

## کنترل فازی - تطبیقی بازوی مکانیکی غیرخطی دو محوره با مفاصل صلب در حضور نامعینی

مریم منتظری<sup>(۱)</sup> - حمید محمودیان<sup>(۲)</sup>

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

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

تاریخ دریافت: بهار ۱۳۹۰ تاریخ پذیرش: پاییز ۱۳۹۱

**خلاصه:** در این مقاله هدف، طراحی کنترل کننده تطبیقی فازی برای یک بازوی مکانیکی با دو بازو می باشد. ابتدا با استفاده از روش اولر- لاگرانژ که مبتنی بر انرژی پتانسیل و جنبشی سیستم می باشد، معادلات دینامیکی سیستم محاسبه شده و در مرحله بعد کنترل کننده غیرخطی تطبیقی- فازی طراحی خواهد شد. در اینجا با استفاده از یک تابع لیاپانف و قوانین تطبیقی مناسب علاوه بر پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته همگرایی خطای سیستم به سمت صفر نیز به دست می آید. در نهایت کنترل کننده طراحی شده به یک بازوی مکانیکی با دو مفصل صلب اعمال خواهد شد و نتایج شبیه سازی توسط نرم افزار MATLAB ارائه می شود که نشان دهنده کارایی سیستم می باشد.

**کلمات کلیدی:** بازوهای مکانیکی غیرخطی، کنترل تطبیقی، کنترل فازی، پایداری لیاپانف.

### ۱- مقدمه

از چند دهه قبل که تحقیقات در زمینه رباتیک آغاز شده، روشهای متنوعی برای به دست آوردن مدل دینامیکی روباتها ارائه شده است [۱]. تلاشهای اولیه در این زمینه بیشتر به بیان روابط برای بازوهای مکانیکی به صورت دقیق تر معطوف بوده و روشهای کلاسیکی که برای بیان آن استفاده شده است بیشتر مبتنی بر روش لاگرانژ می باشد [۲]. از جمله این روشها روش بازگشتی نیوتن- اولر می باشد [۳]. که در رابطه بازگشتی از ساختار فیزیکی زنجیرگونه‌ای از مانیپولاتور که حرکت هر اتصال بر حسب اتصال مجاورش ارائه گردیده استفاده می شود. برای کنترل حرکت یک روبات دو روش متفاوت سینماتیک مستقیم و سینماتیک معکوس وجود دارد. در [۳] روش بازگشتی نیوتن- اولر برای بازوی مکانیکی در نظر گرفته شده و در [۴] روش نیوتن- اولر به صورت بهتری برای کنترل یک ماشین متحرک به کار گرفته می شود. در [۵] محققین روش مذکور را بهبود بخشیده و به عنوان روش RNEA<sup>۱</sup> معرفی کردند. در [۶] روش دیگری معرفی شده اما این روش مانند روش RNEA دارای بازدهی لازم نمی باشد. در [۷] روش RENA به عنوان یک روش کاربردی تر با استفاده از دینامیک

معکوس به کار گرفته شد که بعدها این روش به عنوان CRBA<sup>۲</sup> معروف شد. در سالهای اولیه برای کار روی سیستمهای رباتیک بیشتر از روشهای خطی استفاده می شد [۹-۸]. به عنوان مثال در [۱۰] محققین یک کنترل کننده PID بهینه پیشنهاد کردند که با فرموله کردن قانون کنترل PID، تاخیر زمانی بین خواندن موقعیت بازو و گشتاور اصلاحی را به حداقل رساند. استفاده از کنترل کنندههای کلاسیک تنها هنگامی که ترمهای غیرخطی در سیستم در نظر گرفته نمی شد قابل پیاده سازی بود و در عمل عملکرد محدودیت داشت و نسبت به تغییر پارامترهای سیستم به شدت حساس بود و ناپایدار می شد. بنابراین به علت غیرخطی بودن معادلات دینامیکی روباتها استفاده از کنترل کنندههای غیرخطی ضروری می نمود. از جمله این روشها کنترل مود لغزشی [۱۱]، روش گام به عقب [۱۲] و تخمین زن [۱۳] می باشد. این دسته از کنترل کنندهها به علت وجود ماهیت غیرخطی در سیستمهای رباتیک از کارایی خوبی برخوردار می باشند. بازوهای مکانیکی صنعتی در محیط کار خود در معرض انواع اغتشاشات ناخواسته قرار دارند که ممکن است باعث ناپایداری سیستم گردد. از این رو استفاده از روش تطبیقی توسعه داده شد [۱۴]. پس از ظهور

$$u = \frac{v}{\hat{G}(x, C^*)} \quad (۸)$$

که در آن  $v$  و  $u_R$  به صورت زیر می‌باشد:

$$v = (a_0 e + L + a_m - I^{m-1}) - \hat{F}(z, B^*) + r^m + u_R \quad (۹)$$

$$u_R = \hat{\rho} \operatorname{sgn}(e^T pb) \quad (۱۰)$$

در اینجا با پیشنهاد یک الگوریتم تطبیقی تخمین توابع  $F(x)$  و  $G(x)$  را با  $\hat{F}(x)$  و  $\hat{G}(x)$  به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\tilde{F}(x) \cong F(x) - \hat{F}(x) \quad (۱۱)$$

$$\tilde{G}(x) \cong G(x) - \hat{G}(x)$$

با توجه به روابط (۷) و (۹) داریم:

$$e^m = \tilde{F}(z, B^*) + \tilde{G}(x, C^*)u - \quad (۱۲)$$

$$(a_0 + a_1 e^1 + \dots + a_{m-1} e^{m-1}) - u_R - \Delta$$

حال با جایگذاری روابط (۲) و (۳) در رابطه بالا رابطه زیر به دست می‌آید:

$$e^m = \tilde{B}\psi(z) + \tilde{C}\Phi(x)u - \quad (۱۳)$$

$$(a_0 + a_1 e^1 + \dots + a_{m-1} e^{m-1}) - u_R - \Delta$$

با بازنویسی رابطه فوق:

$$\dot{e} = Ae + b[\tilde{B}\psi(z) + \tilde{C}\Phi(x)u - u_R - \Delta] \quad (۱۴)$$

که در آن ماتریس هرویتز  $A$  و به صورت زیر می‌باشد:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{m-1} \end{bmatrix} \quad (۱۵)$$

$$b = [0, 0, \dots, 1]^T \quad (۱۶)$$

با در نظر گرفتن قوانین تطبیقی به صورت زیر

$$\dot{\hat{B}} = -\gamma_B e^T b p \psi(z) \quad (۱۷)$$

$$\dot{\hat{C}} = -\gamma_C e^T b p \Phi(x) \quad (۱۸)$$

$$\dot{\hat{\rho}} = \gamma_\rho |e^T pb| \quad (۱۹)$$

که در آن  $\gamma_a, \gamma_c$  و  $\gamma_\rho, 0$  پارامترهای طراحی می‌باشند.

قضیه: سیستم ارائه شده در (۱) را با وجود فرضهای مطرح شده برای

آن در نظر بگیرید. با استفاده از قانون کنترل (۸) و قوانین تطبیقی

(۱۷) و (۱۸) و (۱۹) خطای ردیابی به صورت مجانبی به صفر همگرا خواهد

شد.

اثبات:

تابع لیاپانفی را به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$V = V_1 + V_2 \quad (۲۰)$$

که در آن:

$$V_1 = e^T pb \quad (۲۱)$$

$$V_2 = \frac{\tilde{B}^2}{\gamma_B} + \frac{\tilde{C}^2}{\gamma_C} + \frac{\tilde{\rho}^2}{\gamma_\rho} \quad (۲۲)$$

$$\tilde{C} = \hat{C} - C^*, \tilde{\rho} = \hat{\rho} - \rho, \tilde{B} = \hat{B} - B^* \quad (۲۳)$$

کمپیوترهای قدرتمند و روشهای هوشمند مانند روش شبکه‌های عصبی [۱۵]، فازی [۱۶-۱۷] و الگوریتم ژنتیک [۱۸] استفاده از این روش‌ها و یا تلفیق آنها با روش‌ها دیگر از جمله تطبیقی [۱۹-۲۰] که بسیار کارآمد بود، توسعه یافت.

این مقاله در چهار بخش سازماندهی شده است. در بخش دوم سیستم و روابط آن معرفی شده‌اند و پس از کنترل کننده پیشنهادی معرفی شده و پایداری آن اثبات می‌گردد. در بخش سوم برای بیان کارآمدی سیستم، کنترل کننده پیشنهادی بر روی سیستم مورد نظر به کار گرفته می‌شود و نتایج مقاله در بخش چهارم بیان خواهد شد.

## ۲- معرفی مسئله، کنترل کننده و اثبات پایداری سیستم

معادله بازوی مکانیکی دو لینکی با مفصل صلب زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + \Delta(x) \quad (۱)$$

$$y^m = h$$

که در آن  $x$  بردار حالت،  $f(x)$  و  $g(x)$  توابع هموار نامعلوم می‌باشند.

فرض می‌شود مسیر مطلوب به صورت  $r^m, \dot{r}, \dots, r^m$  باشد که البته محدود و قابل اندازه‌گیری می‌باشد. همچنین اثر متقابل لینک‌ها  $\Delta(x_1, x_2, \dots, x_n)$  محدود می‌باشد به گونه‌ای که  $|\Delta(x_1, x_2, \dots, x_n)| < \rho$  و  $\rho > 0$ .

توابع فازی برای تخمین توابع نامعین را به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$F(z, B^*) = B^{*T} \psi(z) \quad (۲)$$

$$G(x, C^*) = C^{*T} \Phi(x) \quad (۳)$$

$$z = [x_1, x_2, \rho]^T$$

که در آن توابع  $F$  و  $G$  توابع فازی برای تخمین توابع  $f$  و  $g$  می‌باشند.

بردار  $C^{*T} = [C_1, C_2, \dots, C_L]$  و  $B^{*T} = [B_1, B_2, \dots, B_L]$

پارامترهای فازی می‌باشند. همچنین  $\Psi(x) = [\psi_1(x), \dots, \psi_k(x)]^k$  و

$\Phi(x) = [\Phi_1(x), \dots, \Phi_k(x)]^k$  بردارهای پایه فازی می‌باشند. توابع

$\Psi(x)$  و  $\Phi(x)$  به شکل زیر می‌باشند:

$$\Psi_L(z) = \frac{\prod_{j=1}^n \mu F_j^L(z)}{\sum_L \prod_{j=1}^n \mu F_j^L(z)} \quad (۴)$$

$$\Phi_L(x) = \frac{\prod_{j=1}^n \mu F_j^L(x)}{\sum_L \prod_{j=1}^n \mu F_j^L(x)} \quad (۵)$$

که در رابطه بالا  $\mu F_j^L(\cdot)$  تابع عضویت فازی می‌باشد.

خطای ردیابی سیستم را به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E^m = e^m - y^m \quad (۶)$$

حال می‌توانیم رابطه بالا را به صورت زیر بازنویسی کنیم:

$$e^m = r^m - [F(z, B^*) + G(x, C^*)u + \Delta] \quad (۷)$$

کنترل کننده پیشنهادی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۲۱]:

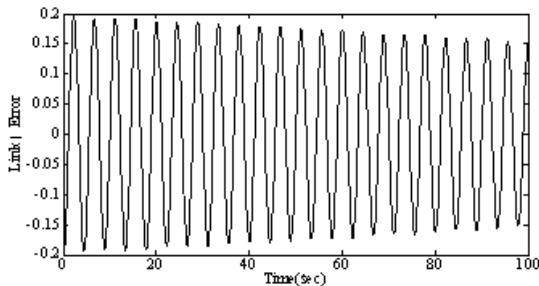
$$x_d(t) = \sin(0.1^* \pi t) \quad (30)$$

همان طور که در فصل دوم بیان شد، می توان معادلات دینامیکی یک بازوی مکانیکی دو لینکی را به صورت زیر نوشت:

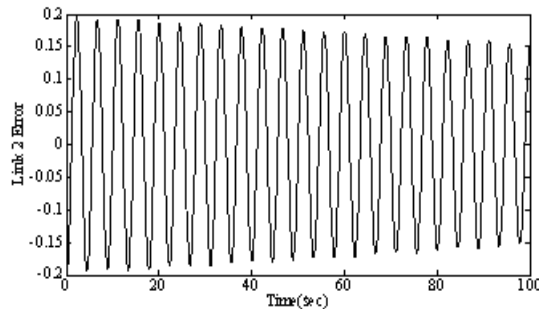
$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + g(q) \quad (31)$$

### ۳-۱- به کارگیری کنترل کننده کلاسیک

برای نشان دادن کارآمدی کنترل کننده پیشنهادی ابتدا یک کنترل کننده PID  $(u_k = -50(e - 5\frac{de}{dt} + \frac{1}{500}\int_0^t e dt))$  بر روی سیستم مورد نظر پیاده سازی می شود. نتایج مربوط به کنترل کننده کلاسیک را می توان در شکل های (۱) تا (۴) مشاهده نمود. شکل های (۱) و (۲) به ترتیب نشان دهنده موقعیت بازوهای اول و دوم می باشند. همچنین شکل های (۳) و (۴) نیز نشان دهنده خطای ردیابی بازوها می باشند.



شکل (۱): خطای ردیابی بازوی اول تحت کنترل کننده PID  
Fig. (1) Tracking error of the PID controller- link 1



شکل (۲): خطای ردیابی بازوی دوم تحت کنترل کننده PID  
Fig. (2) Tracking error of the PID controller- link 2

همان طور که در شکل ها دیده می شود کنترل کننده کلاسیک به کار گرفته شده از کارایی خوبی برخوردار نیست و دامنه خطای ردیابی زیاد می باشد و سیستم به حالت نوسانی در می آید.

### ۳-۲- به کارگیری کنترل کننده فازی- تطبیقی

سپس کنترل کننده پیشنهادی بر روی سیستم مورد نظر پیاده سازی می شود. کنترل کننده پیشنهادی به صورت زیر می باشد:

$$u = \frac{(a_0 + a_1 e^1 + \dots + a_{m-1} e^{m-1}) - \tilde{B}\psi(z) + r^m + u_R}{\tilde{C}\phi(x)} \quad (31)$$

با استفاده از دینامیک خطا در رابطه (۴-۲۱) می توان مشتق  $V_1$  را به صورت زیر بیان کرد:

$$V_1 = e^T (A^T p + pA)e + 2e^T pb [\tilde{B}\psi(z) + \tilde{C}\phi(x)u - u_R - \Delta] \quad (24)$$

که با توجه به رابطه (۱۶) می توان رابطه بالا را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\dot{V}_1 = -e^T Qe + 2e^T pb[\tilde{B}\psi(z) + \tilde{C}\phi(x)u - u_R - \Delta] \quad (25)$$

حال با استفاده از روابط بالا می توان مشتق تابع لیاپانف کلی را به صورت زیر نوشت:

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = -e^T Qe + 2e^T pb[\tilde{B}\psi(z) + \tilde{C}\phi(x)u - u_R - \Delta] + \frac{2}{\gamma_B} \tilde{B}\dot{B} + \frac{2}{\gamma_C} \tilde{C}\dot{C} + \frac{2}{\gamma_\rho} \tilde{\rho}\dot{\rho} \quad (26)$$

و با توجه به فرض محدود بودن لینکها:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -e^T Qe + 2e^T pb(\tilde{B}\psi(z)) \\ & - 2e^T pb(\tilde{\rho} \operatorname{sgn}(e^T pb)) + 2e^T pb(\tilde{C}\phi(x)u) \\ & + 2|e^T pb|\rho + \frac{2}{\gamma_B} \tilde{B}\dot{B} \\ & + \frac{2}{\gamma_C} \tilde{C}\dot{C} + \frac{2}{\gamma_\rho} \tilde{\rho}\dot{\rho} \end{aligned} \quad (27)$$

که می توان معادله فوق را به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -e^T Qe + 2[e^T pb\tilde{B}\psi(z) + \frac{1}{\gamma_B} \tilde{B}\dot{B}] + \\ & 2[e^T pb\tilde{\rho} \operatorname{sgn}(e^T pb) + \frac{1}{\gamma_C} \tilde{C}\dot{C}] \\ & + 2[-|e^T pb|\tilde{\rho} + \frac{1}{\gamma_\rho} \tilde{\rho}\dot{\rho}] \end{aligned} \quad (28)$$

با جایگذاری قوانین تطبیقی معرفی شده خواهیم داشت:

$$\dot{V} \leq -e^T Qe \quad (29)$$

و اثبات کامل می شود.

### ۳- شبیه سازی

در این بخش عملکرد کنترل کننده ارائه شده برای روبات با دو بازوی مکانیکی و دارای نامعینی جرمی با استناد به شبیه سازی کامپیوتری نشان داده می شود.

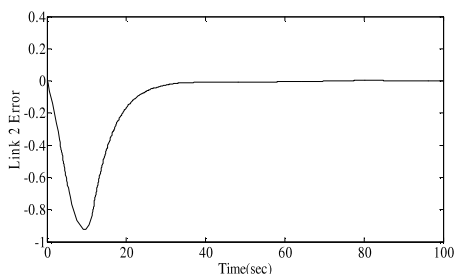
در شبیه سازی انجام شده مقادیر پارامترهای مربوط به بازوهای مکانیکی به صورت زیر می باشند:

$m_1 = 1\text{kg}$  و  $m_2 = 1\text{kg}$  جرم بازوهای مکانیکی،  $L_1 = 1\text{m}$  و  $L_2 = 1\text{m}$  طول بازوهای مکانیکی و  $g = 9.81\text{m/s}^2$  شتاب جاذبه می باشد.

همچنین مقادیر پارامترهای کنترل کننده روبات به صورت زیر می باشند:

$$\gamma_B = \gamma_\rho = 25 \times 10^3, \gamma_C = 250$$

مسیر حرکت مطلوب مجری نهایی روبات در فضای دکارتی با استفاده از رابطه زیر تعیین می گردد:



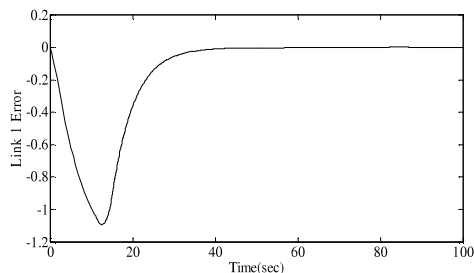
شکل (۴): خطای ردیابی بازوی دوم تحت کنترل کننده تطبیقی-فازی  
Fig. (4) Tracking error of the proposed controller- link2

همان طور که از شکل‌های بالا دیده می‌شود کنترل کننده پیشنهادی دارای عملکرد مطلوبی می‌باشد و خطای ردیابی به صفر رسیده است.

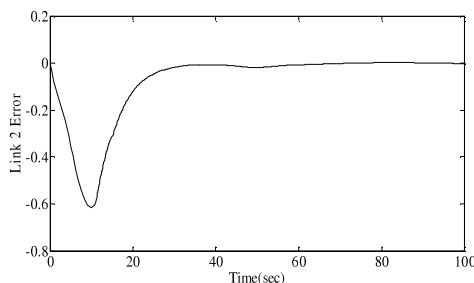
### ۳-۳- شبیه سازی با وجود نامعینی جرمی

از آنجایی که کنترل کننده پیشنهادی یک کنترل کننده تطبیقی می‌باشد باید در برابر تغییر پارامترهای سیستم پایدار بماند. از این رو در این قسمت کنترل کننده پیشنهادی در حالی که پارامترهای سیستم تغییر کرده باشند روی سیستم مورد نظر به کار می‌شود. تغییر پارامترها به شرح زیر می‌باشند:

$$L_2=1.5m, L_1=0.5m, m_2=1.5kg, m_1=0.5kg$$



شکل (۵): خطای ردیابی بازوی اول تحت کنترل کننده تطبیقی-فازی  
Fig. (5): Tracking error of the proposed controller- link1



شکل (۶): خطای ردیابی بازوی دوم تحت کنترل کننده تطبیقی-فازی  
Fig. (6): Tracking error of the proposed controller- link2

پارامترهای طراحی نیز به شرح زیر می‌باشند:

$$\gamma_p = \gamma_B = \gamma_C = 25 * 10^3$$

شکل‌های (۹) تا (۱۲) نشان دهنده نتایج شبیه سازی برای سیستم در حضور نامعینی جرمی می‌باشند. همان طور که دیده می‌شود با وجود

توجه شود که در رابطه بالا  $\tilde{B}\Phi(x)$  و  $\tilde{C}\Phi(x)$  دو تابع فازی می‌باشند به طوری که:

$$\Phi(x) = \frac{\prod_{j=0}^n \mu_{f_j}(x)}{\sum_{l=1}^m \prod_{j=0}^n \mu_{f_j}(x)} \quad (32)$$

در رابطه (۳۱) تابع  $\Psi = \exp(-\|z - \zeta_{\Psi,q}\|^2 / \sigma_{\Psi,q}^2)$  تابع عضویت فازی می‌باشد که در آن  $\zeta_{\Psi,q}$  و  $\sigma_{\Psi,q}$  به ترتیب واریانس و مراکز توابع عضویت می‌باشند. همچنین تابع  $Z$  نیز به صورت  $Z = [x_1, x_2, v, s]$  تعریف شده است.

عدد ثابت  $q$  در این کنترل کننده ۴۰ در نظر گرفته شده و مراکز توابع ذکر شده در رابطه (۳۱) به صورت رابطه زیر تعریف شده‌اند.

$$\zeta_{\Psi,q} = [\zeta_{\Psi,q1}, \zeta_{\Psi,q2}, \zeta_{\Psi,q3}]^T \quad (33)$$

که در بازه‌های  $[-1,1]$  و  $[-5,5]$  و  $[-35,35]$  و  $[-5,5]$  به صورت یکسان توزیع شده‌اند که در این مسئله مقدار مراکز  $\sigma = 0.5$  در نظر گرفته شده است.

در رابطه (۳۱) تابع  $\Phi = \exp(-\|x - \zeta_{\Phi,q}\|^2 / \sigma_{\Phi,q}^2)$  به صورت می‌باشد، که  $\zeta_{\Phi,q}$  و  $\sigma_{\Phi,q}$  به ترتیب واریانس و مراکز توابع عضویت می‌باشند. تابع  $x$  نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x = [x_1, x_2]^T \quad (34)$$

عدد ثابت  $q$  در این کنترل کننده ۲۰ در نظر گرفته شده است. مراکز توابع ذکر شده در رابطه (۳۱) به صورت رابطه زیر تعریف شده‌اند:

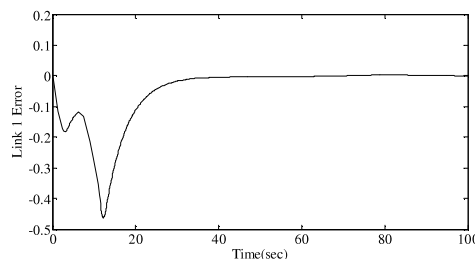
$$\zeta_{\Phi} = [\zeta_{\Phi,q1}, \zeta_{\Phi,q2}]^T \quad (35)$$

که در بازه‌های  $[-5,5]$  و  $[-1,1]$  به صورت یکسان توزیع می‌شوند. واریانس نیز مانند حالت قبل می‌باشد.

قوانین فازی برای کنترل کننده پیشنهادی به صورت زیر می‌باشند.

$$R_L: \text{if } x_1 \text{ is } F_{L1} \text{ and } x_2 \text{ is } f_{L2} \text{ and } v \text{ is } F_{L3} \text{ and } s \text{ is } F_{L4} \text{ then } y_L \text{ is } B_L \quad (36)$$

شکل‌های (۵) و (۶) نشان دهنده موقعیت بازوهای مکانیکی اول و دوم بوده و شکل‌های (۷) و (۸) نیز نشان دهنده خطای ردیابی سیستم در حضور کنترل کننده فازی می‌باشد.



شکل (۳): خطای ردیابی بازوی اول تحت کنترل کننده تطبیقی-فازی  
Fig. (3): Tracking error of the proposed controller- link1

تغییرات در پارامترهای سیستم، کنترل کننده پیشنهادی قادر به پایدارسازی سیستم می‌باشد که نشان دهنده کارآمدی سیستم است. را تضمین می‌کند. در ادامه با پیاده سازی کنترل کننده پیشنهادی روی یک بازوی مکانیکی دو لینکی و مقایسه آن با یک کنترل کننده کلاسیک کارآمدی سیستم مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله پس از مطرح کردن یک مدل دینامیکی برای سیستم و استفاده از یک تابع لیاپانوف و قوانین تطبیقی مناسب به طراحی کنترل کننده فازی- تطبیقی پرداخته شد. که پایداری مجانبی سیستم

#### پی نوشت:

- 1- Recursive NE Algorithm
- 2- Composite-Rigid-Body Algorithm

#### References

- [1] R. Featherstone, "The calculation of robot dynamics using articulated-body inertias", Int. Jou. Rob. Res., Vol. 2, No. 1, pp. 13-30, 1983.
- [2] R. Featherstone, "Robot dynamics algorithms", Boston/Dordrecht/Lancaster: Kluwer Academic Publishers, 1987.
- [3] Y. Stepanenko, M. Vukobratovic, "Dynamics of articulated open-chain active mechanisms", Math.Biosciences, Vol. 28, pp. 137-170, 1976.
- [4] D.E. Orin, R.B. McGhee, M. Vukobratovic, G. Hartoch, "Kinematic and kinetic analysis of open-chain linkages utilizing newton-euler methods", Mathematical Biosciences, Vol. 43, pp. 107-130, Feb. 1979.
- [5] J.Y.S. Luh, M.W. Walker, R.P.C. Paul, "On-line computational scheme for mechanical manipulators", Trans. ASME, Jou. Dyn. Sys., Meas. and Con., Vol. 102, No. 2, pp. 69-76, 1980.
- [6] J.M. Hollerbach, "A recursive lagrangian formulation of manipulator dynamics and a comparative study of dynamics formulation complexity", IEEE Trans. on Sys., Man, and Cyb., Vol. SMC-10, No. 11, pp. 730-736, 1980.
- [7] J. Wittenburg, "Dynamics of systems of rigid bodies", Stuttgart: B. G. Teubner, 1977.
- [8] S. Kawamura, F. Miyazaki, S. Arimoto, "Is a local linear pd feedback control law effective for trajectory tracking of robot motion", IEEE/ROBOT, pp. 1335-1340, Apr. 1988.
- [9] M. Tarokh, H.A. Seraji, "Control scheme for trajectory tracking of robot manipulators", IEEE/ROBOT, pp. 1192-1197, Apr. 1988.
- [10] H. Zhang, G. Trott, R.P. Paul, "Minimum delay PID control of interpolated joint trajectories of robot manipulators", IEEE Trans. on Ind. Elec., pp. 358 - 364, Vol. 37, 1990.
- [11] T. Furuta, K. Tomiyana, "Sliding mode controller with time-varying hyperplane", Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems '96, IROS 96, pp. 576 - 581, Vol. 2, 1996.
- [12] F.S. Chen, J.S. Lin, "Nonlinear backstepping design of robot manipulators with velocity estimation feedback", ACC, pp. 351 - 356, Vol. 1, 2004.
- [13] Y. Kim, J. Seok, I. Noh, S. Won, "An adaptive disturbance observer for a two-link robot manipulator", ICCAS, pp. 141 - 145, 2008.
- [14] S. Ulrich, J.Z. Sasiadek, "Modified simple adaptive control for a two-link space robot", IEEE/ACC, pp. 3654-3659, Jun/July 2010.
- [15] A.T. Vemuri, M.M Polycarpou, "Neural-network-based robust fault diagnosis in robotic systems", IEEE Trans. on Neural Net., Vol. 8, pp. 1410-1420, 1997.
- [16] J.L. Meza, V. Santibanez, R. Soto, M.A. Llama, "Fuzzy self-tuning PID semiglobal regulator for robot manipulators", IEEE Trans. on Ind. Elec., Vol. 59, pp. 2709-2717, 2012.
- [17] C.S. Chen, "Supervisory adaptive tracking control of robot manipulators using interval type-2 TSK fuzzy logic system", IET Con. The. and Appl., Vol. 5, pp. 1796-1807, 2011.
- [18] E.A. Merchan-Cruz, A.S. Morris, "Fuzzy-GA-based trajectory planner for robot manipulators sharing a common workspace", IEEE Trans. on Rob., Vol. 22, pp. 613-624, 2006.
- [19] R.J. Wai, Z.W. Yang, "Adaptive fuzzy neural network control design via a T-S fuzzy model for a robot manipulator including actuator dynamics", IEEE Trans. on Sys., Man, and Cyb., Vol. 38, pp. 1326-1346, 2008.
- [20] R.J. Wai, Y.C. Huang, Z.W. Yang, C.Y. Shih, "Adaptive fuzzy-neural-network velocity sensorless control for robot manipulator position tracking", IET Con. The. and Appl., Vol. 4, pp. 1079-1093, 2010.
- [21] M. Benyakhlef, L. Radouane, "Completely decentralized adaptive fuzzy control for a class of nonlinear interconnected systems", Int. Jou. of Com. Cog., Vol. 6, No. 1, Mar. 2008.