر عدم قطعیت‌ها بر سیستم کنترل را بررسی نمود.

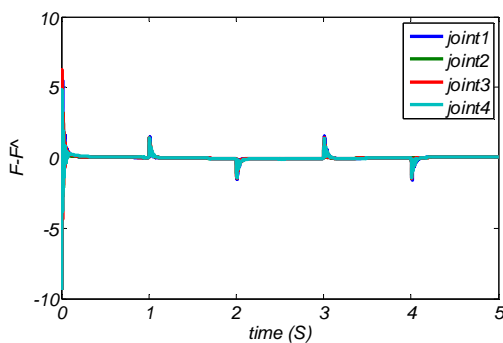
در شکل 5 خطای ردگیری سیستم کنترل در حضور اغتشاش خارجی نشان داده شده است. خطای ردگیری تمامی مفاصل بدون فراجش در نهایت در انتهای 5 ثانیه به کمتر از 5.7×10^{-5} می رسد. واحد خطای موقعیت برای مفاصل لولایی رادیان و برای مفصل کشویی، متر است. شکل 6 سیگنال کنترل ولتاژ موتورهای هر مفصل را نشان می دهد. ولتاژ موتورها نرم و در محدوده مجاز است. افزایش ولتاژ موتورها در لحظه ابتدایی به دلیل خطای اولیه مفاصل می باشد. ولتاژ موتور سوم به دلیل غلبه بر نیروی گرانشی در انتهای مسیر صفر نمی باشد.

شکل 7 تطبیق پارامترها را برای مفصل اول نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود تمامی قوانین در فرایند تطبیق شرکت دارند. شکل 8 عملکرد تخمین عدم قطعیت را برای همه مفاصل نشان می دهد. برای مفصل سوم، ماکزیمم فراجش خطای تخمین عدم قطعیت‌ها $5.77 V$ و در نهایت مقدار آن به کمتر از $0.042 V$ می رسد. نتایج شبیه سازی کارایی موثر روش کنترلی پیشنهادی را نشان می دهد.

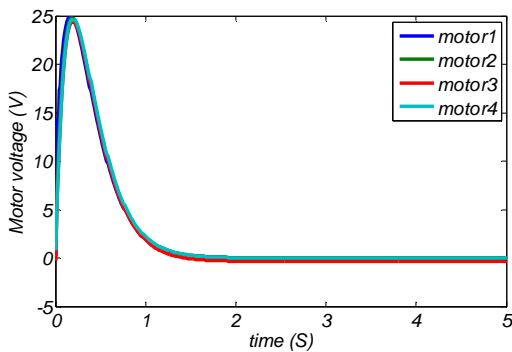
در ادامه عملکرد تنظیم نقطه روش کنترلی بدون حضور اغتشاش خارجی نیز بررسی شده است. موقعیت مطلوب مفاصل بر روی 0.5 rad تنظیم شده اند. طراحی کنترل کننده مشابه حالت کنترل ردگیری می باشد. سیگنال‌های کنترل ولتاژ موتورها در حالت تنظیم در شکل 9 نشان داده شده اند. نمودار ولتاژ موتورها مناسب و قابل قبول می باشد. به دلیل وجود خطای اولیه مفاصل، سیگنال‌های کنترل در آغاز بزرگ هستند. ولتاژ موتور مفصل 3 برای غلبه بر نیروی گرانشی دارای مقدار است. اما در مقابل ولتاژ سایر موتورها در پایان تقریباً صفر است، زیرا باری روی آن‌ها نیست. همگرایی پارامترهای تخمین گر عصبی مربوط به مفصل اول در حالت



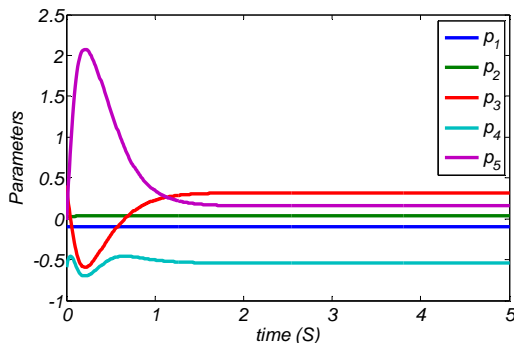
شکل 7- تطبیق تخمین گر عصبی در ردگیری



شکل 8- عملکرد تخمین عدم قطعیت در ردگیری



شکل 9- ولتاژ موتورها در تنظیم

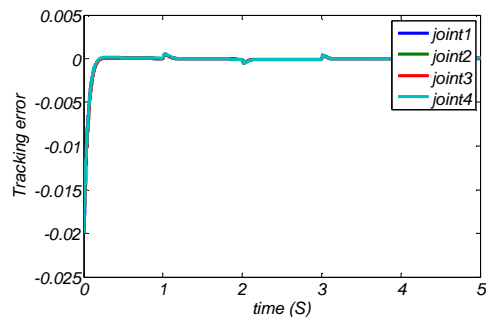


شکل 10- تطبیق تخمین گر عصبی در حالت تنظیم

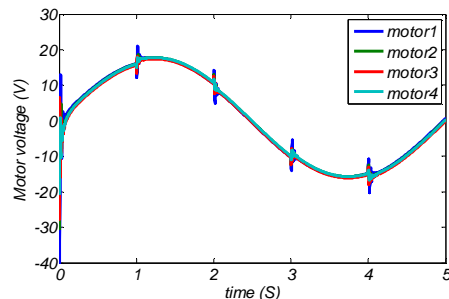
همانند کنترل پیشنهادی به صورت کنترل جداگانه هر مفصل طراحی شده و خطای اولیه مفاصل و اغتشاش خارجی همانند شبیه سازی اول در نظر گرفته شده است. برای داشتن تصاویر واضح و پرهیز از تعداد زیاد شکلها، نتایج برای مفصل اول ربات نشان داده شده اند.

در شکل 12 مقایسه عملکرد ردگیری نشان داده شده است. مطابق شکل، کنترل پیشنهادی از عملکرد بهتری در رابطه با کاهش خطای ردگیری و جبران اغتشاش خارجی برخوردار هستند. نمودار ولتاژ موتورها یا تلاشهای کنترلی در شکل 13 نشان داده شده است. سیگنال کنترل در پاسخ به اغتشاش خارجی در روش کنترل پیشنهادی سریعتر از روش کنترل فازی تطبیقی عمل کرده است. برای هر دو روش سیگنالهای کنترل در محدوده مجاز هستند.

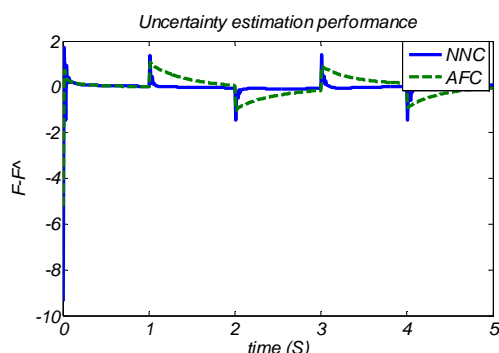
در شکل 14 عملکرد تخمین عدم قطعیت توسط کنترل پیشنهادی و کنترل فازی تطبیقی مقایسه شده اند. همانطور که مشاهده می شود در مقابله با اغتشاش خارجی، تخمین گر پیشنهادی سریع تر و موثرتر از روش فازی تطبیقی عمل می کند و خطای تخمین کوچکتر است. نهایتاً در شکل 15 عملکرد تنظیم مقایسه شده است.



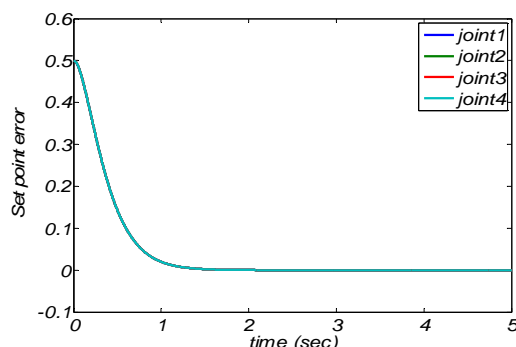
شکل 5- عملکرد ردگیری



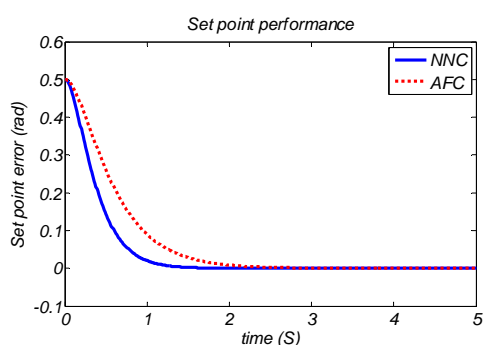
شکل 6- ولتاژ موتورها در ردگیری



شکل 14- مقایسه عملکرد تخمین عدم قطعیت



شکل 11- عملکرد تنظیم نقطه

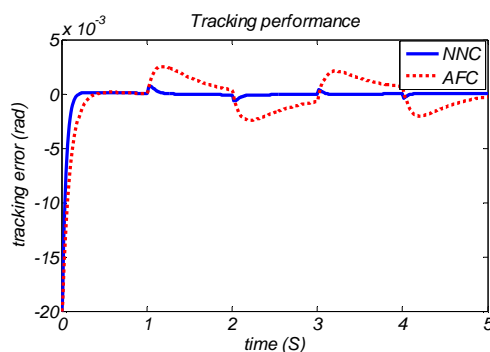


شکل 15- مقایسه عملکرد تنظیم نقطه

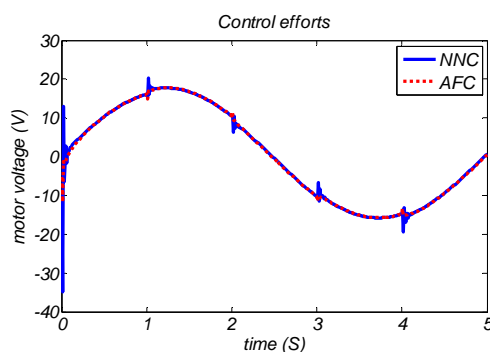
7- نتیجه گیری

در این مقاله، روشی نوین برای کنترل مقاوم بازوی ماهر ربات با راهبرد کنترل ولتاژ پیشنهاد شده است. کنترل مقاوم پیشنهادی با بهره‌گیری از تخمین گر عصبی سه لایه، تخمین و جبران عدم قطعیت‌ها را بر عهده دارد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، عملکرد تخمین گر تطبیقی در ردگیری، نقطه تنظیم و تخمین عدم قطعیت مناسب می‌باشد و نسبت به روش ارائه شده در مرجع [24] برتری دارد. سادگی و پیاده‌سازی تخمین گر پیشنهادی که تابعی از خطای موقعیت مفصل و مشتق زمانی آن می‌باشد، یکی از مزایای مهم برای سیستم کنترل مقاوم برای مواجهه با عدم قطعیت‌ها می‌باشد. سیستم تخمین گر عصبی تنها با داشتن دو متغیر ورودی و تطبیق پنج پارامتر برای هر مفصل بسیار ساده و با محاسبات کم است. بعلاوه، در طراحی روش کنترلی پیشنهادی نیازی به دانستن حدود عدم قطعیت‌ها یا تشکیل توابع محدودیت نمی‌باشد و لرزش سیگنال کنترل نیز رخ نمی‌دهد. مزیت کنترل پیشنهادی آن است که مستقل از مدل دینامیکی ربات است. نتایج نشان داده‌اند که روش

مشابه با نتایج ردگیری، کنترل پیشنهادی از عملکرد بهتری برخوردار است. اگرچه شبکه عصبی و سیستم فازی ساختارهای متفاوتی دارند ولی می‌توان با هر دو یک تابع ریاضی را توصیف نمود. علت اصلی تفاوت عملکرد این دو روش بخاطر موثرتر بودن روش گرادینان نزولی نسبت به روش شبه لیاپانوف در تنظیم پارامترهای سیستم کنترل به منظور کاهش خطای موقعیت است.



شکل 12- مقایسه عملکرد ردگیری



شکل 13- مقایسه سیگنال‌های کنترل

- [13] Lim CM, Hiyama T (1991) Application of fuzzy logic control to a manipulator. *IEEE Trans. Robot. Autom* 1(5): 688–691.
- [14] Hwang JP, Kim E (2006) Robust tracking control of an electrically driven robot: adaptive fuzzy logic approach. *IEEE Trans. Fuzzy Syst* 14(2): 232–247.
- [15] Kim E (2004) Output feedback tracking control of robot manipulator with model uncertainty via adaptive fuzzy logic. *IEEE Trans. Fuzzy Syst* 12(3): 368–376.
- [16] Chen FC, Khalil HK (1992) Adaptive control of nonlinear systems using neural networks *Int. J. Contr* 55(6): 1299–1317.
- [17] Kwan C, Lewis FL, Dawson D (1998) Robust neural-network control of rigid-link electrically driven robots. *IEEE Transactions on Neural Networks* 9(4): 581–588.
- [18] Huang SN, Tan KK, Lee TH (2008) Adaptive neural network algorithm for control design of rigid-link electrically driven robots, *Neurocomputing* 71(4-6): 885–894.
- [19] Sun T, Pei H, Pan Y, Zhou H, Zhang C (2011) Neural network-based sliding mode adaptive control for robot manipulators. *Neurocomputing* 74(14-15): 2377–2384.
- [20] Wai RJ, Chen PC (2006) Robust Neural-Fuzzy-Network Control for Robot Manipulator Including Actuator Dynamics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 53(4).
- [21] Malis E, Chaumette F (2002) Theoretical improvements in the stability analysis of a new class of model-free visual servoing methods. *IEEE Transactions on robotics and automation* 18(2): 176–186.
- [22] Spong MW, Hutchinson S, Vidyasagar M (2006) *Robot Modelling and Control*. Wiley, Hoboken.
- [23] Fateh MM (2008) On the Voltage-Based Control of Robot Manipulators. *International Journal of Control, Automation and Systems* 6(5): 702–712.
- [24] Fateh MM, Khorashadizadeh S (2012) Robust control of electrically driven robots by adaptive fuzzy estimation of uncertainty. *Nonlinear Dynamics* 69: 1465–1477.
- [25] Anders U, and Korn O (1999) Model selection in neural networks. *Neural Networks* 12(2): 309–323.
- [26] Fateh MM (2011) Robust control of flexible-joint robots using voltage control strategy. *Nonlinear Dynamics* 66(4): 2539–2549.

گرادیان نزولی در تنظیم پارامترهای سیستم کنترل موفق بوده است.

مراجع

- [1] Kelly R, Santibanez V, Loria A (2005) *Control of robot manipulators in joint space*. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer Press.
- [2] Luh JYS (1983) Conventional controller design for industrial robots. A tutorial. *IEEE Trans. Systems Man Cybernet* 13: 298–316.
- [3] Freund E (1982) Fast nonlinear control with arbitrary pole-placement for industrial robots and manipulators. *Internat. J. Robotics Res.* 1: 65–78
- [4] Craig JJ, Hsu P, Sastry SS (1987) Adaptive control of mechanical manipulators. *Internat. J. Robotics Res* 6(2): 10–20.
- [5] Rohrs CE, Valavani LS, Athans M, Stein G (1985) Robustness of continuous time adaptive control algorithms in the presence of unmodeled dynamics. *IEEE Transactions. Automatic Control* 30(9): 881–889.
- [6] Abdallah C, Dawson D, Dorato P, Jamshidi M (1991) Survey of robust control for rigid robots. *IEEE Control Systems*: 24–30.
- [7] Cai L, Song G (1994) Joint stick-slip friction compensation of robot manipulators by using smooth robust controllers. *Journal of Robotic Systems* 11(6): 451–470.
- [8] Fateh MM (2010) Proper uncertainty bound parameter to robust control of electrical manipulators using nominal model. *Nonlinear Dynamics* 61(4): 655–666.
- [9] Slotine JJE, Sastry SS (1983) Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces, with application to robot manipulator. *Internat. J. Control* 38: 465–492.
- [10] Chang FJ, Twu SH, Chang S (1990) Adaptive chattering alleviation of variable structure systems control. *Proc. IEE. Pt. D* 137: 31–39.
- [11] Baicu C, Rahn C, Dawson D (1998) Backstepping Boundary Control of Flexible Link Electrically Driven Gantry Robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 3(1): 60–66.
- [12] Wang LX (1996) *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Prentice Hall, New York.