

هوشمند سازی در کنترل فازی بازوهای مکانیکی ماهر صلب-انعطاف پذیر با کمک شبکه عصبی بازگشتی پویا

سید محمد رضا فریطوس

هادی همایی*

شهرام هادیان جزی

دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

این مقاله به هوشمند سازی در کنترل فازی بازوهای مکانیکی ماهر با پایه ثابت و رابط نهایی انعطاف پذیر خواهد پرداخت. پنجه روی مسیری که از قبل مشخص شده، حرکت میکند و فرض بر اینست که دینامیک سیستم ناشناخته و متغیر می باشد. در کنترل بر اساس منطق فازی، توابع عضویت در ابتدای مسیر انتخاب شده و تا انتهای حرکت، ثابت و بدون تغییر باقی می ماند. این تحقیق جهت بهبود پاسخ سیستم، با کمک شبکه عصبی به اصلاح توابع عضویت در حین حرکت خواهد پرداخت. جهت تسریع در بروز رسانی توابع عضویت، از شبکه عصبی بازگشتی پویا استفاده شده است. معادلات پارامتری بروز رسانی وزنه های شبکه بر اساس کاهش خطا، نرخ خطای زاویه مفاصل و تغییر شکل خمشی بدست می آیند. جهت تصدیق و کارآمدی روش ارایه شده، شبیه سازی برای بازوی مکانیکی با سه رابط انجام شده است. پاسخهای سیستم برای کنترل کننده فازی و کنترل کننده پیشنهادی با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین جهت اثبات مقاوم بودن سیستم کنترل، مثالی ارایه خواهد شد. نتایج و بررسی های صورت گرفته، کارآمدی روش ارایه شده را نشان می دهند.

واژه های کلیدی: بازوی مکانیکی انعطاف پذیر، کنترل کننده فازی، شبکه عصبی بازگشتی پویا.

Intelligence in Fuzzy Control of Rigid-Flexible Manipulator using Dynamic Recurrent Neural Network

S. M. R. Faritus

H. Homaei

Sh. Hadian Jazi

Faculty of technology and engineering, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

Faculty of technology and engineering, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

Faculty of technology and engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

This article deals with intelligence in fuzzy control of manipulators with fixed base and the last flexible arm. The tip is moving on a path which is pre-specified. It is assumed that the dynamics of the system is unknown and variable. In control based on fuzzy logic, membership functions remain unchanged in the beginning of selected path to the end. This research deals with modifying membership functions during movement in order to improve system response by using neural network. Dynamic recurrent neural network is used to accelerate updating membership functions. Parametric equations of updating network weights are obtained based on reduction of joint angle errors, rate of joint angle errors and bending deformation. To verify the effectiveness of the proposed method, simulation for manipulator is made with three arms. System responses are compared in both the fuzzy controller and the proposed controller with each other. In order to prove the robustness of the control system, an example will be presented. The obtained results and surveys show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Flexible manipulator, Fuzzy logic controller, Dynamic recurrent neural network.

۱- مقدمه

سرعت پاسخ و افزایش ظرفیت حمل بار دینامیکی، چالشی است که نظر بسیاری از محققان را به خود معطوف کرده است [۲]. کنترل بازوهای مکانیکی انعطاف پذیر به دو حوزه طراحی کنترل کننده و کاهش ارتعاش (که با استفاده از طراحی مسیر و یا عملکرد صورت می گیرد)، تقسیم می شود [۳،۴]. در این نوع ربات ها، دستیابی به عملکرد بالا توسط کنترل کننده های سنتی، نیاز به یک مدل دقیق دینامیکی دارد. استخراج معادلات دینامیکی بازوهای مکانیکی انعطاف پذیر از لحاظ محاسباتی بسیار پیچیده هستند، ضمن اینکه با صرف محاسبات طولانی و زمان گیر از دقت لازم در مدل سازی برخوردار نیستند [۵]. از روش های کنترل سنتی معمول می توان به کنترل معکوس^۱، مقاوم و

بکارگیری مواد سخت و قطعات حجیم در بازوهای مکانیکی ماهر سبب کاهش ارتعاش و افزایش دقت حرکت پنجه می شود ولی در عین حال مصرف انرژی و هزینه های ساخت را افزایش می دهد. استفاده از رابط های سبک ضمن کاهش مصرف انرژی، سرعت و ایمنی عملیات را بالا می برد. از دیگر مزایای آن می توان به استفاده از عملگرهای کوچکتر، مانور بهتر و حمل و نقل آسان تر اشاره نمود. با باریک و سبک شدن رابط ها، مساله انعطاف پذیری مطرح می گردد. در این شرایط به علت ارتعاش اعضای انعطاف پذیر، کنترل نقطه انتهایی مشکل است. این ارتعاش وقتی بازوی مکانیکی به نقطه هدف می رسد، باقی مانده و در نتیجه در سیستم ارتعاش پسماند خواهیم داشت [۱]. در بازوهای مکانیکی انعطاف پذیر، کاهش ارتعاش بدون از دست دادن

¹ Inversion Method

مود لغزشی^۱ اشاره نمود [۸-۶]. مدل ابعادی ربات های انعطاف پذیر به علت طبیعت غیر خطی آنها، نامحدود است. همچنین غیر کمینه فاز بودن^۲ چنین سیستم هایی، شرایط کم عملگر^۳ را ایجاد می نماید. وجود خطاهای تخمین، دینامیک متغیر دستگاه و اشباع عملگر، وجود غیر خطی های زیاد و بعضا نامشخص از دیگر مشکلاتی است که باعث می شود کنترل کننده های سنتی که عموماً بر اساس مدل هستند، نتوانند دو هدف کاهش نوسانات ارتعاشی و سرعت عملیات را هم زمان برآورده نمایند[۹].

کنترل بر اساس منطق فازی یا FLC^۴ یکی از روش های هوشمند است که از مزایای مهم آن می توان به قابلیت استفاده از دانش فرد خبره و مقاومت مناسب آن به علت عدم حساسیت به تغییرات محیطی اشاره کرد[۱۰]. اگر چه روش های کنترل فازی به مدل دقیق دینامیکی احتیاجی ندارند ولی به مدلی ریاضی جهت پیش بینی پاسخ سیستم برای استخراج قواعد فازی نیازمند هستند[۱۱]. استفاده از منطق فازی در کنترل ربات ها از دهه ۸۰ میلادی آغاز و در دهه های بعدی با سرعت زیادی خصوصاً در بازوهای مکانیکی انعطاف پذیر به کار گرفته شدند. یکی از مشکلات کنترل کننده های فازی اینست که طراحی آنها به صورت سیستماتیک سخت بوده و معمولاً قوانین و توابع عضویت پس از انتخاب اصلاح نمی شوند[۱۲].

تیان و کالینز از طرح فازی-عصبی شامل یک کنترل کننده فازی و دو شبکه عصبی، استفاده کردند[۱۳]. یکی از شبکه ها بعنوان قسمت تشخیص دهنده^۵ و پیش بینی خروجی و دیگری برای تنظیم ضرایب کنترل کننده فازی، بکار گرفته شدند. آنها کنترل کننده پیشنهادی خود را با استفاده از آزمایش مورد صحت سنجی قرار دادند. مزا و همکاران نوعی از کنترل کننده PID را پیشنهاد دادند که ضرایب بهره آن با یک سیستم فازی تنظیم می شد. آنها کنترل کننده پیشنهادی را بر روی رباتی با دو درجه آزادی مورد آزمایش قرار دادند[۱۴]. میرشکاران و همکاران کنترل کننده مود لغزشی نوع PID را برای کاهش ارتعاشات پنجه در ربات های انعطاف پذیر بکار گرفتند[۱۵]. آنها به کمک منطق فازی، موفق به تنظیم بهره های قسمت PID شدند. ملیکارجونایا و ردی از نوعی کنترل کننده فازی-عصبی که شامل دو زیر سیستم بود، بهره گرفتند. یکی از زیر سیستم ها موقعیت مطلوب و دیگری ارتعاش را کنترل می کرد[۱۶]. عبدالحی و همکاران، دو کنترل کننده، یکی با تکنیک جابدهی قطب (بر اساس مدل) و دیگری بر پایه منطق فازی طراحی نمودند. سپس نتایج تعقیب مسیر و ارتعاش حاصل از شبیه سازی را بین دو کنترل کننده مورد مقایسه قرار دادند[۱۷]. سهامی جو و همکاران از نوعی PID که به کنترل کننده فازی شبیه بود، استفاده کردند. در این روش، کنترل کننده سه ورودی P ، D و I دارد که هر یک از این ورودی ها از N متغیر زبانی (برای توصیف رفتارشان) بهره می برند. آنها به کمک شبیه سازی، نتایج روش خود را با کنترل کننده PID مقایسه نمودند [۱۸].

در بخش بعدی روش به کار رفته و نوآوری های این تحقیق شرح داده خواهد شد. در بخش ۳ با استفاده از انرژی سیستم و به کمک معادلات لاگرانژ و روش مود فرضی^۶، معادلات حرکت دینامیکی بازوی مکانیکی صلب-انعطاف پذیر استخراج می گردد. بخش ۴ به کنترل کننده فازی اختصاص داده شده است. بخش ۵ هوشمند کردن توابع عضویت به کمک شبکه DRNN ارایه گردیده است. فصل ۶ به شبیه سازی اختصاص دارد. در این بخش پاسخ سیستم به کنترل کننده فازی و کنترل کننده پیشنهادی مورد مقایسه قرار گرفته اند. در همین بخش برای بررسی مقاوم بودن سیستم کنترل، مثالی ارایه شده است. بخش ۷ به نتیجه گیری اختصاص داده شده است.

۲- روش

اکثر مقالات برای هوشمند سازی کنترل کننده های فازی نوع PD و PID، به تنظیم بهره های P ، D و یا I با استفاده از روش هایی مثل شبکه عصبی یا الگوریتم های تکاملی پرداخته اند [۱۳-۱۶] و هوشمند سازی واحد های فازی ساز و غیر فازی ساز مورد توجه جدی قرار نگرفته است. در این مقاله به هوشمند کردن توابع عضویت در بخشهای مذکور پرداخته می شود. با کوچک شدن مقادیر خطا، نرخ خطا و تغییر شکل خمشی، عملکرد توابع عضویت اولیه کاهش می یابد. لذا لزوم استفاده از توابع عضویتی که با تغییر ورودی بطور خودکار بروز رسانی شوند، ضروری به نظر می رسد. جهت نیل به این هدف، هر یک از توابع عضویت بصورت تابعی از یک پارامتر مولد منحصر به فرد در نظر گرفته می شود. در این شرایط، توابع عضویت و رفتار آنها به انتخاب و طراحی این پارامتر بستگی دارد. در این تحقیق، از شبکه عصبی به عنوان ابزاری جهت هوشمند سازی کنترل کننده فازی استفاده شده است. با توجه به حضور عنصر حافظه دار در شبکه عصبی دینامیکی پویا و بهبود سرعت همگرایی در آن، در این مقاله از این نوع شبکه استفاده خواهد شد. تابع هدف شبکه، تابعی از خطا، نرخ خطا و تغییر شکل الاستیک می باشد. از سه شبکه در نظر گرفته شده، دو شبکه برای توابع عضویت خطا و تغییر خطا (در قسمت فازی ساز) و یک شبکه در تابع عضویت گشتاور فرمان (در قسمت غیر فازی ساز) بکار گرفته می شوند. همچنین خطا و تغییر خطای زاویه ای مفاصل، ورودی شبکه ها هستند. الگوریتم یادگیری تطبیقی به کمک قانون دلتای توسعه یافته، انجام می گیرد[۱۹]. در این نوع الگوریتم، بردارهای وزن و بایاس در جهت منفی گرادیان تابع هدف و برای کمینه کردن آن بروز رسانی می گردند.

۳- معادلات حاکم

شکل ۱ بازوی مکانیکی شامل N رابط را که رابط انتهایی آن انعطاف پذیر است، نشان می دهد. M_i ، τ_i و θ_i به ترتیب هاب، گشتاور هاب و زاویه نسبی مفصل رابط i ام هستند. XOY چهارچوب مختصات اینرسیال و $x_i O_i y_i$ ، چهارچوب های مختصاتی متحرک هستند که مرکز آنها هاب رابط i ام است. به علت حضور عضو انعطاف پذیر در دستگاه، ابعاد سیستم نا محدود است. یکی از روش های

¹ Sliding Mode Control

² non-minimum phase

³ under-actuated

⁴ Fuzzy Logic Controller

⁵ identifier

⁶ Assumed Modes Method

هستند. همچنین بردار مکان بار و $\mathbf{R}_i$ بردار مکان نقطه ای عمومی روی رابط انعطاف پذیر می باشد. ρ_i و A_i نیز بترتیب چگالی و سطح مقطع رابط i ام هستند.

انرژی پتانسیل بازوی مکانیکی از مجموع انرژی پتانسیل گرانشی و انرژی حاصل از تغییر شکل الاستیک در رابط انعطاف پذیر حاصل می گردد. لذا انرژی پتانسیل را می توان به صورت ذیل محاسبه نمود:

$$Q = \frac{1}{2} E_N I_N \int_0^N \left[\frac{\partial^2 \delta(s, t)}{\partial s^2} \right]^2 ds + \sum_{i=1}^N \int_0^{l_i} \rho_i A_i y_i g dx_i \quad (6)$$

که g شتاب ثقل است. با جایگذاری رابطه (۱) در (۶) مقدار انرژی پتانسیل محاسبه می گردد. کار مجازی گشتاور τ_i برابر است با $\delta W_i = \tau_i \delta \theta_i$ و لذا می توان معادلات حرکت را با استفاده از روش لاگرانژ بدست آورد:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad ; i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi_j} = 0 \quad ; j = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

که $L = T - Q$ لاگرانژین و θ_i و ϕ_j مختصات تعمیم یافته هستند. با محاسبه مشتق لاگرانژی نسبت به مختصات تعمیم یافته و مشتقات زمانی آنها و جایگذاری در روابط (۷) و (۸)، معادلات حرکت استخراج می شوند. با مرتب کردن معادلات به شکل ماتریسی، $n = N + M$ معادله دینامیکی بازوی مکانیکی به صورت ذیل استخراج می شود:

$$\begin{bmatrix} C_{\theta\theta}(\theta, \phi) & C_{\theta\phi}(\theta, \phi) \\ C_{\phi\theta}^T(\theta, \phi) & C_{\phi\phi}(\theta, \phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + G(\theta, \phi, \dot{\theta}, \dot{\phi}) = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$G = D(\theta, \phi) \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + K(\theta, \phi) \begin{bmatrix} \theta \\ \phi \end{bmatrix} + F(\theta, \phi, \dot{\theta}, \dot{\phi}) \quad (10)$$

ماتریس اینرسی $C \in \mathbb{R}^{n \times n}$ متقارن بوده و شامل ماتریس های $C_{\theta\theta} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ، $C_{\theta\phi} \in \mathbb{R}^{N \times M}$ و $C_{\phi\phi} \in \mathbb{R}^{M \times M}$ است. $D \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ماتریس میرایی، $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ماتریس سختی و $F \in \mathbb{R}^n$ بردار مجموع نیروهای غیر خطی مثل کریولیس، جاذبه و گریز از مرکز هستند. $\dot{\theta}, \dot{\phi}, \theta \in \mathbb{R}^N$ بترتیب بردارهای مکان، سرعت و شتاب زاویه ای مفاصل و $\tau \in \mathbb{R}^N$ بردار گشتاور موتورها می باشند. علامت T بعنوان اندیس بالا، نشانه ماتریس ترانپوز است.

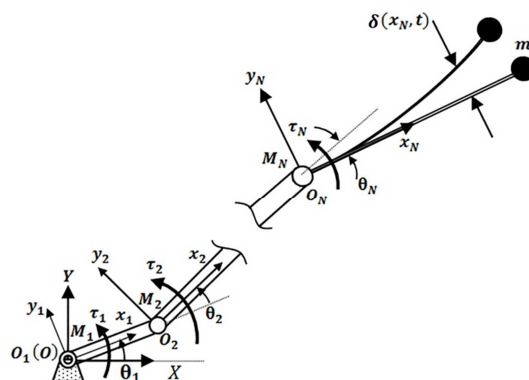
۴- کنترل کننده فازی

در یک تعریف کلی، FLC شامل مجموعه ای از عبارات شرطی زبانی است که توسط فرد خبره در ارتباط با سیستم کنترل بیان می شود. شکل ۲ طرحواره کنترل کننده فازی را نشان می دهد. FLC از چهار قسمت فازی ساز، دانش پایه، استنتاج و غیر فازی ساز تشکیل می شود. با توجه به طبیعت غیر فازی (معین) ورودی ها، در ابتدا باید هر ورودی فازی سازی گردد. برای این کار باید متغیرهای فازی در شکل عددی بیان شوند. لذا به هر متغیر، یک تابع عضویت تخصیص داده می شود. محدوده این تابع از صفر تا یک بوده و می تواند به

مناسب جهت گسسته سازی، روش مود فرضی است. در این تحقیق از روش مود فرضی جهت تخمین تغییر شکل الاستیک تیر استفاده شده است. در این روش، تغییر شکل خمشی تیر بصورت ترکیب خطی حاصل ضرب توابع مودی و توابع زمانی در نظر گرفته می شود:

$$\delta(x_N, t) = \sum_{j=1}^M \psi_j(x_N) \phi_j(t) \quad (1)$$

$\delta(x_N, t)$ تغییر شکل خمشی تیر انعطاف پذیر در فاصله x_N از مفصل N ام در دستگاه مختصاتی $x_N O_N y_N$ و لحظه t است. ψ_j توابع مودی، ϕ_j توابع تعمیم یافته وابسته-زمانی و M تعداد مودهای ارتعاشی هستند. در مرجع [۲۰] طریقه محاسبه توابع مودی و فرکانس های طبیعی تیر انعطاف پذیر ارایه شده است.



شکل ۱- بازوی مکانیکی با رابط انتهایی انعطاف پذیر

توابع مودی برای رابط انعطاف پذیر بصورت ذیل تعیین می شوند:

$$\phi_j(x_N) = (\cos \beta_j x_N - \cosh \beta_j x_N) - \frac{\cos \beta_j l_N + \cosh \beta_j l_N}{\sin \beta_j l_N + \sinh \beta_j l_N} (\sin \beta_j x_N - \sinh \beta_j x_N) \quad (2)$$

l_N طول رابط انعطاف پذیر است. مقادیر β_j از حل معادله ذیل حاصل می گردند:

$$1 + \cos \beta_j l_N \cosh \beta_j l_N - \frac{m}{m_N} \beta_j l_N \times (\sinh \beta_j l_N \cos \beta_j l_N - \sin \beta_j l_N \cosh \beta_j l_N) = 0 \quad (3)$$

که m و m_N بترتیب جرم بار و جرم رابط انعطاف پذیر است. فرکانس طبیعی تیر انعطاف پذیر از رابطه (۴) بدست می آید:

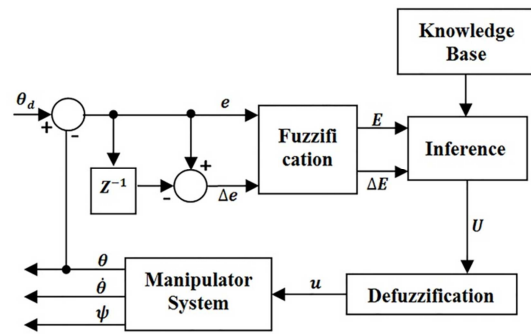
$$\sigma_j = \beta_j^2 \sqrt{\frac{E_N I_N}{\rho_N A_N}} \quad (4)$$

E_N ، I_N ، A_N و ρ_N بترتیب چگالی، سطح مقطع، ممان اینرسی و مدول یانگ رابط N ام هستند. σ_j ها نیز فرکانس های طبیعی تیر می باشند. انرژی جنبشی بازوی مکانیکی، برابر با مجموع انرژی جنبشی رابط ها، موتورها و بار است. لذا داریم:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \int_0^{l_i} \rho_i A_i \dot{\mathbf{R}}_i^T \dot{\mathbf{R}}_i dx_i + \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{R}}_m^T \dot{\mathbf{R}}_m + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (m_{M,i} \dot{\mathbf{R}}_{M,i}^T \dot{\mathbf{R}}_{M,i} + I_{M,i} \omega_{M,i}^2) \quad (5)$$

$\mathbf{R}_{M,i}$ و $\omega_{M,i}$ بترتیب بردارهای مکان و سرعت زاویه ای مرکز موتورهای مفصل رابط i ام و $m_{M,i}$ و $I_{M,i}$ جرم و ممان اینرسی آنها

صورت پیوسته یا گسسته مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۲- نمودار کنترل کننده فازی

برای فازی سازی با تابع عضویت پیوسته، معمولاً از دو نوع تابع عضویت مثلثی یا توانی استفاده می شود. خطا و تغییر خطای زاویه ای هاب، ورودی های کنترل کننده های فازی نوع PD هستند. اگر $\theta(k)$ مکان زاویه ای هاب در قدم k ام کنترل باشد که روی خط (on-line) اندازه گیری می شود، مقدار خطا و تغییر خطا را می توان به صورت ذیل بدست آورد :

$$e(k) = \theta_d(k) - \theta(k) \quad (11)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (12)$$

که در آن e و Δe به ترتیب خطا و تغییر خطای زاویه ای هاب بوده و θ_d و θ به ترتیب زاویه اندازه گیری شده و زاویه مطلوب مفصل می باشد. E و ΔE فازی شده متغیرهای عددی e و Δe هستند. در مرحله دوم، با استفاده از دانش پایه که شامل مجموعه های فازی در قالب عبارات زبانی است، مجموعه ای از قوانین کنترل به صورت "اگر-آنگاه" استخراج خواهد شد. سپس واحد استنتاج که یک واحد فرآیندی است، خروجی را بر اساس قوانین فازی تولید می کند.

خروجی واحد استنتاج بصورت متغیر فازی بوده و برای استفاده در عملگرها باید در واحد غیر فازی ساز به متغیر قطعی (Crisp) تبدیل گردد. روش مرکز جرم و روش متوسط وزن دار دو روش شناخته شده و پر کاربرد در غیر فازی سازی هستند [۲۱]. محاسبه گشتاور فرمان در واحد غیر فازی ساز با استفاده از روش متوسط وزن دار به صورت ذیل بدست می آید:

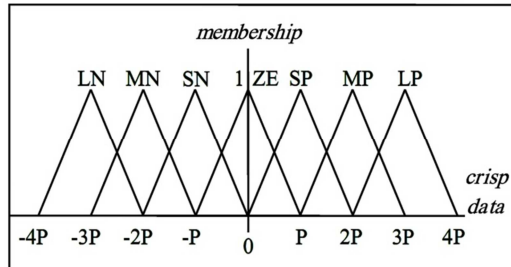
$$u = \frac{\sum_{h=1}^r U \prod_{j=1}^b \mu_j(x_j)}{\sum_{h=1}^r \mu_j(x_j)} \quad (13)$$

x_j ورودی، μ_j مقدار عضویت سیگنال ورودی x_j در مجموعه زبانی $E(j)$ و r تعداد عضوهای این مجموعه هستند. همچنین b با توجه به دو نوع ورودی خطا و تغییر خطا برابر ۲ است. U مرکز سطح محدوده های مثلثی تابع عضویت خروجی، u سیگنال گشتاور و $\prod$ نماد ضرب است.

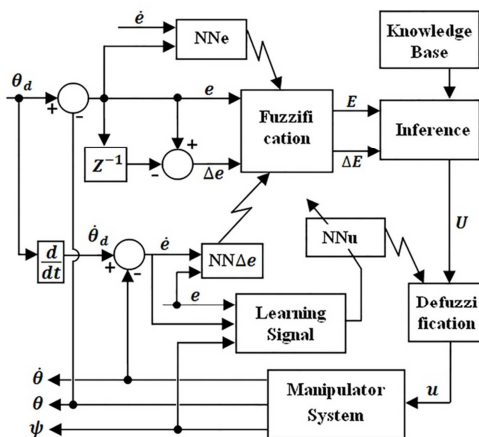
۵- هوشمند سازی توابع عضویت با شبکه DRNN

برای هوشمند سازی توابع عضویت، ابتدا این توابع پارامتری شده و سپس با استفاده از الگوریتم DRNN، مقدار بهینه پارامترها (بر روی خط) بروز رسانی خواهند شد. شکل ۳ یک تابع عضویت مثلثی که با

استفاده از پارامتر P تشکیل شده است را نشان می دهد. شکل ۴ طرح شماتیک کنترل کننده پیشنهادی را نمایش می دهد. وظیفه شبکه های NNu و $NN\Delta e$ ، تولید پارامتر P برای توابع عضویت در قسمت های فازی ساز و غیر فازی ساز است. شکل ۵ نیز ساختار شبکه عصبی بازگشتی پویا را نشان می دهد. شبکه شامل لایه ورودی، میانی (پنهان) و خروجی است. لایه بازگشتی (carried layer) در لایه میانی قرار دارد.



شکل ۳- تابع عضویت پارامتری



شکل ۴- نمودار کنترل کننده پیشنهادی

نقش این لایه، اضافه کردن خروجی لایه دوم مرحله قبلی در روابط بروز رسانی وزن های این لایه است. وزن نوروں های هر لایه با استفاده از بهینه کردن تابع هدف و با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا بروز رسانی می گردد. حال تابع هدف را بصورت زیر در نظر می گیریم:

$$J = \frac{1}{2} [R e^2(t) + S \dot{e}^2 + T \delta^2(l_3, t)] \quad (14)$$

که در آن J تابع هدف و R ، S و T به ترتیب بردارهای وزن اهمیت خطا، مشتق خطا و تغییر شکل الاستیک برای رابط های بازوی مکانیکی هستند. اصلاح وزن ها بر اساس قانون دلتای توسعه یافته [۱۹] به سمت پایین ترین نقطه تابع هدف در فضای وزن ها می باشد، لذا داریم:

$$\nabla w = -\eta \left(\frac{\partial J}{\partial w} \right)^T \quad (15)$$

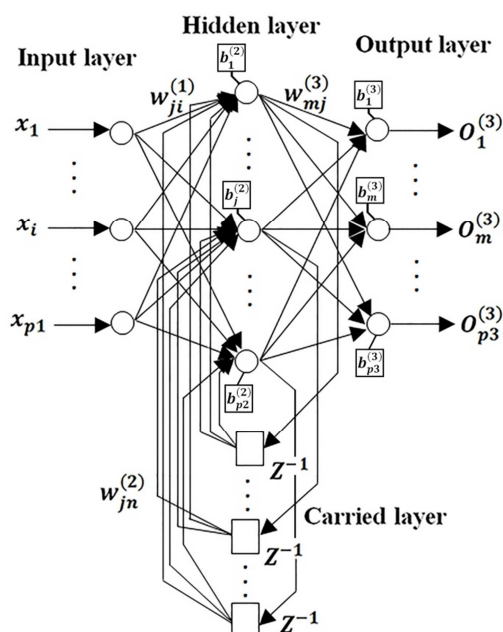
جائیکه ∇w گرادیان وزن (و یا بایاس) و η نرخ یادگیری و مثبت می باشد. حال به محاسبه مشتق جزئی تابع هدف نسبت به وزن های

شبکه می پردازیم :

$$\frac{\partial J}{\partial w} = \frac{\partial J}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial w} + \frac{\partial J}{\partial \dot{e}} \frac{\partial \dot{e}}{\partial w} + \frac{\partial J}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial w} \quad (16)$$

وزن لایه های شبکه است. با استفاده از رابطه (۱۴) و جایگذاری در رابطه (۱۶) داریم:

$$\frac{\partial J}{\partial w} = R e \frac{\partial e}{\partial w} + S \dot{e} \frac{\partial \dot{e}}{\partial w} + T \delta \frac{\partial \delta}{\partial w} \quad (17)$$



شکل ۵- ساختار شبکه عصبی بازگشتی پویا

با کمک قانون زنجیری، رابطه (۱۷) را بازنویسی می کنیم:

$$\frac{\partial J}{\partial w} = -R e \frac{\partial \theta}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial w} - S \dot{e} \frac{\partial \theta}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial w} + T \psi \frac{\partial \delta}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial w} \quad (18)$$

مطابق با پیشنهاد لایتادی و همکاران [۲۲]، علامت عبارات $\frac{\partial \theta}{\partial u}$ و $\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial u}$ بر مقادیر حقیقی آنها ترجیح دارند. لذا با اصلاح رابطه (۱۸) و جایگذاری در رابطه (۱۵) داریم:

$$\Delta w = \eta S_{L.S.} \frac{\partial u}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial w} \quad (19)$$

$$S_{L.S.} = (Re + S\dot{e} + T\delta) \quad (20)$$

واحد Learning Signal در فلوچارت شکل ۴ می باشد.

تابع سیگموئیدی را به عنوان تابع فعال ساز انتخاب می کنیم:

$$f(I) = \frac{2}{1 + e^{-aI}} - 1 \quad (21)$$

$I_i(k)$ ورودی لایه اول بوده و برابر است با:

$$I_i(k) = x_i(k) \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, p1 \quad (22)$$

که $\mathbf{x} = [\mathbf{e}^T, \Delta \mathbf{e}^T]^T$ بردار ورودی شبکه است و دارای $p1 = 2N$ مولفه می باشد. خروجی لایه دوم برابر است با:

$$O_j^{(2)}(k) = f(I_j^{(2)}(k)) \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, p2 \quad (23)$$

$p2$ تعداد نورون ها و $O_j^{(2)}(k)$ خروجی لایه دوم هستند.

$I_j^{(2)}(k)$ ورودی لایه دوم بوده و به صورت ذیل بدست می آید:

$$I_j^{(2)}(k) = \sum_{i=1}^{p1} w_{ji}^{(1)} x_i(k) + \sum_{n=1}^{p2} w_{jn}^{(2)} O_j^{(2)}(k-1) + b_j^{(2)} \quad (24)$$

که $w_{ji}^{(1)}$ و $w_{jn}^{(2)}$ به ترتیب وزن های لایه اول و لایه بازگشتی، $b_j^{(2)}$ بایاس لایه دوم هستند. ورودی لایه سوم برابر است با:

$$I_m^{(3)}(k) = \sum_{j=1}^{p2} w_{mj}^{(3)} O_j^{(2)}(k) + b_m^{(3)} \quad ; \quad m = 1, 2, \dots, p3 \quad (25)$$

که $w_{mj}^{(3)}$ و $b_m^{(3)}$ به ترتیب وزن و بایاس لایه سوم هستند. خروجی لایه سوم به صورت ذیل محاسبه می شود:

$$P = O_m^{(3)}(k) = f(I_m^{(3)}(k)) \quad (26)$$

$O_m^{(3)}(k)$ خروجی لایه سوم و معادل پارامتر P است. با استفاده از روابط (۲۲) تا (۲۶) و قانون زنجیری داریم:

$$\frac{\partial P}{\partial (b_j^{(3)})} = f(I_m^{(3)}(k)) \quad (27)$$

$$\frac{\partial P}{\partial (b_j^{(2)})} = f(I_m^{(3)}(k)) f(I_j^{(2)}(k)) w_{mj}^{(3)} \quad (28)$$

$$\frac{\partial P}{\partial (w_{mj}^{(3)})} = f(I_m^{(3)}(k)) O_j^{(2)}(k) \quad (29)$$

$$\frac{\partial P}{\partial (w_{jn}^{(2)})} = f(I_m^{(3)}(k)) f(I_j^{(2)}(k)) w_{mj}^{(3)} O_j^{(2)}(k-1) \quad (30)$$

$$\frac{\partial P}{\partial (w_{ji}^{(1)})} = f(I_m^{(3)}(k)) f(I_j^{(2)}(k)) w_{mj}^{(3)} x_i(k) \quad (31)$$

جائیکه:

$$f(I) = \frac{1}{2} \alpha (1 - f^2(I)) \quad (32)$$

با جایگذاری روابط (۲۷) تا (۳۱) در (۱۹)، روابط اصلاح وزن ها استخراج می شوند:

$$\Delta(b_j^{(3)}) = \eta S_{L.S.} f(I_m^{(3)}(k)) \frac{\partial u}{\partial P} \quad (33)$$

$$\Delta(b_j^{(2)}) = \eta S_{L.S.} f(I_m^{(3)}(k)) f(I_j^{(2)}(k)) w_{mj}^{(3)} \frac{\partial u}{\partial P} \quad (34)$$

$$\Delta(w_{mj}^{(3)}) = \eta S_{L.S.} f(I_m^{(3)}(k)) O_j^{(2)}(k) \frac{\partial u}{\partial P} \quad (35)$$

$$\Delta(w_{jn}^{(2)}) = \eta S_{L.S.} f(I_m^{(3)}(k)) f(I_j^{(2)}(k)) w_{mj}^{(3)} x_i(k) \frac{\partial u}{\partial P} \quad (36)$$

$$\Delta(w_{ji}^{(1)}) = \eta S_{L.S.} f(I_m^{(3)}(k)) f(I_j^{(2)}(k)) w_{mj}^{(3)} x_i(k) \frac{\partial u}{\partial P} \quad (37)$$

$$O_j^{(2)}(k-1) w_{mj}^{(3)} \frac{\partial u}{\partial P}$$

۶- شبیه سازی

در این بخش جهت صحت سنجی و کارآمدی کنترل کننده پیشنهادی، شبیه سازی انجام و نتایج مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

جدول ۳- تابع عضویت تغییر خطا

	مفصل ۱		مفصل ۲		مفصل ۳	
	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین
ZE	۰/۰۲۸	-۰/۰۲۸	۰/۰۳۵	-۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	-۰/۰۳۵
SP	۰/۰۴۰	-۰/۰۱۶	۰/۰۵۰	-۰/۰۲۰	۰/۰۵۰	-۰/۰۲۰
MP	۰/۰۵۴	۰/۰۰۰	۰/۰۶۸۰	-۰/۰۲۰	۰/۰۶۸۰	-۰/۰۲۰
LP	+∞	۰/۰۵۲	+∞	۰/۰۶۵۰	+∞	۰/۰۶۵۰

جدول ۴- تابع عضویت گشتاور

	مفصل ۱		مفصل ۲		مفصل ۳	
	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین
ZE	۰/۰۰۴	-۰/۰۰۴	۰/۰۰۷	-۰/۰۰۷	۰/۰۱۴	-۰/۰۱۴
SP	۰/۰۰۶	-۰/۰۰۲	۰/۰۱	-۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	-۰/۰۰۸
MP	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰	۰/۰۲۷	۰/۰۰۰
LP	+∞	۰/۰۰۸	+∞	۰/۰۱۳	+∞	۰/۰۲۶

$e \Delta e$	LN	MN	SN	ZE	SP	MP	LP
LN	LN	LN	LN	LN	ZE	MP	SP
MN	MN	MN	MN	MN	ZE	MP	MP
SN	LN	MN	SN	SN	ZE	SP	SP
ZE	SN	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	SP
SP	SN	SN	ZE	SP	SP	MP	LP
MP	MN	MN	ZE	MP	MP	MP	MP
LP	SN	SN	ZE	LP	LP	LP	LP

شکل ۶- قوانین کنترل کننده فازی

شکل‌های ۷، ۸ و ۹ به ترتیب خطای مکان زاویه‌ای مفصل ۱ تا ۳ را برای کنترل‌کننده‌های فازی و پیشنهادی نشان می‌دهند. بیشینه قدر مطلق خطا در کنترل‌کننده فازی در مفصل‌های ۱ تا ۳، به ترتیب ۰/۰۰۶، ۰/۰۹۳ و ۰/۱۲۸ رادیان و در کنترل‌کننده پیشنهادی ۰/۰۰۴، ۰/۰۸۲ و ۰/۱۲۵ رادیان هستند که به ترتیب ۳، ۱۲ و ۲ درصد بهبود در کنترل‌کننده پیشنهادی را نشان می‌دهند. مقادیر بیشینه خطا در مفصل و پنجه در زمان ۰/۲۵ ثانیه رخ می‌دهد. متوسط قدر مطلق خطا در کنترل‌کننده فازی در مفصل‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب 1.0×10^{-3} ، 1.6×10^{-3} و 1.4×10^{-3} و در کنترل‌کننده پیشنهادی 1.0×10^{-3} ، 1.2×10^{-3} و 1.1×10^{-3} رادیان هستند که ۵۷، ۹۳ و ۳۲ درصد کاهش خطا را شاهد هستیم. بعلاوه، زمان نشست نیز در کنترل‌کننده پیشنهادی در هر سه مفصل حدوداً در ثانیه دوم رخ می‌دهد که کاهش قابل توجهی نسبت به کنترل‌کننده فازی دارد. اثر خطاهای مفصل را می‌توان در خطای پنجه نیز دنبال نمود. شکل ۱۰ خطای مسیر پنجه را نمایش می‌دهد. کاهش بیشینه و متوسط قدر مطلق خطا در کنترل‌کننده پیشنهادی نسبت به کنترل‌کننده فازی به ترتیب ۱۰ و ۶۰ درصد است. شکل ۱۱، ارتعاش پنجه و شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ گشتاورهای کنترلی را به ترتیب در مفصل ۱ تا ۳ نشان

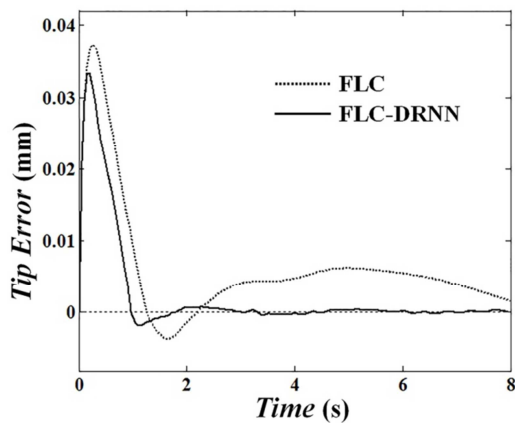
نمونه مطالعاتی، بازوی مکانیکی با $N=3$ رابط است که رابط سوم انعطاف پذیر است. جدول ۱ مشخصات ابعادی و جرم هر رابط را بر اساس سطح مقطع مستطیلی و جنس آلومینیومی رابط‌ها مشخص می‌کند. چگالی و مدول یانگ رابط‌ها به ترتیب ۲۷۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۷۱ گیگا پاسکال هستند. جرم، ممان اینرسی و نسبت دنده روتورها به ترتیب ۱/۰ کیلوگرم، ۰/۰۲۵ کیلوگرم-متر مربع و ۱ بوده و جرم بار، ۳۰۰ گرم می‌باشد. فرکانس‌های طبیعی اول و دوم با کمک روابط (۳) و (۴) به ترتیب ۱۱/۹۶ و ۲۹۳/۱۶ به دست می‌آید. مسیر حرکت پنجه، خط راستی است که با محور X زاویه ۶۰ درجه می‌سازد. لحظه شروع حرکت، زوایای نسبی رابط‌ها صفر هستند. در این بخش پاسخ‌های سیستم با توجه به دو نوع کنترل‌کننده فازی و کنترل‌کننده پیشنهادی مورد مقایسه قرار خواهند گرفت. هفت تابع عضویت LN, MN, SN, ZE, SP, MP و LP به ترتیب بزرگ منفی، متوسط منفی، کوچک منفی، تقریباً صفر، کوچک مثبت، متوسط مثبت و بزرگ مثبت برای قسمت فازی ساز کنترل‌کننده فازی در نظر گرفته شده است. محدوده LN و LP دوزنقه ای و مابقی توابع عضویت به شکل مثلث متساوی الساقین می‌باشند. جدول ۲ و ۳ مقادیر هر محدوده را به ترتیب برای ورودی خطا و تغییر خطا برای مفصل سه گانه مشخص می‌کند. واحد خطا و تغییر خطا رادیان است. توابع عضویت LN, MN, SN متقارن توابع LP, MP, SP هستند. توابع عضویت قسمت غیر فازی ساز در جدول ۴ آمده است. واحد گشتاور نیوتن-متر است. قوانین فازی در شکل ۶ نمایش داده شده است. جدول بر اساس ۴۹ قانون "اگر-آنگاه" تشکیل شده است. سه شبکه عصبی بازگشتی پویا برای خطا، تغییر خطا و گشتاور لحاظ شده است. ضرایب وزنی تابع هدف، ۴، ۲ و ۱ به ترتیب برای S, R و T اختیار شده اند. نرخ یادگیری و ضریب ممنوم به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۹، ورودی $x^T = [e_1, e_2, e_3, \dot{e}_1, \dot{e}_2, \dot{e}_3]$ و خروجی $O^{(3)} = [P_1, P_2, P_3]$ هستند. تعداد نورون‌ها در لایه‌های اول، دوم و سوم به ترتیب $p_1=6$ ، $p_2=30$ و $p_3=3$ در نظر گرفته شده اند.

جدول ۱- جرم و ابعاد رابط‌های بازوی مکانیکی

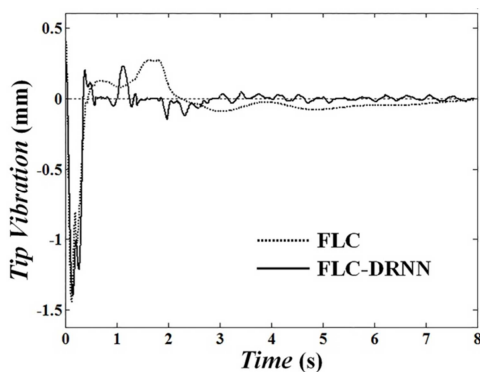
کمیت	واحد	بازوها		
		اول	دوم	سوم
طول	سانتیمتر	۲۰	۲۰	۴۰
عرض	میلیمتر	۱۰	۱۰	۲۰
ضخامت	میلیمتر	۱۵	۱۵	۲/۵
جرم	گرم	۸۱	۸۱	۵۴

جدول ۲- تابع عضویت خطا

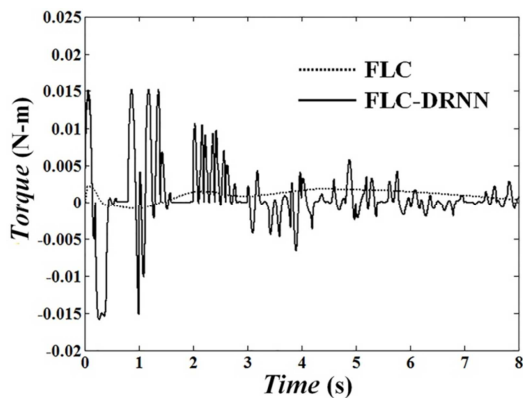
	مفصل ۱		مفصل ۲		مفصل ۳	
	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین
ZE	۰/۰۱۴	-۰/۰۱۴	۰/۰۷۰	-۰/۰۷۰	۰/۰۷۰	-۰/۰۷۰
SP	۰/۰۲۰	-۰/۰۰۸	۰/۰۱۰	-۰/۰۴۰	۰/۰۱۰	-۰/۰۴۰
MP	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰	۰/۰۳۶	۰/۰۰۴	۰/۰۳۶	-۰/۰۰۴
LP	+∞	۰/۰۲۶	+∞	۰/۰۳۰	+∞	۰/۰۳۰



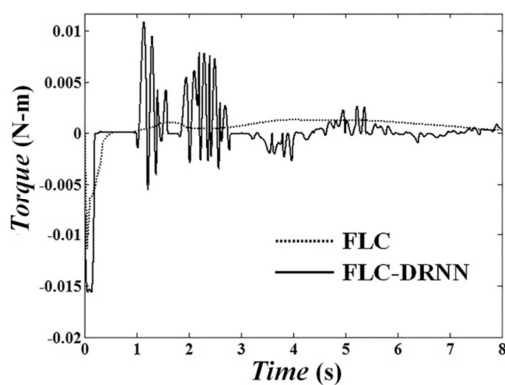
شکل ۱۰- خطای مسیر پنجه



شکل ۱۱- ارتعاش پنجه

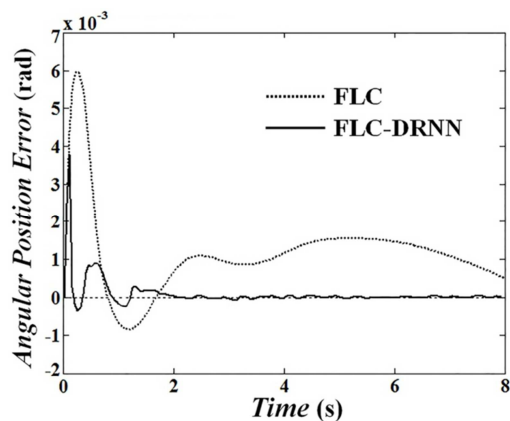


شکل ۱۲- گشتاور مفصل ۱

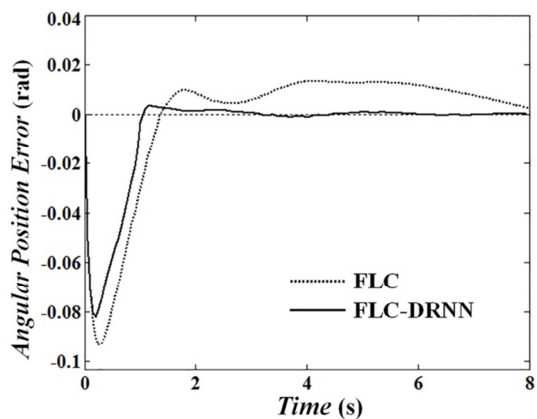


شکل ۱۳- گشتاور مفصل ۲

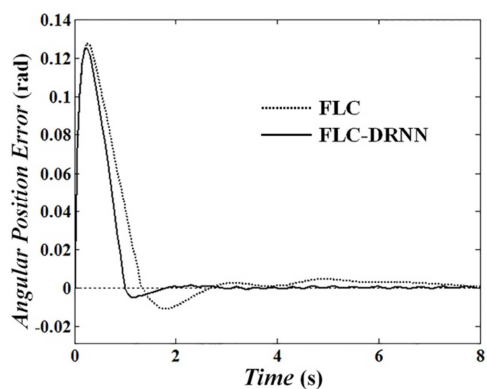
می‌دهند. مقایسه دو کنترل‌کننده گویای این است که بیشینه تغییر شکل خمشی در هر دو آنها یکسان است ولی ارتعاش در کنترل‌کننده پیشنهادی سریع‌تر نشست کرده و زمان نشست آن به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. متوسط دامنه تغییر شکل الاستیک در کنترل‌کننده پیشنهادی ۲۸ درصد بهبود را نسبت به شرایط فازی نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ پارامتر P را به ترتیب برای توابع عضویت خطا، تغییر خطا و گشتاور نشان می‌دهد. پارامتر P بعد از عبور از زمان تشدید (۰/۲۵ ثانیه) به صورت خطی تغییر می‌کند و بعد از رسیدن به حالت پایدار (۲ ثانیه)، به مقدار ثابت می‌رسد.



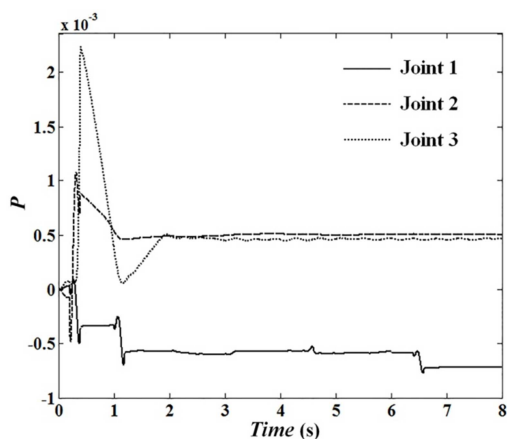
شکل ۷- خطای مکان زاویه‌ای مفصل ۱



شکل ۸- خطای مکان زاویه‌ای مفصل ۲



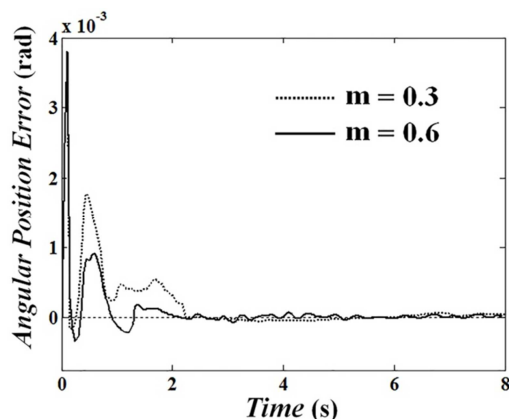
شکل ۹- خطای مکان زاویه‌ای مفصل ۳



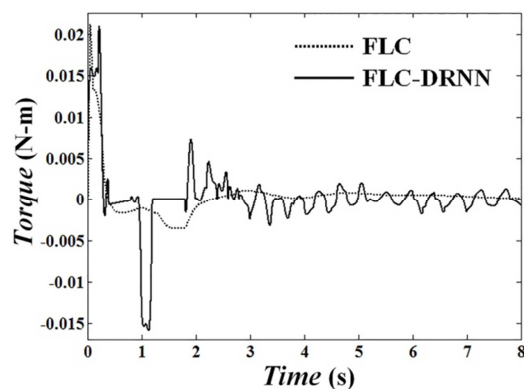
شکل ۱۷- پارامتر P تابع عضویت گشتاور

برای بررسی مقاومت سیستم کنترل، جرم بار که یکی از پارامترهای سیستم است، انتخاب شده و پاسخ سیستم در شرایط مختلف آن بررسی می‌شود. شکل‌های ۱۸ تا ۲۲ پاسخ سیستم را برای جرم بارهای ۳۰۰ و ۶۰۰ گرم نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰ به ترتیب خطای مکان زاویه‌ای مفاصل ۱، ۲ و ۳ و شکل ۲۱ خطای مسیر پنجه را برای دو حالت مختلف بار نشان می‌دهد. بیشینه خطای مفاصل در هر دو حالت یکسان بوده و تغییر نمی‌کند.

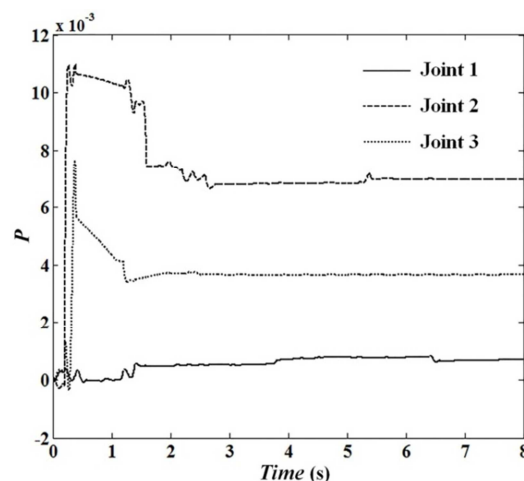
خطای حالت ماندگار در مفاصل‌های ۱، ۲ و ۳ در شرایط $m = 0.3$ به ترتیب برابر با 2×10^{-5} ، 2×10^{-3} و 1×10^{-3} و در $m = 0.6$ به ترتیب برابر 4×10^{-5} ، 3×10^{-5} و 7×10^{-5} رادیان است. در هر دو حالت، خطای ماندگار از 1×10^{-4} کمتر بوده و نزدیک به صفر می‌باشند. این روند برای خطای پنجه نیز به‌طور مشابه رخ می‌دهد. خطای حالت ماندگار برای خطای پنجه برای $m = 0.3$ ، 7×10^{-5} و برای $m = 0.6$ ، 10×10^{-5} هست. شکل ۲۲ ارتعاش پنجه را برای دو حالت جرم بار نشان می‌دهد. با توجه به افزایش بار به ۲ برابر، انتظار افزایش مقدار خمش را داریم. بیشینه تغییر شکل خمشی در $m = 0.3$ ، $67/0$ و در $m = 0.6$ ، $22/1$ میلی‌متر می‌باشد. ولی تغییر شکل الاستیک در حالت ماندگار برای هر دو حالت یکسان است.



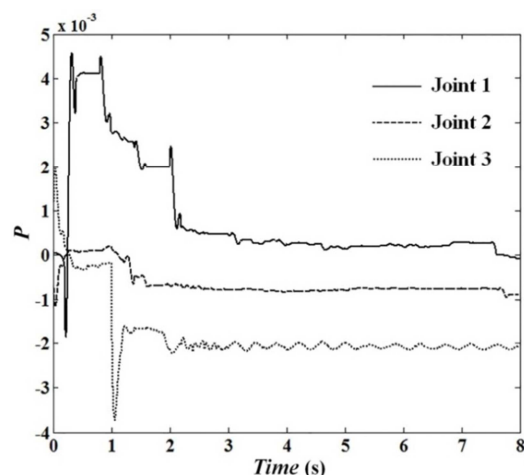
شکل ۱۸- خطای مکان زاویه‌ای مفاصل ۱



شکل ۱۴- گشتاور مفاصل ۳



شکل ۱۵- پارامتر P تابع عضویت خطا

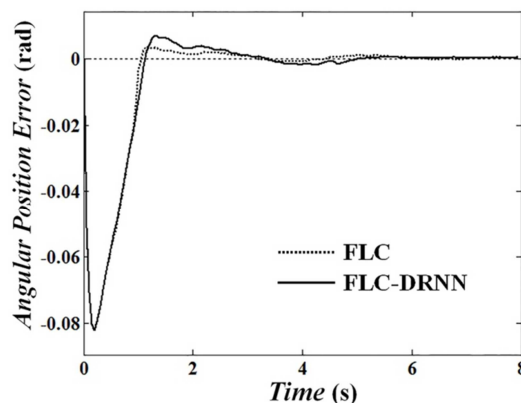


شکل ۱۶- پارامتر P تابع عضویت تغییر خطا

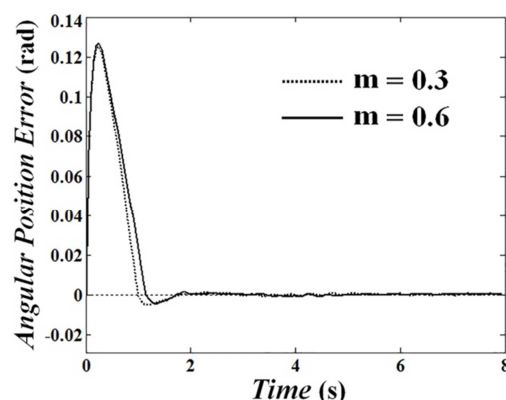
نتایج مهم این بخش به طور خلاصه به صورت ذیل جمع‌بندی می‌گردد. مقدار متوسط خطا و خطای ماندگار در کنترل کننده پیشنهادی به مقدار قابل توجهی نسبت به کنترل کننده فازی کاهش یافته است. زمان نشست در هر سه مفصل در ثانیه دوم رخ می‌دهد که نسبت به کنترل کننده فازی کاهش زیادی را نشان می‌دهد. بیشینه تغییر شکل خمشی در هر دو کنترل کننده یکسان است ولی سرعت نشست و متوسط دامنه تغییر شکل الاستیک در کنترل کننده پیشنهادی بهبود یافته است. پارامتر P بعد از عبور از زمان تشدید به صورت خطی تغییر می‌کند و بعد از زمان نشست، به حالت پایدار می‌رسد. با تغییر بار به عنوان یکی از پارامترهای سیستم، مقاوم بودن کنترل کننده پیشنهادی، بررسی و مورد تأیید قرار گرفت.

۷- نتیجه‌گیری

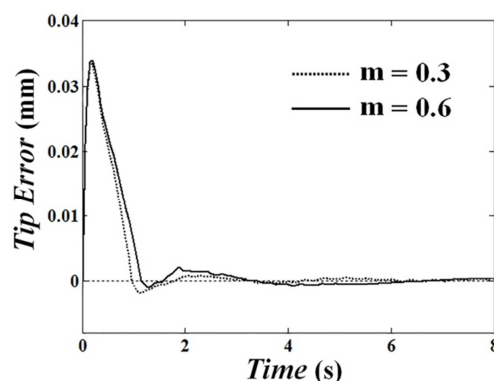
این مقاله هوشمند سازی در کنترل فازی بازوهای مکانیکی با پایه ثابت و رابط نهایی انعطاف‌پذیر را مورد مطالعه قرار داده است. در ابتدا معادلات دینامیکی حرکت بازوی مکانیکی انعطاف‌پذیر، فرمول‌بندی شد. به علت وجود انعطاف‌پذیری، ابعاد سیستم نامحدود بوده لذا از روش مود فرضی برای گسسته سازی و تخمین تغییر شکل الاستیک در تیر انعطاف‌پذیر استفاده گردید. با محاسبه انرژی‌های جنبشی و پتانسیل سیستم و با استفاده از روش لاگرانژ، معادلات حرکت استخراج شد. در ادامه منطق فازی به عنوان روش کنترلی برای دستگاه انتخاب گردید. در کنترل بر اساس منطق فازی، توابع عضویت در ابتدای مسیر انتخاب شده و تا انتهای حرکت، ثابت و بدون تغییر باقی می‌مانند. این تحقیق جهت بهبود پاسخ‌های سیستم، با استفاده از شبکه عصبی به اصلاح توابع عضویت پرداخته است. به علت استفاده از عنصر حافظه‌دار در شبکه عصبی بازگشتی پویا و سرعت مناسب همگرایی، در این تحقیق از این روش برای بروز رسانی توابع عضویت استفاده شده است. این شبکه از سه لایه ورودی، میانی و خروجی تشکیل شده است. لایه بازگشتی در لایه دوم تعبیه شده و اثر قدم قبلی را در بروز رسانی وزن‌های شبکه لحاظ می‌کند. تابع هدف شبکه، مجموع مربعات خطای مکان زاویه‌ای، نرخ خطای مکان زاویه‌ای و تغییر شکل خمشی است. بروز رسانی وزن‌ها و بایاس‌ها با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا و بر اساس قانون دلتای توسعه یافته، فرمول‌بندی گردید. جهت تصدیق و کارآمدی روش ارایه شده، شبیه‌سازی برای بازوی مکانیکی ماهر با سه رابط که رابط سوم انعطاف‌پذیر است، انجام شد. پاسخ‌های سیستم در دو کنترل کننده فازی و کنترل کننده پیشنهادی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد مقدار متوسط خطا و خطای ماندگار در کنترل کننده پیشنهادی به مقدار قابل توجهی نسبت به کنترل کننده فازی کاهش یافته است. همچنین زمان نشست و متوسط دامنه تغییر شکل الاستیک در کنترل کننده پیشنهادی بهبود یافته است. جهت اثبات مقاوم بودن کنترل کننده پیشنهادی، وزن بار به عنوان یکی از پارامترهای سیستم تغییر کرده و پاسخ‌های سیستم مجدداً مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان از مقاوم بودن کنترل کننده پیشنهادی داشتند.



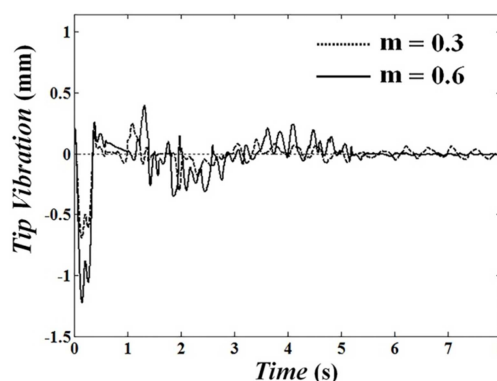
شکل ۱۹- خطای مکان زاویه‌ای مفصل ۲



شکل ۲۰- خطای مکان زاویه‌ای مفصل ۳



شکل ۲۱- خطای مسیر پنجه



شکل ۲۲- ارتعاشات پنجه

۸- مراجع

- [20] Rao S. S., Vibration of Continuous Systems, Forth Edition, Chapter 11, New Jersey: Wiley & Sons, 2007.
- [21] Ross T. J., Fuzzy Logic with Engineering Application, Second Edition, pp. 101, Wiley & Sons, 2004.
- [22] Lightbody G., Wu W. H., Irwin G. W., Control Application for feedforward Networks, Neural Networks for Control, MIT Press, Cambridge, MA., pp. 51-71, 1990.
- [1] Yue S., Henrich D., Xu W.L., Tso S.K., Point-to-point trajectory planning of flexible redundant robot manipulators using genetic algorithms, Robotica, Vol. 20, No. 3, pp. 269-280, 2002.
- [2] Karami N., Habibnejad Korayem M., Shafei A. M., RafeeNekoo S., Theoretical and experimental investigation of dynamic load carrying capacity of flexible-link manipulator in point-to-point motion, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 15, pp. 199-206, 2015.
- [3] Homaei H., Keshmiri M., Optimal Trajectory Planning for Minimization Vibration of Flexible Redundant Cooperative Manipulators, Advanced Robotic, Vol. 23, No. 12-13, pp. 1799-1816, 2009.
- [4] Zarafshan P., Mousavian A. A., Adaptive hybrid suppression control of a wheeled mobile robot with flexible solar panels, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 5, pp. 130-143, 2013.
- [5] Habibnejad Korayem M., Shafei A. M., Doosthoseini M., Kadhodaie B., Dynamic modeling of visco-elastic robotic manipulators using Timoshenko beam theory, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 1, pp. 131-139, 2014.
- [6] De Luca A., Siciliano B., Inversion-Based nonlinear control of Robot Arms with Flexible links, Journal of Guidance, control and Dynamics, Vol. 16, No. 6, pp. 1169-1176, 1993.
- [7] Caracciolo R., Richiedei D., Trevisani A., Zanutto V., Robust mixed-norm position and vibration control of flexible link mechanisms, Mechatronics, Vol. 15, No. 7, pp. 767-791, 2005.
- [8] Zhang N., Feng Y., Yu X., Optimization of terminal sliding control for two-link flexible manipulators, The 30th IEEE Annual Conference of Industrial Electronics Society, Vol. 2, pp. 1318-1322, 2004.
- [9] Alam M. S., Tokhi M. O., Hybrid fuzzy logic control with genetic optimization for a single-link flexible manipulator, Engineering Application of Artificial Intelligence, Vol. 21, No. 6, pp. 858-873, 2008.
- [10] Matia F., Marichal G.N., Jimenez E., Fuzzy Modeling and Control: Theory and Applications, Springer, 2014.
- [11] Lochan K., Roy B.K., Control of two-link 2-DOF Manipulator Using Fuzzy Logic Techniques: A Review, Proceedings of Fourth International Conference on Soft Computing for Problem Solving, Springer India, Vol. 1, pp. 499-511, 2014.
- [12] Rezvani M., Rohani S. M., Adaptive-neuro-fuzzy for uncertain robotic arm no need to auxiliary compensator controller, Third Iranian Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), 2011.
- [13] Tian L., Collins C., Adaptive neuro-fuzzy control of a flexible manipulator, Mechatronics, Vol. 15, No. 10, pp. 1305-1320, 2005.
- [14] Meza J. L., Santibanez V., Soto R., Llama M.A., Fuzzy self-tuning PID semiglobal regulator for robot manipulators, IEEE Transaction Indian Electron, Vol. 59, No. 6, pp. 2709-2717, 2012.
- [15] Mirshekaran M., Piltan F., Esmaeili Z., Khajepour T., Kazeminasab M., Design Sliding Mode Modified Fuzzy Linear Controller with Application to Flexible Robot Manipulator, International Journal of Modern Education and Computer Science, Vol. 5, No. 10, pp. 53-63, 2013.
- [16] Mallikarjunaiah S., Narayana Reddy S., Adaptive Neuro-Fuzzy Interface System Controller for Flexible Link Manipulator, ACTA Electrotechnica, Vol. 54, No. 2, 2013.
- [17] Abdullahi A.M., Mohamed Z., Muhammad M., Bature A. A., Vibration Control Comparison Of A Single Link Flexible Manipulator Between Fuzzy Logic Control And Pole Placement Control, International Journal of Scientific & Technology Research, Vol. 2, No. 12, 2013.
- [18] Sahamijoo G., Avatefipour O., Nasrabad M. R. S., Taghavi M., Piltan F., Research on Minimum Intelligent Unit for Flexible Robot, International Journal of Advanced Science and Technology, Vol. 80, pp. 79-104, 2015.
- [19] Rumelhart D. E., McClelland J. L., Parallel distributed processing, Explorations in the microstructure of cognition, MIT Press, Cambridge, MA., Vol. II, 1986.