

شناسایی پارامترها و کنترل یک سیستم آکروبات ساخته شده

عباس حریفی^(۱) - حسن صیدی^(۲) - امیر زارع شهری^(۳)

(۱) استادیار - دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه هرمزگان

(۲) کارشناس ارشد - دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تاکستان

(۳) کارشناس ارشد - گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات هرمزگان

تاریخ دریافت: زمستان ۱۳۹۱

تاریخ پذیرش: بهار ۱۳۹۲

خلاصه: هدف از این مقاله، شناسایی پارامترهای یک سیستم آکروبات (که قبلاً توسط مولفان ساخته شده) و طراحی کنترل کننده مناسب برای آن می‌باشد. بدین منظور ابتدا پارامترهای مدل غیرخطی سیستم با استفاده از الگوریتم ژنتیک، در چهار مرحله شناسایی شدند. سپس، یک الگوریتم جدید برای تاب دادن آکروبات پیشنهاد شد. همچنین با خطی سازی مدل، یک کنترل کننده فیدبک حالت بهینه برای حفظ تعادل آکروبات طراحی گردید. ولی از آنجا که این کنترل کننده تنها در نزدیکی نقطه تعادل ناپایدار حاوی پاسخ مناسب بود، با کمک الگوریتم ژنتیک، ضرایب بهینه یک کنترل کننده فیدبک حالت مناسب برای نقاط دور از نقطه تعادل ناپایدار نیز به دست آمد. نتایج شبیه سازی در هر مرحله بیانگر کارایی مناسب شیوه‌های پیشنهادی می‌باشد.

کلمات کلیدی: آکروبات، شناسایی، الگوریتم ژنتیک، تحریک ناقص، رگولاتور خطی مرتبه دوم.

۱- مقدمه

سیستم‌های تحریک ناقص^۱، سیستم‌های مکانیکی هستند که در آنها تعداد ورودی‌ها از تعداد درجات آزادی کم‌تر می‌باشد. این سیستم‌ها می‌توانند وظایف پیچیده را با تعداد محرک‌های کمتری انجام دهند و از مزایایی مانند سبکی، ارزان، مصرف انرژی کم‌تر و قابلیت اطمینان بالاتر برخوردار می‌باشند [۱]. از این رو اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. ولی به دلیل غیرخطی بودن دینامیک، کنترل این سیستم‌ها بسیار مشکل می‌باشد [۲].

آکروبات یک مثال بسیار خوب از سیستم‌های تحریک ناقص است. این سیستم، یک بازوی روبات دو درجه آزادی با مفاصل دورانی است که مفصل اول آن منفعل و مفصل دوم آن فعال می‌باشد. هدف کنترلی در این سیستم، انتقال بازو از نقطه تعادل پایدار (وضعیتی که در آن هر دو بازو به صورت کاملاً عمودی آویزان هستند) به نقطه تعادل ناپایدار (وضعیتی که در آن هر دو بازو به صورت کاملاً عمودی رو به بالا قرار دارند) می‌باشد. بسیار معمول است که در کنترل سیستم‌های غیرخطی پیچیده، از کنترل کننده‌های مختلف جهت رسیدن به اهداف کنترلی محلی و سوئیچ بین آنها جهت رسیدن به هدف کنترلی نهایی استفاده

شود [۳]. استراتژی کنترل سیستم‌های تحریک ناقص نیز بر اساس این ایده می‌باشد [۴] و [۵].

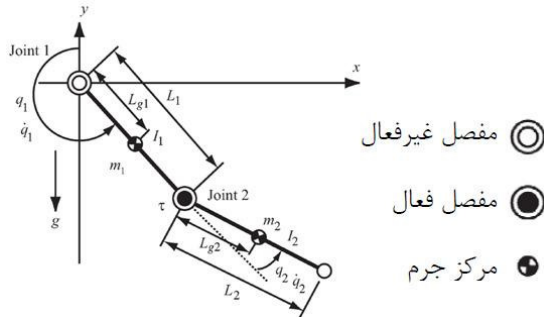
بدین ترتیب معمولاً برای کنترل آکروبات، فضای حرکتی بازوها به دو زیر فضا تقسیم می‌شود: زیر فضای پایدارسازی که اطراف نقطه تعادل ناپایدار سیستم می‌باشد و زیر فضای تاب دادن^۲ که بقیه فضا را شامل می‌شود [۶]. برای هر کدام از این ناحیه‌ها، روش‌های کنترلی متفاوتی پیشنهاد شده است. برای مثال، برای ناحیه پایدارسازی می‌توان به کنترل کننده‌های مبتنی بر شیوه کنترل مدلفزشی^۳ [۷]، رگولاتور خطی مرتبه دوم^۴ [۸] و جدول بندی بهره بر اساس تابع لیاپانوف [۹] اشاره کرد. همچنین در زمینه تاب دادن نیز روش‌های مختلفی مانند کنترل مبتنی بر انرژی [۱۱] و [۱۰]، برنامه ریزی پویا [۱۲]، شبکه‌های عصبی [۸] و فازی [۱۳] ارائه شده است.

برای طراحی کنترل کننده لازم است یک مدل دقیق از سیستم کنترل شونده در اختیار باشد. به دست آوردن مدل سیستم آکروبات با استفاده از روابط فیزیکی به سادگی قابل انجام است. اما نکته مهم تعیین دقیق مقدار پارامترهای مدل می‌باشد که معمولاً با استفاده از روش‌های شناسایی انجام می‌شود. شیوه‌های متعددی برای شناسایی

بخش (۵) نتایج شبیه سازی کنترل کننده های طراحی شده را نشان می دهد. بخش (۶) نیز به نتیجه گیری و پیشنهادات اختصاص دارد.

۲- مدل آکروبات

شکل (۱) طرح شماتیک یک سیستم آکروبات را نشان می دهد که در آن زاویه بازوی i ام، q_i جرم بازوی i ام، m_i طول بازوی i ام، L_{gi} فاصله مفصل i ام تا مرکز جرم بازوی i ام، I_i لختی بازوی i ام و τ گشتاور ناشی از موتور است.



شکل (۱): طرح شماتیک سیستم آکروبات
Fig. (1): Schematic diagram of Acrobot system

معادله حرکت سیستم به صورت زیر بیان شده است:

$$M(q)\ddot{q} + D(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (1)$$

که در آن $q = [q_1 \quad q_2]^T$ و $\tau = [0 \quad \tau_2]^T$ ماتریس اینرسی و $D(q, \dot{q})$ ماتریس نیروی جانب مرکز و نیروی پیچشی است. با این فرضیات معادلات دینامیکی سیستم آکروبات به صورت زیر می باشد [۶]:

$$M(q)\ddot{q} + D(q, \dot{q}) + G(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} \theta_1 + \theta_2 + 2\theta_3 \cos q_2 & \theta_2 + \theta_3 \cos q_2 \\ \theta_2 + \theta_3 \cos q_2 & \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$D(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -\theta_3(2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \sin q_2 \\ \theta_3 \dot{q}_1^2 \sin q_2 \end{bmatrix}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} -\theta_4 \sin q_1 - \theta_5 \sin(q_1 + q_2) \\ -\theta_5 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$

که در آن:

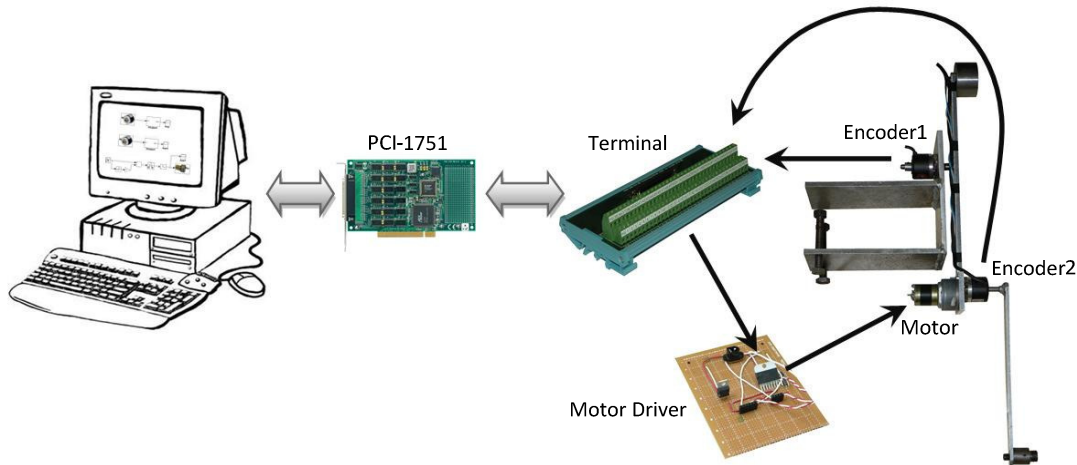
$$\begin{aligned} \theta_1 &= m_1 L_{g1}^2 + I_1 + m_2 L_1^2 \\ \theta_2 &= m_2 L_{g2}^2 + I_2, \quad \theta_3 = m_2 L_1 L_{g2} \\ \theta_4 &= (m_1 L_{g1} + m_2 L_1)g, \quad \theta_5 = m_2 g L_{g2} \end{aligned} \quad (3)$$

پارامترهای سیستم های رباتیک پیشنهاد شده است. برای مثال در [۹] از روش فیلتر کالمن^۵ برای شناسایی پارامترها استفاده شده است. در این روش مدل سیستم به صورتی بازنویسی می شود که پارامترهای مجهول به صورت متغیرهای حالت تعریف شوند. سپس با استفاده از روش فیلتر کالمن مقدار بهینه پارامترهای مجهول تخمین زده می شود. در مرجع [۱۴] از شیوه شناسایی جعبه خاکستری^۶ برای شناسایی پارامترها استفاده شده است. بدین ترتیب که ابتدا مدل خطی شده سیستم حول نقطه تعادل پایدار به دست آمده است. سپس با تحریک سیستم حول نقطه تعادل پایدار و اندازه گیری خروجی ها، پارامترهای مجهول توسط روش های ریاضی تعیین شده است. در زمینه شناسایی پارامترها می توان به مراجع دیگری مانند [۱۷]-[۱۵] نیز اشاره نمود. در این مقاله با استفاده از ابزارهای توانمند نرم افزار MATLAB[®]، داده های عملی از یک سیستم آکروبات ساخته شده استخراج شد و با استفاده از آن، عملیات شناسایی و کنترل انجام گرفت. همچنین با کمک الگوریتم ژنتیک پارامترهای دقیق مدل دینامیکی غیر خطی سیستم شناسایی شدند. کنترل این سیستم شامل دو بخش می باشد. در بخش اول لازم بود کنترل کننده ای جهت تاب دادن و پرتاب بازوها به سمت بالا طراحی شود. هنگامی که بازوی آکروبات حول نقطه تعادل ناپایدار خود قرار گیرد، کنترل کننده دوم وارد عمل می شود که وظیفه آن حفظ تعادل آکروبات به صورت معکوس می باشد. در این مقاله برای تاب دادن آکروبات یک روش جدید پیشنهاد شد که ایده آن از نحوه افزایش سرعت تاب در هنگام تاب سواری کودکان گرفته شده است. همچنین با خطی سازی معادلات دینامیکی به دست آمده، یک رگولاتور خطی مرتبه دوم جهت حفظ تعادل آکروبات طراحی شد. برای افزایش کارایی کنترل کننده لازم بود برای نقاط دور از نقطه تعادل ناپایدار نیز ضرایب فیدبک حالت محاسبه شود. لذا بدین منظور ضرایب بهینه جدیدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و بر اساس مدل غیر خطی سیستم محاسبه گردید. نتایج شبیه سازی، بیانگر کارایی بسیار مناسب کنترل کننده های پیشنهادی می باشد.

باید توجه داشت از مزایای خاص این سیستم آکروبات ساخته شده، کنترل توسط کامپیوتر و نرم افزار متلب می باشد که به کاربر این اجازه را می دهد تا هر ایده کنترلی جدید را بدون هیچ تغییر فیزیکی و ساختاری به سهولت بر روی آن پیاده سازی نماید. این امکان موجب می گردد که ساختار کنترل کننده کاملاً باز باشد و سیستم آکروبات ساخته شده بتواند به عنوان یک وسیله آزمایشگاهی برای آموزش مفاهیم کنترلی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

سازماندهی مقاله به این صورت می باشد:

ابتدا در بخش (۲) مدل سیستم آکروبات تشریح شده است. سپس در بخش (۳) روند شناسایی پارامترهای سیستم با استفاده از روش پیشنهادی (شناسایی با کمک الگوریتم ژنتیک) در چهار مرحله ارائه شده است. طراحی کنترل کننده در بخش (۴) آورده شده و در نهایت



شکل (۲): نحوه اتصال سیستم آکروبات ساخته شده به کامپیوتر
Fig. (2): Connection of acrobot system to the computer

کامپیوتر و انجام عملیات شناسایی و کنترل از یک کارت تبادل داده PCI-1751 استفاده شد.

مزیت این کارت سهولت برقراری ارتباط با نرم‌افزار متلب می‌باشد. لذا با استفاده از آن به راحتی امکان شناسایی و کنترل سیستم ساخته شده توسط محیط سیمولینک^۸ به وجود آمد.

در صورتی که معادلات سیستم خطی باشند، تعیین مقدار دقیق این پارامترها می‌تواند با استفاده از روش‌های مرسوم شناسایی سیستم^۹ انجام گیرد. ولی از آنجا که معادلات دینامیکی سیستم آکروبات کاملاً غیر خطی هستند و تعداد پارامترهای مجهول آن زیاد می‌باشد لازم بود شیوه دیگری اتخاذ شود. از این رو در این مقاله از الگوریتم ژنتیک جهت شناسایی پارامترها استفاده شد و برای تسهیل روند شناسایی، با اعمال فرضیات و قیدهای فیزیکی عملیات شناسایی طی چهار مرحله انجام گرفت که در ادامه شرح داده می‌شود.

۳-۱- پارامترهای بازوی اول

برای شناسایی پارامترهای بازوی اول فرض شد که بازوی دوم قفل شده است و دارای هیچ گونه حرکتی نمی‌باشد. زاویه بازوی دوم می‌تواند هر مقداری در نظر گرفته شود ولی با فرض $q_2 = 0, \dot{q}_2 = 0, \ddot{q}_2 = 0$ رابطه (۶) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$(\theta_1 + \theta_2)\ddot{q}_1 - (\theta_4 + \theta_5)\sin q_1 + \theta_6\dot{q}_1 + \theta_7 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) = 0 \quad (7)$$

سپس با قفل کردن بازوی دوم در یک وضعیت ثابت، بازوی اول از یک زاویه اولیه رها و حرکت آن ثبت شد. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک پارامترهای بهینه سیستم به نحوی تعیین شد که تابع هزینه زیر حداقل شود:

$$J = \int_0^{t_f} |q_1 - \hat{q}_1| dt \quad (8)$$

که در آن q_1 مقدار واقعی زاویه بازوی اول و \hat{q}_1 مقدار به دست آمده از طریق شبیه‌سازی می‌باشد. بدین ترتیب هر چه پارامترهای تخمین

برای تکمیل و واقعی‌تر نمودن این مدل لازم است ترم اصطکاک نیز به معادلات اضافه شود. با استفاده از مدل‌های ارائه شده در مراجع [۱۶] و [۱۵] اصطکاک دو مفصل را به صورت زیر در نظر می‌گیریم.

$$F = \begin{bmatrix} \theta_6\dot{q}_1 + \theta_7 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ \theta_8\dot{q}_2 + (\theta_9 + \theta_{10}e^{-\theta_{11}|\dot{q}_2|}) \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در آن $\theta_6 \dots \theta_{11}$ پارامترهای ثابت می‌باشند.

برای محاسبه رابطه بین گشتاور تولیدی موتور و ولتاژ ورودی به آن، با صرف نظر از قطب ناشی از مدار الکتریکی در مقابل قطب مکانیکی رابطه‌ای به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\tau = \theta_{12} E - \theta_{13} \dot{q}_2 \quad (5)$$

که در آن θ_{12} و θ_{13} دو ثابت و E ولتاژ اعمال شده به موتور می‌باشند.

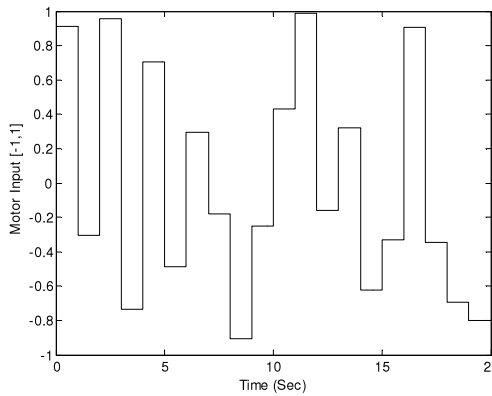
در نهایت مدل سیستم آکروبات به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 + \theta_2 + 2\theta_3 \cos q_2 & \theta_2 + \theta_3 \cos q_2 \\ \theta_2 + \theta_3 \cos q_2 & \theta_2 \end{bmatrix} \ddot{q} + \begin{bmatrix} -\theta_3(2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2)\sin q_2 \\ \theta_3\dot{q}_1^2 \sin q_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\theta_4 \sin q_1 - \theta_5 \sin(q_1 + q_2) \\ -\theta_5 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta_6\dot{q}_1 + \theta_7 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ \theta_8\dot{q}_2 + (\theta_9 + \theta_{10}e^{-\theta_{11}|\dot{q}_2|}) \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \theta_{12}E - \theta_{13}\dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

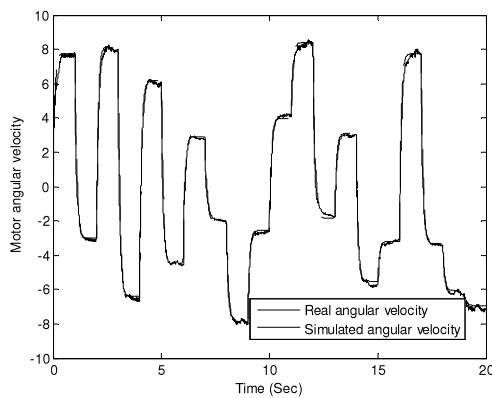
که در آن پارامترهای $\theta_1 \dots \theta_{13}$ ثوابتی مجهولند.

۳- شناسایی پارامترها^۷

شکل (۲) سیستم آکروبات ساخته شده توسط مؤلفان این مقاله و نحوه اتصال آن به کامپیوتر را نشان می‌دهد. برای اتصال این سیستم به



شکل (۴): سیگنال تصادفی اعمال شده به موتور
Fig. (4): Applied random signal to the motor



شکل (۵): مقایسه سرعت زاویه‌ای واقعی موتور و سرعت زاویه‌ای حاصل از شبیه‌سازی

Fig. (5): Comparison between real and simulated angular velocity of the motor

۳-۳- پارامترهای بازوی دوم

برای شناسایی پارامتر ناشی از اثر گرانش بر بازوی دوم، سیستم آکروبات مجدداً به میز متصل شد. سپس با ثابت نگه داشتن بازوی اول $(q_1 = \pi, \dot{q}_1 = 0, \ddot{q}_1 = 0)$ ، یک ورودی تصادفی به موتور اعمال، و حرکت بازوی دوم ثبت شد. با این فرض داریم:

$$\theta_2 \ddot{q}_2 + \theta_5 \sin(q_2) + \theta_8 \dot{q}_2 \dots + (\theta_9 + \theta_{10} e^{-\theta_{11} |\dot{q}_2|}) \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) = \theta_{12} E - \theta_{13} \dot{q}_2 \quad (12)$$

جهت شناسایی پارامتر مجهول $(\frac{\theta_5}{\theta_2})$ از شیوه حداقل‌سازی انتگرال قدر مطلق خطا با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز توابع غیرخطی مقید استفاده شد و نتیجه به صورت زیر به دست آمد:

$$\frac{\theta_5}{\theta_2} = 32.0167 \quad (13)$$

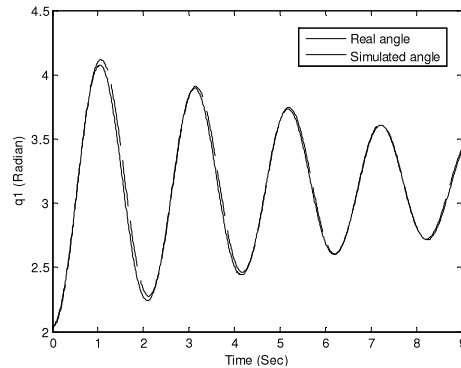
در شکل (۷) زاویه واقعی بازوی دوم در اثر اعمال ورودی تصادفی (شکل (۶)) در مقایسه با زاویه به دست آمده توسط مدل نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این شکل شناسایی مناسب پارامتر بازوی دوم را تایید می‌کند.

زده شده به پارامترهای واقعی نزدیکتر باشند، q_1 به \hat{q}_1 نزدیکتر می‌شود و مقدار J کمتر خواهد شد.

بدین ترتیب پس از عملیات بهینه‌سازی، پارامترهای بهینه به صورت زیر به دست آمدند:

$$\frac{\theta_4 + \theta_5}{\theta_1 + \theta_2} = 10.031, \quad \frac{\theta_6}{\theta_1 + \theta_2} = 0.202, \quad \frac{\theta_7}{\theta_1 + \theta_2} = 0.041 \quad (9)$$

شکل (۳) زاویه واقعی بازوی اول را به همراه زاویه حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد.



شکل (۳): مقایسه زاویه واقعی بازوی اول و زاویه حاصل از شبیه‌سازی
Fig. (3): Comparison between real and simulated angle of the first link

۳-۲- پارامترهای موتور

برای شناسایی پارامترهای رفتار گذرای موتور، سیستم آکروبات به صورتی بر روی میز قرار داده شد که بازوی دوم بتواند به صورت افقی حرکت کند. سپس با نگه داشتن بازوی اول، مانع حرکت آن شدیم $(q_1 = 0, \dot{q}_1 = 0, \ddot{q}_1 = 0)$. بدین ترتیب معادله حرکت بازوی دوم، ناشی از گشتاور موتور به صورت زیر به دست آمد:

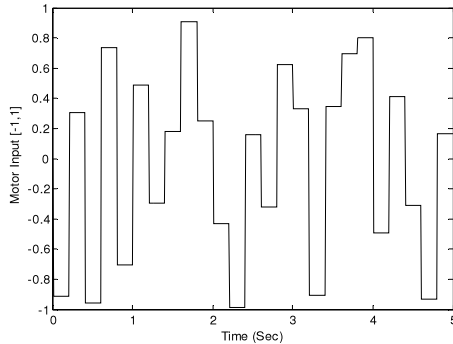
$$\theta_2 \ddot{q}_2 + \theta_8 \dot{q}_2 + (\theta_9 + \theta_{10} e^{-\theta_{11} |\dot{q}_2|}) \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) = \theta_{12} E - \theta_{13} \dot{q}_2 \quad (10)$$

همانند بازوی اول یک ورودی تصادفی به موتور اعمال شد و پاسخ به دست آمده از آن ثبت شد. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک و انتخاب معیار بهینگی انتگرال قدر مطلق خطا، پارامترهای بهینه رابطه (۱۰) به صورت زیر تخمین زده شد:

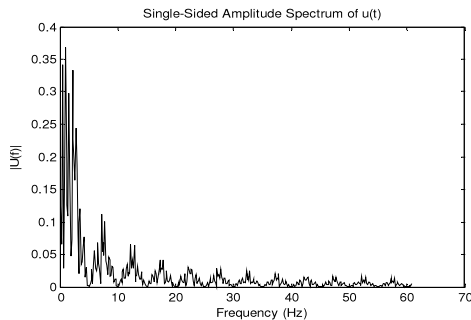
$$\frac{\theta_8}{\theta_2} = 13.4137, \quad \frac{\theta_9}{\theta_2} + 7.7833, \quad \frac{\theta_{10}}{\theta_2} = 11.6997 \quad (11)$$

$$\frac{\theta_{11}}{\theta_2} = 12.1238, \quad \frac{\theta_{12}}{\theta_2} = 106.0742, \quad \frac{\theta_{13}}{\theta_2} = 9.982$$

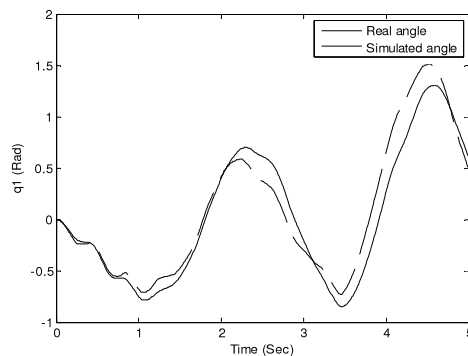
شکل (۴) ورودی تصادفی اعمال شده به موتور و شکل (۵) سرعت زاویه‌ای واقعی موتور در مقایسه با سرعت زاویه‌ای حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اختلاف بین این دو مقدار بسیار ناچیز است. از این رو پارامترهای به دست آمده بسیار نزدیک به پارامترهای واقعی می‌باشند.



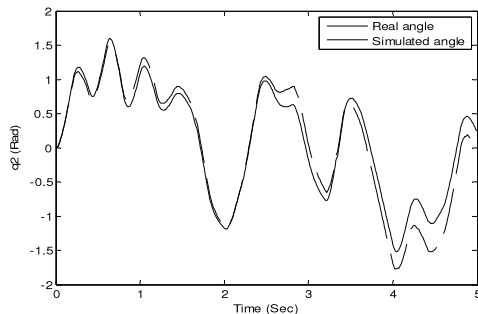
شکل (۸): ورودی تصادفی اعمال شده به موتور
Fig. (8): Applied random signal to the motor



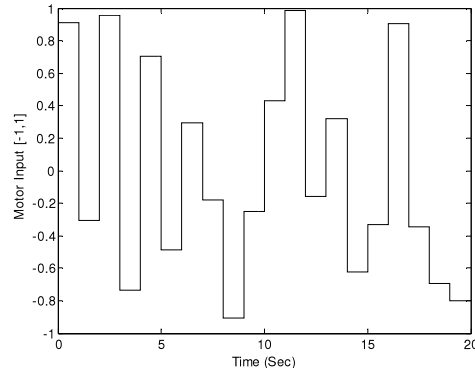
شکل (۹): طیف فرکانسی سیگنال ورودی به سیستم
Fig. (9): Spectrum of input signal



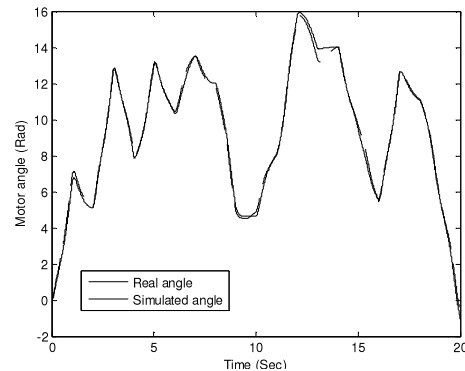
شکل (۱۰): مقایسه زاویه واقعی بازوی اول و زاویه حاصل از شبیه‌سازی
Fig. (10): Comparison between real and simulated angle of the first link



شکل (۱۱): مقایسه زاویه واقعی بازوی دوم و زاویه حاصل از شبیه‌سازی
Fig. (11): Comparison between real and simulated angle of the second link



شکل (۶): سیگنال تصادفی اعمال شده به موتور
Fig. (6): Applied random signal to the motor



شکل (۷): مقایسه زاویه واقعی بازوی دوم و زاویه حاصل از شبیه‌سازی
Fig. (7): Comparison between real and simulated angle of the second link

۴-۳- پارامترهای کلی

در مراحل قبل پارامترهای بازوی اول و دوم به صورت مجزا شناسایی شدند. لازم بود پارامترهای θ_1 ، θ_2 و θ_3 که مربوط به اثر متقابل بازوی اول و دوم هستند محاسبه شوند. بدین منظور با اعمال یک ورودی تصادفی به موتور (شکل (۸)) به سیستم بدون قید، زاویه بازوی اول و دوم ثبت گردید.

باید توجه داشت که ورودی اعمالی باید به گونه‌ای باشد که تمام مدهای سیستم را تحریک نماید. بر سیستم حاضر لازم است که ورودی، طیف فرکانسی $0/5$ تا 3 هرتز را پوشش دهد. لذا برای اطمینان از کیفیت سیگنال ورودی، دامنه تبدیل فوریه سیگنال ورودی مورد بررسی قرار گرفت (شکل (۹)). همان گونه که مشاهده می‌شود سیگنال ورودی، طیف مورد نظر را دارا می‌باشد و می‌تواند به عنوان یک تحریک مناسب برای شناسایی پارامترها مورد استفاده قرار گیرد. به مانند مراحل قبل، کل معادلات با اعمال ورودی تصادفی شبیه‌سازی شد و با در نظر گرفتن معیار انتگرال قدر مطلق خطا و استفاده از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای بهینه به دست آمد. پارامترهای به دست آمده به صورت زیر می‌باشد:

$$\theta_1 = 4.3427, \theta_2 = 0.7667, \theta_3 = 0.0036 \quad (14)$$

در سیستم آکروبات می‌توان از بازوی دوم برای ایجاد یک گشتاور مخالف در بازوی اول استفاده کرد. بدین ترتیب که هنگام حرکت بازوی اول به سمت راست، زمانی که سرعت بازو صفر می‌شود و می‌خواهد به سمت چپ حرکت کند کافی است با اعمال یک ورودی به موتور، بازوی دوم را به سمت راست جابجا کنیم. با این عمل یک گشتاور در خلاف جهت یعنی به سمت چپ در بازوی اول ایجاد می‌شود. و برعکس هنگام حرکت بازوی اول به سمت چپ، زمانی که سرعت بازو صفر می‌شود و می‌خواهد به سمت راست برگردد کافی است با اعمال یک ورودی به موتور، بازوی دوم را به سمت چپ جابجا کنیم. این عملیات مبنای کنترل آکروبات در فاز اول می‌باشد. ما با افزایش نوسانات بازوی اول، مقدار گشتاور اعمالی را کاهش می‌دهیم. این مسأله باعث می‌شود که بازوی اول با یک سرعت مناسب وارد ناحیه حفظ تعادل گردد.

۴-۲- فاز دوم (حفظ تعادل)

برای تعیین کنترل‌کننده حفظ تعادل یکی از روش‌های مناسب، استفاده از فیدبک حالت می‌باشد. در این روش حالت‌های سیستم که عبارتند از زاویه بازوی اول، زاویه بازوی دوم، سرعت زاویه‌ای بازوی اول و سرعت زاویه‌ای بازوی دوم هر کدام در یک بهره ضرب می‌شوند و مجموع آنها به عنوان ورودی به سیستم اعمال می‌شود. در این مقاله از شیوه طراحی رگولاتور خطی مرتبه دوم، برای تعیین بهره فیدبک حالت بهینه استفاده شده است. اما باید توجه داشت که برای استفاده از این شیوه، لازم است معادلات فضای حالت سیستم به فرم خطی در اختیار باشند. اما سیستم آکروبات یک سیستم کاملاً غیرخطی است و برای طراحی یک کنترل‌کننده فیدبک حالت بهینه برای آن لازم است حول نقطه تعادل خطی شود. برای این کار از ابزار خطی سازی محیط سیمولینک استفاده شد. رابطه زیر معادله فضای حالت سیستم خطی-ساز شده را نشان می‌دهد:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 6.414 & -0.0811 & -19999 & 66760 \\ 2551 & 321 & 20290 & -45930 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1809 \\ -1244 \end{bmatrix} E \quad (15)$$

پس از یافتن مدل خطی شده سیستم، بهره فیدبک حالت با استفاده از دستور LQR به صورت زیر به دست آمد:

$$K = [-15.03 \quad -5.86 \quad -0.0009 \quad -0.0003] \quad (16)$$

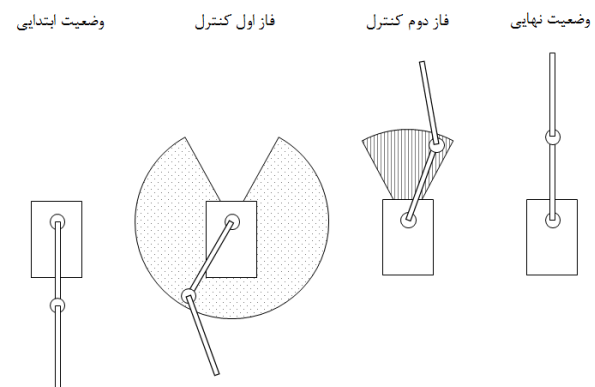
این بهره زمانی مناسب خواهد بود که بازوها بسیار به وضعیت نهایی نزدیک باشند، برای زمانی که بازوها از وضعیت نهایی دورتر باشند، بهره‌ی دیگری تعیین شد. روش پیشنهادی در این مرحله استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور یافتن بهترین بهره ممکن با حداقل نمودن رابطه زیر است:

$$J = \int_0^{t_f} |q_1| dt + \int_0^{t_f} |q_2| dt \quad (17)$$

داده‌های واقعی به دست آمده از سیستم اصلی در قیاس با نتایج شبیه‌سازی حرکت بازوی اول و دوم در شکل (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود اختلاف اندکی بین این نتیجه‌ها رویت می‌شود که می‌تواند ناشی از رفتارهای غیرخطی غیر قابل پیش‌بینی موتور و خطاهای محاسباتی در حین شبیه‌سازی باشد. ولی دقت مدل به دست آمده برای پیش‌بینی رفتار سیستم اصلی کاملاً کافی است.

۴- طراحی کنترل‌کننده

کنترل آکروبات شامل دو فاز مجزا می‌باشد. در ابتدا بازوهای آکروبات به صورت ساکن در وضعیت آویزان (رو به پایین) قرار دارند. در فاز اول، هدف تعیین ورودی موتور به صورتی است که نوسانات بازوی اول را دائماً افزایش دهد تا وارد ناحیه فاز دوم شود. هدف کنترل‌کننده در فاز دوم حفظ تعادل^{۱۱} بازوی اول و رساندن بازوها به وضعیت نهایی است. در وضعیت نهایی باید دو بازو در راستای هم و به صورت کاملاً ایستاده قرار گیرند (شکل (۱۲)).



شکل (۱۲): فاز اول و دوم کنترل آکروبات و نحوه قرارگیری وضعیت ابتدایی و نهایی

Fig. (12): The first and second phase of control and initial and final position of the links

۴-۱- فاز اول (تاب دادن به بالا)

مرحله تاب دادن مرحله‌ای است که طی آن باید نیروهای خاصی از طریق قسمت محرک یعنی موتور به سیستم وارد شود تا آکروبات از نقطه تعادل پایدار (حالت آویزان شده و کاملاً بی‌حرکت) به سمت نقطه تعادل ناپایدار (جایی که در آن آکروبات به صورت کاملاً معکوس می‌باشد) تاب داده و پرتاب شود. برای این کار در مقالات روش‌های متفاوتی ارائه شده است [۱۸]. در این تحقیق از یک شیوه جدید استفاده شد که ایده آن از نحوه افزایش سرعت تاب در هنگام تاب سواری کودکان گرفته شده است. معمولاً برای افزایش سرعت تاب در لحظاتی که تاب در حال تغییر جهت است ضربه‌ای به آن وارد می‌کنیم. این کار باعث می‌شود که در هر مرحله یک مقدار انرژی به سیستم اضافه شود.

همان گونه که مشاهده می شود کنترل کننده پس از ۴ بار جابجا کردن بازوی دوم توانسته مجموعه بازوها را به سمت بالا پرتاب کند و پس از اعمال کنترل کننده های پایدار ساز طراحی شده در روابط (۱۶) و (۱۸)، هر دو بازو را حول زاویه صفر به خوبی کنترل نماید. در انتها برای بررسی مقاومت سیستم نسبت به اغتشاشات، چند ضربه به بازوی دوم وارد شد که نوسات موجود در انتهای بازه (ثانیه ۱۶ به بعد) ناشی از این ضربات می باشد. همان گونه که مشاهده می شود کنترل کننده بدون این که مشکلی در پایداری سیستم به وجود آید، توانست اثر اغتشاشات را از بین ببرد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله مراحل شناسایی پارامترهای یک سیستم آکروبات (ساخته شده توسط مؤلفان)، به همراه طراحی کنترل کننده مناسب آن انجام شد. نتایج نشان می دهد زمانی که مدل سیستم غیر خطی است، الگوریتم ژنتیک شیوه مناسبی برای شناسایی پارمترها و یافتن ضرایب بهینه فیدبک حالت می باشد. روش پیشنهاد شده برای تاب دادن آکروبات اجازه می دهد تا آکروبات با کمترین سرعت ممکنه به سمت نقطه تعادل ناپایدار خود حرکت کند تا کار برای کنترل کننده حفظ تعادل ساده تر شود. در ادامه این تحقیق می توان به سمت طراحی کنترل کننده برای حفظ تعادل بازوهای آکروبات در زوایایی غیر از $q_1=q_2=0$ گام برداشت.

پی نوشت:

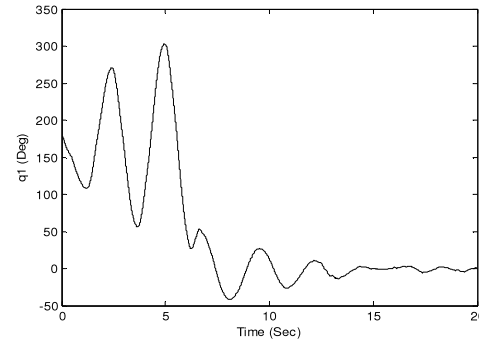
1. Underactuated
2. Swing-up
3. Sliding Mode Control
4. Linear Quadratic Regulator
5. Kalman Filter
6. Gray-Box Identification
7. Identification
8. Simulink
9. System Identification
10. Balance

پس از اجرای الگوریتم ژنتیک، بهره فیدبک حالت بهینه برای مدل غیر خطی به صورت زیر به دست آمد:

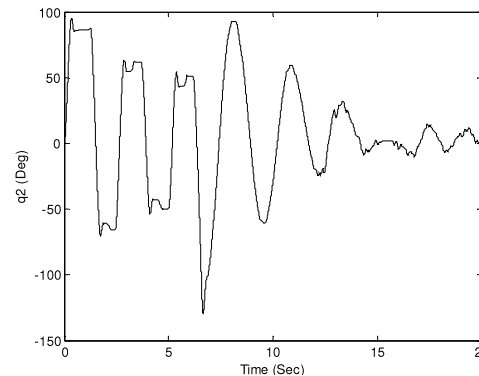
$$K=[-9.97 \quad -4.53 \quad -0.006 \quad -0.009] \quad (18)$$

۵- پیاده سازی کنترل کننده

در شکل (۱۳) و (۱۴)، نتایج حاصل از پیاده سازی الگوریتم های کنترلی پیشنهادی با ضرایب به دست آمده، بر روی سیستم آکروبات نشان داده شده است.



شکل (۱۳): زاویه بازوی اول پس از اعمال کنترل کننده به سیستم
Fig. (13): The first link angle after implementation of the controller to the system



شکل (۱۴): زاویه بازوی دوم پس از اعمال کنترل کننده به سیستم
Fig. (14): The second link angle after implementation of the controller to the system

References

- [1] A. Zhang, J. She, X. Lai, M. Wu, "Motion planning and tracking control for an acrobot based on a rewinding approach", *Automatica*, Vol. 49, No. 1, pp. 278-284, Jan. 2013.
- [2] R. Olfati-Saber, "Normal forms for underactuated mechanical systems with symmetry", *IEEE Trans. on Aut. Con.*, Vol. 47, No. 2, pp. 305-308, Feb. 2002.
- [3] X. Lai, S.X. Yang, J. She, M. Wu, "Singularity avoidance for acrobots based on fuzzy-control strategy", *Rob. and Aut. Sys.*, Vol. 57, No. 2, 2009.
- [4] X. Xin, Y. Liu, "Reduced-order stable controllers for two-link underactuated planar robots", *Automatica*, Vol. 49, No. 7, pp. 2176-2183, July 2013.
- [5] A. Inoue, M. Deng, S. Hara, T. Henmi, "Swing-up and stabilizing control system design for an Acrobot", *IEEE/ICNSC*, London, UK, pp. 559-561, 15-17 April, 2007.
- [6] X.Z. Lai, J.H. She, S.X. Yang, M. Wu, "Comprehensive unified control strategy for underactuated two-link manipulators", *IEEE Trans. on Sys., Man, and Cyb. - Part B: Cybernetics*, Vol. 39, No. 2, pp. 389-398, April 2009.

- [7] R. Xu, Ü. Özgüner, "Sliding mode control of a class of underactuated systems", *Automatica*, Vol. 44, No. 1, 2008.
- [8] S.C. Duong, H. Kinjo, E. Uezato, T. Yamamoto, "A switch controller design for the acrobot using neural network and genetic algorithm", *IEEE/ICCARV*, Hanoi, Vietnam, 17–20 Dec. 2008.
- [9] N. Araki, M. Okada, Y. Konishi, H. Ishigaki, "Parameter identification and swing-up control of an acrobot system", *IEEE/ICIT*, Hong Kong, Dec. 14-17, 2005.
- [10] X. Xin, J. She, T. Yamasaki, Y. Liu, "Swing-up control based on virtual composite links for image-link underactuated robot with passive first joint", *Automatica*, Vol. 45, No. 9, 2009.
- [11] X. Xin, T. Yamasaki, "Energy-based swing-up control for a remotely driven acrobot: Theoretical and experimental results", *IEEE Trans. on Con. Sys. Tec.*, Vol. 20, No. 4, 2012.
- [12] R. Ueda, T. Arai, "Dynamic programming for global control of the acrobot and its chaotic aspect", *IEEE/ICRA*, Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008.
- [13] L. Xuzhi, S. Jinhua, W. Min, Y. Simon, "Solution of singularity problem in motion control of acrobots", *Chinese Control Con.*, Zhangjiajie, Hunan, China, July 2007.
- [14] K. Nji, M. Mehrandezh, "An application of nonlinear parametric identification and control of a minimum phase acrobot", *IEEE/CDC*, San Diego, CA, USA, Dec. 13-15, 2006.
- [15] H. Jahandideh, M. Namvar, "Use of PSO in parameter estimation of robot dynamics; Part Two: Robustness", *ICSTCC*, pp. 1-6, Sinaia, 12-14 Oct. 2012.
- [16] B. Majhi, G. Panda, "Robust identification of nonlinear complex systems using low complexity ANN and particle swarm optimization technique", *Expert Sys. and Appl.*, Vol. 38, No.1, 2011.
- [17] A. Calanca, L. Capisani, A. Ferrara, L. Magnani, "MIMO closed loop identification of an industrial robot", *IEEE Trans. on Con. Sys. and Tec.*, Vol. 19, No. 5, Sep. 2011.
- [18] X. Xin, S. Tanaka, J. She, T. Yamasaki, "New analytical results of energy-based swing-up control for the Pendubot", *Int. Jou. of Non-Linear Mec.*, Vol. 52, 2013.