

طراحی کنترل کننده فازی عصبی تطبیقی برای پاندول معکوس

امینه بابری^(۱) - مریم ذکری^(۲) - سعید حسین نیا^(۳)

(۱) کارشناس ارشد - مرکز آموزش علمی- کاربردی، جامعه اسلامی کارگران امام صادق (ع) اصفهان

(۲) استادیار - دانشکده برق، دانشگاه صنعتی اصفهان

(۳) استادیار - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد

تاریخ دریافت: پاییز ۱۳۸۹

تاریخ پذیرش: پاییز ۱۳۹۰

خلاصه: معادلات حالت سیستم پاندول معکوس به شکل متعارف کنترل پذیر بوده و شامل دو تابع غیرخطی می باشد. از آنجائی که شبکه های فازی عصبی تطبیقی دارای خاصیت تقریب زنی عمومی می باشند، در این مقاله از این ویژگی برای مدلسازی توابع مذکور استفاده می شود. سپس بر اساس روش خطی سازی با فیدبک و کنترل فازی تطبیقی و با استفاده از مدل شبکه های فازی عصبی تطبیقی، کنترل کننده مناسب برای سیستم پاندول معکوس طراحی گردیده است. قوانین تطبیق به دست آمده از روش پایداری لیاپانوف، پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین می کنند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با اعمال کنترل کننده طراحی شده خروجی سیستم پاندول در حضور نامعینی مسیر مطلوب را با پاسخ گذرای مناسب تعقیب می نماید.

کلمات کلیدی: خطی سازی فیدبک، کنترل فازی تطبیقی، پاندول معکوس، شبکه های فازی عصبی تطبیقی، پایداری لیاپانوف.

۱- مقدمه

خطی سازی فیدبک یک روش طراحی کنترل غیرخطی می باشد. ایده اصلی این روش تبدیل دینامیک های سیستم غیرخطی به خطی است، به طوری که بتوان از روشهای کنترل خطی برای طراحی کنترل کننده مناسب استفاده کرد. خطی سازی فیدبک به طور موفقیت آمیزی در حل مسائل کنترل عملی به کار گرفته شده است. این مسائل شامل کنترل بالگردها، هواپیماهای پیشرفته، روبات های صنعتی و ابزار زیست پزشکی است [۱].

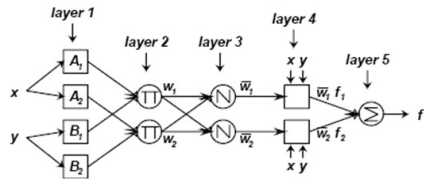
در روش خطی سازی با فیدبک، سیگنال فیدبک به عنوان تابعی از حالات سیستم به گونه ای طراحی می شود که سیستم فیدبک حاصله خطی و پایدار باشد [۲]. هنگامی که دینامیک های غیرخطی سیستم به طور کامل شناخته شده نباشند، می توان از سیستم های فازی، شبکه های عصبی و یا شبکه های فازی عصبی تطبیقی برای تقریب این دینامیک ها استفاده کرد. با قوانین اگر- آنگاه فازی می توان توابع نامعلوم در یک سیستم را تقریب زد و یک کنترل کننده ردیاب طراحی کرد [۲]. در [۴] از مدل فازی تاکاگی- سوگنو برای طراحی کنترل کننده و تقریب توابع استفاده شده است. لوئیز و همکارانش با استفاده

از شبکه های گوسی و شبکه های عصبی چند لایه یک کنترل کننده برای بازوی ربات طراحی کردند [۵]. شبکه های RBF نیز برای تقریب دینامیک های نامعلوم در سیستم های غیرخطی به کار گرفته شده اند [۶]. در [۷] از الگوریتم ژنتیک برای مدل سازی استفاده شده است. از طرفی مدل شبکه های فازی عصبی تطبیقی که به اختصار آنفیس نامیده می شوند در سال ۱۹۹۳ توسط جانگ معرفی گردید [۸]. هدف از ارائه این مدل عبارت است از:

- استفاده از اطلاعات اولیه (مجموعه داده های ورودی - خروجی) به منظور کاهش فضای جستجوی بهینه سازی.
- ارائه روش های موثر جهت تنظیم پارامترهای توابع عضویت فازی به منظور کمینه سازی خطای خروجی و به دست آوردن عملکرد بهینه.

شبکه های فازی عصبی تطبیقی در مدل سازی، شناسایی سیستم ها، دسته بندی داده ها، پیش بینی سری های زمانی، طراحی کنترل کننده دما، راه اندازی موتورهای القایی کنترل شده با ولتاژ، پیش بینی زمان بهبود بیماران تحت ورزش درمانی و مهندسی پزشکی استفاده شده است [۹-۱۴].

در این تحقیق ابتدا شبکه های آنفیس معرفی می شوند. یکی از ویژگی های



شکل (۲): ساختار شبکه آنفیس با دو ورودی و یک خروجی
Fig. 2: ANFIS architecture with two-input and single-output

شکل (۲) ساختار آنفیس متناظر با شکل (۱) را نشان می‌دهد که رئوس مربعی، گره‌های تطبیقی قابل تنظیم و رئوس دایره‌ای، گره‌های ثابت می‌باشند [۸].

با نماد گذاری $O_{1,i}$ برای خروجی گره i از لایه ۱ عملکرد لایه‌های پنج گانه مدل آنفیس را می‌توان به صورت زیر تشریح کرد:
لایه ۱: هر گره در این لایه یک گره تطبیقی است که خروجی آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1,2 \quad (3)$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y) \quad i = 3,4 \quad (4)$$

که در آن x (یا y) ورودی به یک گره و A_i (یا B_{i-2}) یک تابع فازی اختصاص یافته به آن گره است. در واقع خروجی این لایه مقدار عضویت متغیر ورودی خواهد بود. توابع عضویت را می‌توان هر یک از توابع عضویت فازی مانند توابع مثلثی یا گوسی و غیره تعریف کرد. به عنوان مثال، A_i را می‌توان توسط یک تابع عضویت گوسی پارامتری به صورت زیر بیان کرد:

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (5)$$

که در آن $\{a_i, b_i, c_i\}$ مجموعه پارامترها خواهد بود. پارامترهای این لایه به عنوان پارامترهای مقدم خوانده می‌شوند.
لایه ۲: هر گره در این لایه یک گره ثابت است که سیگنال‌های ورودی را در هم ضرب می‌کند و حاصل ضرب را به صورت خروجی ارائه می‌کند. به عنوان مثال:

$$O_{2,i} = W_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \quad i = 1,2 \quad (6)$$

خروجی هر گره در این لایه قدرت آتش قانون مطابق با آن گره است.
لایه ۳: هر گره در این لایه یک گره ثابت است که نرمالیزه کردن قدرت آتش‌زنی هر قانون در این لایه صورت می‌گیرد.

$$O_{3,i} = \bar{W}_i = \frac{W_i}{W_1 + W_2} \quad i = 1,2 \quad (7)$$

لایه ۴: گره i در این لایه مشارکت قانون i ام در خروجی کل را از رابطه زیر حساب می‌کند:

$$O_{4,i} = \bar{W}_i * f_i = \bar{W}_i \cdot (p_i x + q_i y + r_i) \quad i = 1,2 \quad (8)$$

که در آن \bar{W}_i خروجی لایه سوم است و $\{p_i, q_i, r_i\}$ مجموعه پارامترهای تطبیقی است. این مجموعه پارامترها به عنوان پارامترهای مؤخر یا نتیجه شناخته می‌شوند.

مهم این شبکه‌ها، خاصیت تقریب‌زنی عمومی می‌باشد. ایده اصلی این مقاله کاربرد خاصیت مذکور در مدل‌سازی توابع غیرخطی برای طراحی کنترل‌کننده سیستم‌های غیرخطی به روش خطی‌سازی فیدبک می‌باشد. به منظور حفظ پایداری سیستم و داشتن حداقل خطای ردیابی قوانین کنترل تطبیقی به کنترل‌کننده اضافه می‌شود. جهت آزمایش نحوه عملکرد این روش از سیستم پاندول معکوس استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در محیط MATLAB، بیانگر توانایی کنترل‌کننده پیشنهادی در تنظیم و ردیابی خروجی سیستم پاندول معکوس می‌باشد.

۲- شبکه‌های فازی عصبی تطبیقی

سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی یا آنفیس در حقیقت یک سیستم استنتاج فازی است که در چارچوب شبکه‌های عصبی تطبیقی ارائه شده است. در این ساختار به منظور آموزش مدل آنفیس از الگوریتم یادگیری هیبرید استفاده می‌شود. در این الگوریتم از روش گرادینان نزولی جهت تنظیم پارامترهای غیرخطی (پارامترهای توابع عضویت فازی) و از روش تخمین حداقل مربعات بازگشتی برای به روز کردن پارامترهای خطی (پارامترهای قسمت مؤخر قوانین فازی) استفاده می‌شود. چنانچه فرض کنیم یک سیستم فازی درجه اول مدل تاکاگی سوگونو با دو ورودی x و y ، یک خروجی $z=f(x,y)$ و دو قانون فازی زیر مد نظر باشد [۱۵]:

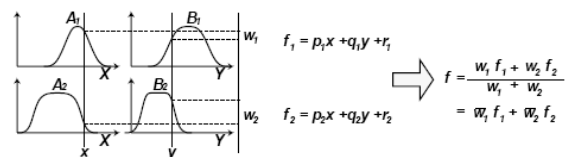
قانون اول: اگر x از A_1 و y از B_1 باشد در آن صورت:

$$f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \quad (1)$$

قانون دوم: اگر x از A_2 و y از B_2 باشد در آن صورت:

$$f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2 \quad (2)$$

آنگاه مکانیزم عملکرد این سیستم را می‌توان مطابق شکل (۱) نمایش داد و مدل معادل آنفیس برای این سیستم استنباط فازی مطابق شکل (۲) خواهد بود.



شکل (۱): مکانیزم عملکرد سیستم استنتاج فازی درجه اول مدل تاکاگی سوگونو با دو ورودی، یک خروجی و دو قانون فازی

Fig. 1: A two-input first-order Sugeno fuzzy model with two-input, single-output and two rules

وزنهای W_1 و W_2 در شکل (۱) معمولاً به عنوان حاصلضرب درجات عضویت بخش مقدم به دست می‌آیند و خروجی f متوسط وزن دار خروجی هر قانون یا قاعده است.

اگر توابع غیرخطی $f(\underline{x})$ و $g(\underline{x})$ مشخص باشند، آنگاه ما می‌توانیم بر اساس روش خطی‌سازی فیدبک کنترل u را چنان انتخاب کنیم که قسمت غیرخطی را از بین ببرد و کنترل‌کننده را بر پایه نظریه کنترل خطی طراحی کنیم [۲].

در حالت خاص، فرض می‌کنیم:

$$e = y_m - y = y_m - x_1 \quad (12)$$

که $\underline{e} = [e \ \dot{e}]^T$ بردار خطا و $\underline{k} = [k_2 \ k_1]^T$ یک بردار ثابت مثبت می‌باشد به صورتی که ریشه‌های معادله $h(s) = s^2 + k_1 s + k_2$ در سمت چپ صفحه مختلط قرار داشته باشند، آنگاه قانون کنترل را می‌توان به صورت (۳) انتخاب کرد.

$$u^* = \frac{1}{g(\underline{x})} [-f(\underline{x}) + \ddot{y}_m + \underline{k}^T \underline{e}] \quad (13)$$

با جایگذاری u^* در معادله (۸) معادله خطا را به صورت (۱۴) به دست می‌آوریم:

$$\ddot{e} + k_1 \dot{e} + k_2 e = 0 \quad (14)$$

که با انتخاب بردار مناسب \underline{K} در عبارت (۱۲) خواهیم داشت $e(t) \rightarrow 0$ هر گاه $t \rightarrow \infty$ ، یعنی خروجی پاندول معکوس y به طور مجانبی به خروجی ایده ال y_m همگرا می‌گردد. بنابراین در صورتی که بتوانیم از رابطه (۱۲) استفاده کنیم سیستم کنترلی پایدار خواهد بود. از آنجائی که توابع غیرخطی $f(\underline{x})$ و $g(\underline{x})$ در عمل نامعلوم می‌باشند بنابراین کنترل‌کننده ایده‌آل u^* نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. برای حل این مشکل شبکه‌های فازی عصبی تطبیقی را به کار می‌بریم و با استفاده از مدل آنفیس توابع نامعلوم را تقریب می‌زنیم.

توابع تقریب زده شده توسط شبکه آنفیس را به ترتیب $\hat{f}_{ANFIS}(\underline{x})$ و $\hat{g}_{ANFIS}(\underline{x})$ می‌نامیم. به منظور یافتن حداقل خطای تعقیب توسط سیستم کفایت برخی از پارامترها را در توابع تقریب زده شده آزاد بگذاریم تا در طی عملیات برخط تغییر یابند به طوری که بهترین پاسخ را در خروجی داشته باشیم. با فرض اینکه θ_f و θ_g به ترتیب پارامترهای آزاد در توابع $\hat{f}_{ANFIS}(\underline{x})$ و $\hat{g}_{ANFIS}(\underline{x})$ باشند، بنابراین ما عبارات $\hat{f}_{ANFIS}(\underline{x}) = \hat{f}_{ANFIS}(\underline{x} | \theta_f)$ و $\hat{g}_{ANFIS}(\underline{x}) = \hat{g}_{ANFIS}(\underline{x} | \theta_g)$ را نمایش می‌دهیم. با جایگزینی $f(\underline{x})$ و $g(\underline{x})$ در (۱۲) به ترتیب به وسیله شبکه‌های آنفیس $\hat{f}_{ANFIS}(\underline{x} | \theta_f)$ و $\hat{g}_{ANFIS}(\underline{x} | \theta_g)$ ، کنترل‌کننده عصبی فازی تطبیقی را به صورت (۱۵) به دست می‌آوریم.

$$u = \frac{1}{\hat{g}_{ANFIS}(\underline{x} | \theta_g) [-\hat{f}_{ANFIS}(\underline{x} | \theta_f) + \ddot{y}_m + \underline{k}^T \underline{e}]} \quad (15)$$

وظیفه بعدی ما طراحی یک قاعده تطبیق برای θ_f و θ_g می‌باشد، به طوری که خطای ردیابی e حداقل گردد.

۴- طراحی قواعد تطبیق

بر اساس خروجی شبکه آنفیس ما می‌توانیم $\hat{f}_{ANFIS}(\underline{x} | \theta_f)$ و $\hat{g}_{ANFIS}(\underline{x} | \theta_g)$ را به وسیله روابط (۱۶) و (۱۷) جایگذاری کنیم:

$$\hat{f}_{ANFIS}(\underline{x} | \theta_f) = \underline{\theta}_f^T \underline{\xi}(\underline{x}) \quad (16)$$

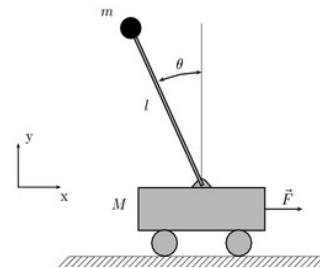
لایه ۵: گره یگانه موجود در این لایه یک گره ثابت است که خروجی کلی را به عنوان جمع مشارکت هر قاعده به دست می‌دهد:

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{W}_i \cdot f_i = \frac{\sum_i W_i \cdot f_i}{\sum_i W_i} \quad (9)$$

به منظور یافتن بهترین مدل، پارامترهای مقدم را با روش گرادیان نزولی و پارامترهای مؤخر را با روش حداقل مربعات آموزش می‌دهند. همچنین الگوریتم آموزش را به ازای هر زوج آموزشی انجام می‌دهیم که به این روش آموزش بهنگام گفته می‌شود.

۳- طراحی کنترل‌کننده فازی عصبی تطبیقی برای پاندول معکوس

سیستم غیرخطی پاندول معکوس شکل (۳) را در نظر می‌گیریم.



شکل (۳): سیستم پاندول معکوس
Fig. 3: Inverse pendulum system

در صورتی که X_1 زاویه پاندول و X_2 سرعت زاویه‌ای باشد، معادلات حالت سیستم مذکور عبارتند از:

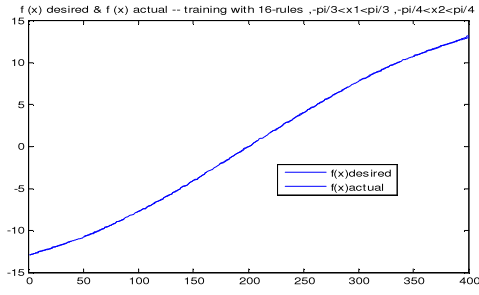
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(\underline{x}) + g(\underline{x})u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (10)$$

که در آن u ورودی سیستم، $f(\underline{x})$ و $g(\underline{x})$ توابع غیرخطی به صورت (۱۱) و y خروجی سیستم می‌باشند. $\underline{x} = [x_1 \ x_2]^T$ بردار حالت سیستم است که فرض می‌شود قابل اندازه‌گیری است. برای اینکه سیستم (۱۰) کنترل پذیر باشد، لازم است که $g(\underline{x}) \neq 0$.

$$f(\underline{x}) = \frac{g \sin x_1 - \frac{m l x_2^2 \cos x_1 \sin x_1}{m_c + m}}{1 - \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right)} \quad (11)$$

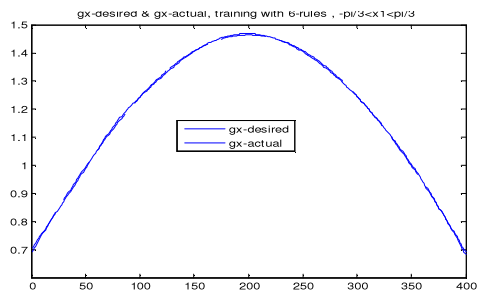
$$g(\underline{x}) = \frac{\cos x_1}{1 - \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right)}$$

هدف کنترل عبارت است از طراحی یک کنترل‌کننده فیدبک تنظیم بردار پارامتر θ ، به طوری که خروجی پاندول معکوس یعنی y خروجی ایده‌آل y_m را دنبال نماید و این که مشتقات زمانی آن معلوم و کران دار باشد.



شکل (۴): تابع $f(x)$ تقریب زده شده توسط شبکه آنفیس
Fig. 4: $f(x)$ approximated by ANFIS network

برای تقریب تابع $g(x)$ از یک شبکه آنفیس با یک ورودی در بازه شامل $\left[-\frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{3}\right]$ شامل ۶ قانون فازی استفاده می‌کنیم (شکل (۵)).



شکل (۵): تابع $g(x)$ تقریب زده شده توسط شبکه آنفیس
Fig. 5: $g(x)$ approximated by ANFIS network

لازم به ذکر است که روش آموزش به کار رفته برای تقریب توابع غیرخطی روش بهنگام می‌باشد. بدین منظور باید کدهای مربوطه در محیط MATLAB نوشته شود زیرا جعبه ابزار منطق فازی روش آموزش مذکور را پشتیبانی نمی‌کند. توابع تقریب زده شده را در کنترل‌کننده (۱۳) جایگذاری می‌کنیم. در شبیه‌سازی از دستور ode45 در MATLAB برای انتگرال‌گیری سیستم حلقه بسته استفاده می‌کنیم. همچنین:

$$P = \begin{bmatrix} 15 & 5 \\ 5 & 5 \end{bmatrix}, \quad k = [2 \quad 1]^T, \quad Q = \text{diag}(10, 10) \quad (26)$$

شکل‌های (۶) و (۷) خروجی پاندول معکوس به ازای شرایط اولیه مثبت و منفی می‌باشند این اشکال نشان می‌دهند که عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی بسیار مطلوب است. به طوری که خروجی پاندول معکوس دارای پاسخ گذرای مناسب است و به سرعت به سمت صفر همگرا می‌شود.

$$\hat{g}_{ANFIS}(\underline{x} | \underline{\theta}_g) = \underline{\theta}_g^T \underline{\eta}(\underline{x}) \quad (17)$$

که در آن $\underline{\theta}_f$ و $\underline{\theta}_g$ بردار پارامترهای تطبیق و همچنین بردارهای $\underline{\xi}$ و $\underline{\eta}$ به صورت (۱۸) و (۱۹) می‌باشند.

$$\underline{\xi}(\underline{x}) = [\xi_1(\underline{x}) \quad \xi_2(\underline{x}) \quad \dots \quad \xi_m(\underline{x})] \quad (18)$$

$$\underline{\eta}(\underline{x}) = [\eta_1(\underline{x}) \quad \eta_2(\underline{x}) \quad \dots \quad \eta_s(\underline{x})] \quad (19)$$

که m و s به ترتیب تعداد قانون به کار رفته توسط شبکه آنفیس برای تقریب توابع غیرخطی $f(x)$ و $g(x)$ می‌باشد. هر سطر از این بردارها با استفاده از روابط (۲۰) و (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$\xi_i = \overline{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$

$$\eta_i = \overline{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (21)$$

با استفاده از قضیه ۱ و روش پایداری لیاپانوف بر اساس روند [۲] قوانین تطبیق از روابط (۲۲) و (۲۳) به دست می‌آیند.

$$\dot{\underline{\theta}}_f = -\gamma_1 e^T P b \underline{\xi}(\underline{x}) \quad (22)$$

$$\dot{\underline{\theta}}_g = -\gamma_2 e^T P b \underline{\eta}(\underline{x}) u \quad (23)$$

که γ_1 و γ_2 ثابت‌های مثبت و P یک ماتریس مثبت معین می‌باشد که معادله لیاپانوف زیر را برآورده می‌نماید.

$$\Lambda^T P + P \Lambda = -Q \quad (24)$$

که Q یک ماتریس مثبت معین 2×2 دلخواه بوده، Λ و b طبق رابطه (۲۳) به دست می‌آیند.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_2 & -k_1 \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

قضیه ۱: سیستم کنترل حلقه بسته غیرخطی پاندول معکوس را در نظر بگیرید که کنترل‌کننده (۱۵) و قوانین تطبیق (۲۲) و (۲۳) در آن استفاده شده است. کنترل‌کننده عصبی فازی تطبیقی طراحی شده می‌تواند موارد زیر را تضمین نماید.

۱- سیستم کنترل حلقه بسته پاندول معکوس پایدار است.

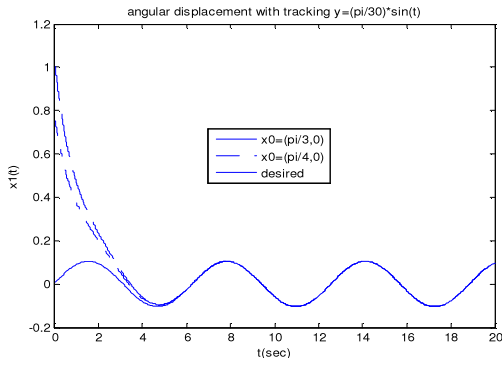
۲- خطای تعقیب حداقل می‌گردد.

۵- نتایج شبیه‌سازی

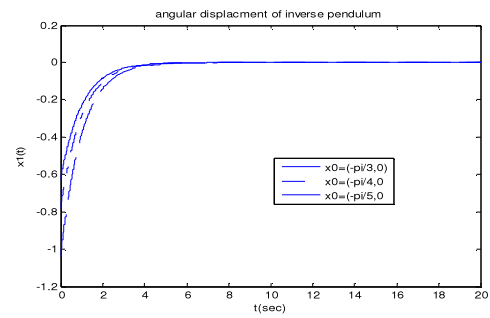
برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی، سیستم غیرخطی پاندول معکوس را با $g=9.8$, $mc=1$, $m=0.1$, $l=0.5$ در نظر می‌گیریم. حالات (الف) و (ب) و (ج) را برای شبیه‌سازی انتخاب می‌کنیم.

الف- نگه داشتن پاندول معکوس در راستای قائم

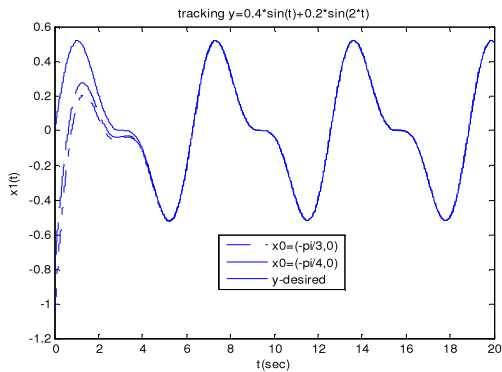
هدف طراحی کنترل‌کننده‌ای است که بتواند پاندول معکوس را به صورت عمود نگه دارد. ابتدا برای تقریب زدن تابع $f(x)$ از ۴۰۰ زوج آموزشی در بازه $\left[-\frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{3}\right] \times \left[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right]$ ، یک شبکه آنفیس با ۱۶ قانون فازی شامل ۴ تابع عضویت به ازای هر ورودی استفاده می‌کنیم (شکل (۴)).



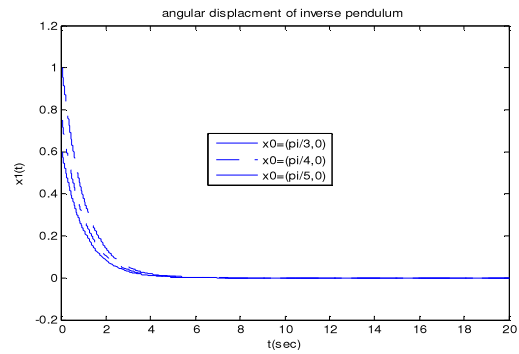
شکل (۹): تعقیب خروجی سینوسی به ازای شرایط اولیه مثبت
Fig. 9: Tracking sinusoidal output with positive initial term



شکل (۶): تنظیم خروجی در صفر به ازای شرایط اولیه منفی
Fig. 6: Output regulation in zero point with negative initial term



شکل (۱۰): تعقیب خروجی شامل فرکانس‌های متفاوت به ازای شرایط اولیه منفی



شکل (۷): تنظیم خروجی در صفر به ازای شرایط اولیه مثبت
Fig. 7: Output regulation output in zero point with positive initial term

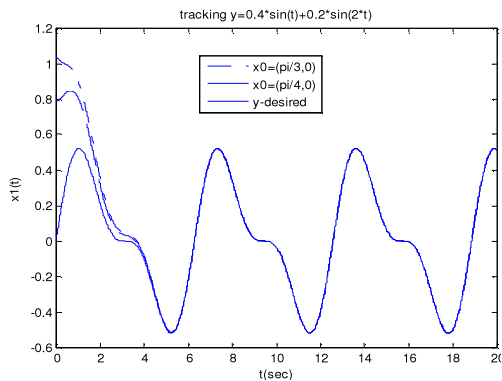
Fig. 10: Tracking sinusoidal output including several frequency with negative initial term

ب- تعقیب مسیر سینوسی توسط پاندول معکوس

برای طراحی کنترل کننده از همان توابع تقریب زده شده در بند (الف)

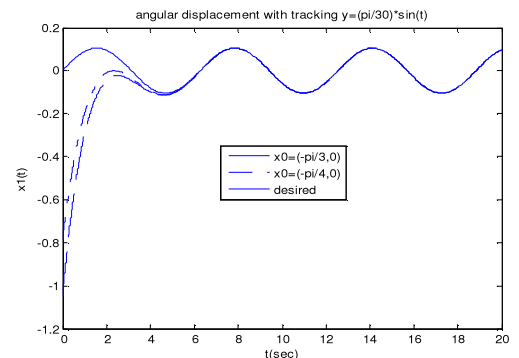
استفاده می‌کنیم. یک بار مسیر سینوسی تک فرکانس $y_m = \frac{\pi}{30} \sin t$

و بار دوم مسیر سینوسی $y_m = 0.4 \sin t + 0.2 \sin 2t$ را به ازای شرایط اولیه مثبت و منفی بررسی می‌کنیم.

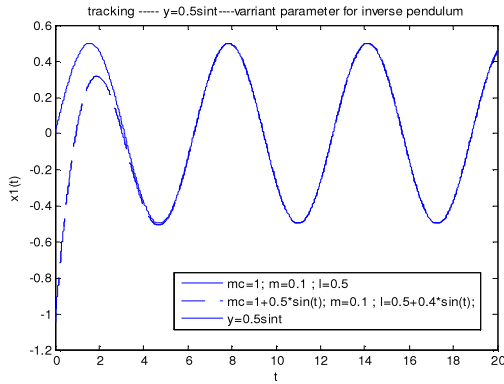


شکل (۱۱): تعقیب خروجی شامل فرکانس‌های متفاوت به ازای شرایط اولیه مثبت

Fig. 11: Tracking sinusoidal output including several frequency with positive initial term



شکل (۸): تعقیب خروجی سینوسی به ازای شرایط اولیه منفی
Fig. 8: Tracking sinusoidal output with negative initial term



شکل (۱۴): تعقیب خروجی با شرایط اولیه $(-\frac{\pi}{3}, 0)$ و پارامترهای متغیر

پاندول معکوس

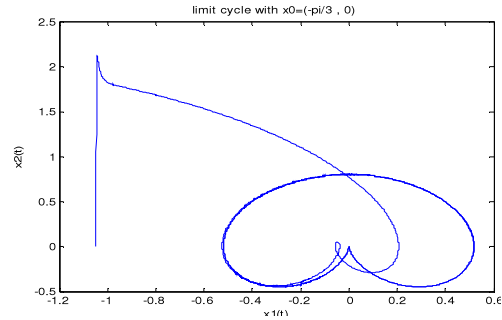
Fig. 14: Tracking sinusoidal output with initial term $(-\frac{\pi}{3}, 0)$ and variant parameter for inverse pendulum system

شکل (۱۳) نشان می‌دهند که عملکرد کنترل کننده در برابر نامعینی‌ها بسیار مطلوب می‌باشد. همچنین در شکل (۱۴) مشخص می‌شود که تفاوت عملکرد کنترل کننده در حالتی که پارامترها نامعین هستند با حالت پارامترهای ثابت بسیار اندک است. به طوری که هر دو خروجی بر روی هم منطبق می‌شوند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله از روش خطی‌سازی فیدبک در طراحی کنترل کننده فازی عصبی تطبیقی استفاده شد. توابع غیرخطی نامعلوم در سیستم را با دو شبکه آنفیس تقریب زده و سپس به کمک روش پایداری لیاپانوف قواعد تطبیق فازی را به منظور تضمین پایداری سیستم حلقه بسته طراحی کردیم.

شبه سازی‌ها نشان می‌دهد که کنترل کننده فازی عصبی تطبیقی طراحی شده برای سیستم پاندول معکوس عملکرد بسیار مطلوب داشته، در برابر نامعینی‌ها مقاوم بوده و خروجی دارای پاسخ گذاری مطلوب است.



شکل (۱۲): مسیر حالت سیستم حلقه بسته پاندول معکوس با شرایط اولیه

$(-\frac{\pi}{3}, 0)$ و به کار بردن کنترل کننده عصبی فازی تطبیقی پیشنهادی

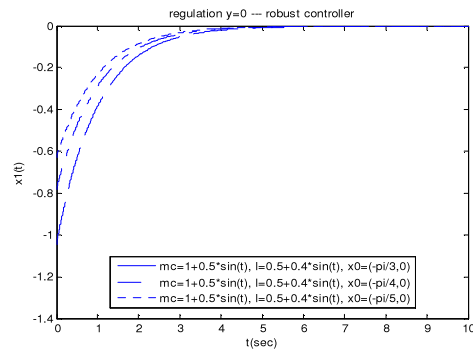
Fig. 12: (x_1, x_2) for inverse pendulum system with initial term

$(-\frac{\pi}{3}, 0)$ by using adaptive neuro fuzzy controller

شکل‌های (۸)-(۱۲) خروجی پاندول معکوس را به ازای شرایط اولیه متفاوت در مسیرهای گوناگون نشان می‌دهد. شبه سازی‌ها بیانگر این است که عملکرد کنترل کننده بسیار مطلوب بوده و خروجی پاندول معکوس مسیرهای مورد نظر را به خوبی دنبال می‌کند.

ج- بررسی عملکرد کنترل کننده در برابر نامعینی

در این حالت نیز همان توابع تقریب زده شده در بندهای قبل را استفاده می‌کنیم. به منظور بررسی عملکرد کنترل کننده طراحی شده در برابر نامعینی، پارامترهای مربوط به پاندول معکوس را متغیر در نظر می‌گیریم.



شکل (۱۳): تنظیم خروجی در صفر به ازای شرایط اولیه گوناگون و پارامترهای متغیر پاندول معکوس

Fig. 13: Output regulation in zero point with different initial term and variant parameter for inverse pendulum system

مراجع

- [1] J.E. Slotine, W. Li, "Applied nonlinear control", Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1991.
- [2] L.X. Wang, "Adaptive fuzzy systems and control", Design and Stability Analysis, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1994.
- [3] J.T. Spooner, K.M. Passino, "Stable adaptive control using fuzzy systems and neural networks", IEEE Trans. Fuzzy Sys, Vol.3, No.4, pp.339-358, 1996.
- [4] P.P. Kumar, I. Kar, L. Behera, "Variable gain controllers for nonlinear systems using T-S fuzzy model", IEEE Trans. SMC, Vol.6, No.36, pp.1442-1449, 2006.

- [5] F.L. Lewis, S. Jagannathan, A. Yesildirek, "Neural network control of robot manipulators and nonlinear systems", Taylor & Francis, 1999.
- [6] I. Kar, L. Behera, "Direct adaptive neural control for affine nonlinear systems", *Appl. Soft Comp.* 9 ,pp.756–764, 2009.
- [7] I.Z.M. Darus, F.M. Aldebrez, M.O. Tokhi, "Parametric modelling of a twin rotor system using genetic algorithms", 1st. Inter. Symp. on Cont., Comm. and Sig. Proc., 2004.
- [8] J.S.R. Jang, "ANFIS: Adaptive network –based fuzzy inference system", *IEEE Trans. Sys. Man. Cyb.*, Vol.23, No.3, pp.665–685, May/ June 1993.
- [9] J.R. Jang, C. Sun, "Neuro-fuzzy modeling and Control", *Proc. IEEE* 83, pp.378–406, 1995.
- [10] P.P. Bhogle, B.M. Patre, L.M. Waghmare, V.M. Panchade, "Neuro fuzzy temperature controller", *Mechatronics and Automation, ICMA Inter. Conf. on Vol.*, pp.3344 – 3348, Aug. 2007.
- [11] L. Rajaji, C. Kumar, "Adaptive neuro fuzzy based soft starting of voltage-controlled induction motor drive", *Southeastcon, IEEE*, pp.448 – 45, April 2008.
- [12] S.A. Rahman Kashif, M.A. Saqib, "Soft starting of induction motors using neuro fuzzy and soft computing", *Electrical Engineering, ICEE 2nd. Inter. Conf. on Vol.*, pp.1 – 7, March 2008.
- [13] R. Ranjan, A. Awasthi, N. Aggarawal, J. Gulati, "Applications of fuzzy and neuro-fuzzy in biomedical health sciences", *Electro/information Technology, IEEE Inter. Conf. on Vol.*, pp.60 – 65, May 2006.
- [14] F.B. Othman, Mohd, "Neuro fuzzy classification and detection technique for bioinformatics problems", 1st. Asia Inter. Conf. on Vol., No.27-30, pp.375 – 380, March 2007.
- [15] T. Takagi, M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", *IEEE Trans. Sys, Man, Cyb.*, Vol.15, pp.116–32, 1985.

