

کنترل موقعیت یک روبات دو لینکی با استفاده از کنترل کننده فیدبک خروجی دینامیکی فازی

روبات بندباز یک روبات سطحی دو لینکی زیر فعال در صفحه عمودی با یک محرک در قسمت آرنج و یک مفصل شانه‌ای فعال است که رفتار یک انسان آکروبات باز را تقلید می‌کند. به منظور غلبه بر دو مسئله چالش برانگیز کنترل این نوع روبات یعنی تاب خوردن و تعادل، کنترل کننده فیدبک خروجی دینامیکی در این تحقیق طراحی شده است. روش فیدبک خروجی دینامیکی به منظور کنترل بهینه سیستم غیرخطی روبات آکروبات استفاده شده است. همچنین، رویکرد پیشنهادی با کنترل کننده فازی جهت بهینه‌سازی و به‌روز نمودن پارامترهای کنترلی ترکیب می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، عملکرد مناسب کنترل کننده پیشنهادی را در حالات وجود و یا عدم وجود نویز و اغتشاشات نشان می‌دهد.

حمید قدیری^۱

استادیار

حامد خدادادی^۲

استادیار

واژه‌های راهنما: روبات دو لینکی، کنترل کننده فیدبک خروجی دینامیکی، کنترل کننده فازی، روبات آکروبات، نویز، اغتشاشات.

۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت‌های اخیر تکنولوژی در امر استفاده از روبات و همچنین نیاز انسانها به روبات‌هایی با سرعت بالا و کیفیت عالی، ایده استفاده از روبات‌های سبک مطرح شده است. یکی از این سیستم‌ها بازوهای روباتیکی است که کنترل آن‌ها نقش مهمی در تسهیل امور زندگی مدرن ایفا می‌کند. بازوهای روباتیکی عموماً برای تکرار یک کار مشخص به تعداد دفعات زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین کوچکترین بهبود در عملکردشان منجر به صرفه جویی اقتصادی زیادی می‌شود. یکی از این بازوهای روباتیکی، روبات بندباز یا آکروبات است که از یک بازوی دو لینکی در صفحه عمودی تشکیل شده که یک عملگر در قسمت آرنج دارد. یکی از عواملی که اخیراً باعث جذب محققان به طراحی کنترل کننده برای این نوع روبات شده است، تعداد کمتر عملگرها و در نتیجه سادگی طراحی و هزینه کمتر نسبت به روبات‌های n درجه آزادی می‌باشد. در واقع، روبات آکروبات، ساده‌ترین روبات متحرک زیر فعال دو درجه آزادی است که قادر به حرکت است. همچنین، می‌توان روش‌های پیاده شده بر روی روبات بندباز تکه‌ای خطی را به روبات‌های n مفصلی تعمیم داد [۱].

^۱ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکترونیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

h.ghadiri@qiau.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان، ایران khodadadi@iaukhsh.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶

در این مقاله، هدف طراحی یک کنترل کننده مناسب برای این روبات می باشد که ضمن افزایش دقت در عملکرد، سرعت را نیز بهبود ببخشد. از سوی دیگر، کنترل کننده پیشنهادی باید قابلیت پیاده سازی بر روی سیستم واقعی را با رعایت قیود عملی داشته باشد. اولین گام در طراحی کنترل کننده برای این سیستم، به دست آوردن یک مدل ریاضی با یک تقریب خوب است. هرچند به دلیل طبیعت غیرخطی سیستم، طراحی یک سیستم کنترلی موثر با چالش مهمی روبه رو است.

از آنجایی که روش های معمول با پارامترهای از پیش تنظیم شده ثابت نمی توانند کل محدوده عملکرد سیستم را پوشش دهند، می توان نتیجه گرفت که کنترل کننده های سنتی در شرایط مختلف دارای پاسخ کند و غیردقیق به ورودی های مرجع می باشند. بنابراین مسئله طراحی کنترل کننده مناسبی که بتواند تمام پیچیدگی های مدل دینامیک را در فرآیند کنترل لحاظ کند، اهمیت ویژه ای پیدا می کند. مطالعه صورت گرفته نشان می دهد تاکنون روش های مختلفی برای مدل سازی و کنترل این دسته از روبات ها مورد استفاده قرار گرفته است. در [۱] و [۲]، با استفاده از روش های غیرخطی، کنترل سیستم های زیرفعال انجام شده است. هرچند نتایج شبیه سازی این روش ها مطلوب است، پیاده سازی عملی این روش ها و دامنه سیگنال کنترلی قابل تامل آن مشکل می نماید. در [۳]، مدل سازی آکروبات و کنترل آن با استفاده از روش مود لغزشی ارائه شده است. از نقاط بهبود این روش می توان به کاهش زمان دسترسی به مسیر مطلوب اشاره نمود. در [۴] و [۵]، یک مشاهده گر برای سیستم های غیرخطی و روبات آکروبات طراحی شده تا پارامترهایی از سیستم که در دسترس نیستند را بتوان تخمین زد.

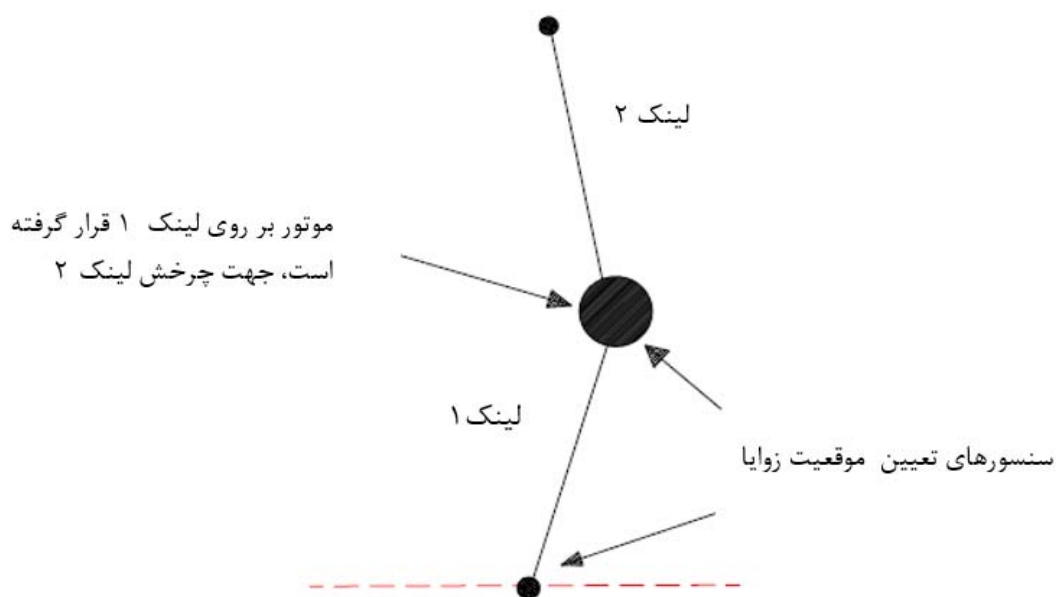
در [۶] و [۷] مدل سازی، رفتار، پایداری و ویژگی های روبات آکروبات مورد تحلیل قرار گرفته است. در [۸]، از روش تکانه ضربه ای برای کنترل نوسان آکروبات استفاده شده است. در [۹]، کنترل آکروبات به روش کنترل انرژی انجام شده است. از معایب این روش، محدودیت شرایط اولیه و دامنه بزرگ سیگنال کنترلی و از محاسن آن دقت ردیابی مناسب می باشد. در [۱۰]، روش کنترل خطی سازی فیدبک و ترکیب آن با شبکه عصبی برای کنترل ربات پیاده سازی شده است. نتایج شبیه سازی نشان دهنده عملکرد خوب کنترل کننده پیشنهادی نسبت به خطی سازی فیدبک و شبکه عصبی به خصوص در مقابل اغتشاشات خارجی می باشد. سایر روش ها شامل کنترل تطبیقی [۱۱]، کنترل بهینه [۱۲] کنترل فازی و PID فازی [۱۳] و [۱۴]، شبکه عصبی [۱۵]، کنترل مدل پیش بین [۱۶] و کنترل مقاوم [۱۷] نیز به منظور کنترل روبات ها مورد استفاده قرار گرفته اند.

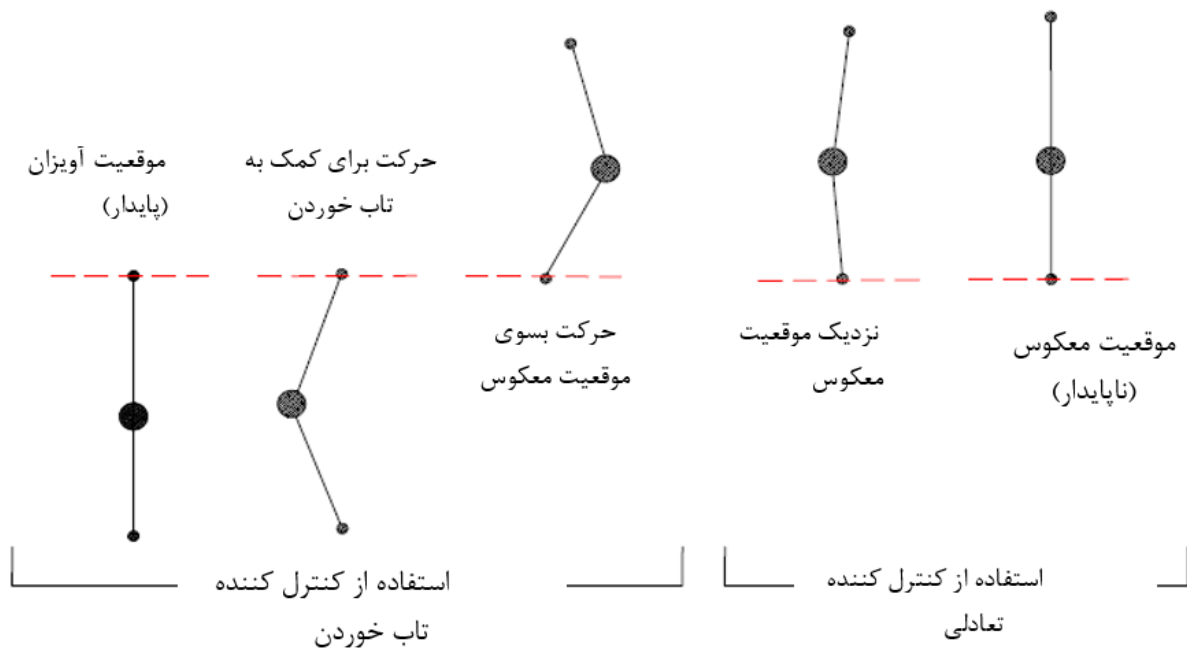
در این مقاله از روش کنترل فیدبک خروجی دینامیکی که قابلیت تطبیق با پارامترهای تغییر کرده مدل دینامیک سیستم را داراست و در یک محدوده عملکرد وسیع، پاسخ بهتری نسبت به کنترل کننده های زیرخط سنتی دارد، استفاده می گردد. این روش یک رویکرد کنترل بهینه غیرخطی را ارائه می کند که هدف از طراحی آن در این تحقیق پایداری روبات آکروبات در حضور اغتشاش ها با حداقل خطا و تلاش کنترلی است. همچنین، روش کنترل فیدبک خروجی دینامیکی با روش کنترل فازی به منظور بهبود عملکرد سیستم ترکیب می شود و کنترل کننده پیشنهادی را تشکیل می دهد. نتایج شبیه سازی روش های مختلف بر روی سیستم مورد بررسی با اعمال ورودی های مرجع مختلف و در حضور نویز و اغتشاشات نشان از عملکرد مطلوب کنترل کننده پیشنهادی در مقایسه با کنترل فیدبک استاتیکی و کنترل فیدبک خروجی دینامیکی دارد.

ساختار مقاله بدین شرح است که بعد از مقدمه ذکر شده در این قسمت، در بخش دوم مدل ریاضی ربات به صورت مختصر معرفی خواهد شد. سپس در قسمت سوم، روش کنترلی پیشنهادی ارائه شده و در بخش چهارم، شبیه‌سازی‌ها برای ورودی‌های مختلف انجام گرفته و نتایج با سایر روش‌ها مقایسه خواهد شد. در قسمت انتهایی، نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

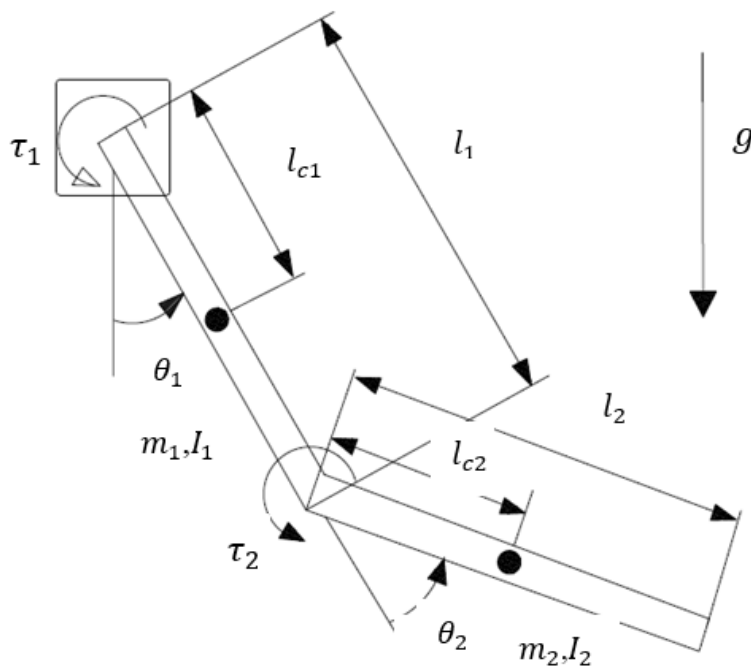
۲- معرفی آکروبات

آکروبات یک ربات سطحی دو لینکی زیر فعال است که رفتار یک انسان آکروبات باز که از طناب آویزان می‌شود و تلاش می‌کند بچرخد تا بوسیله دستانش در یک موقعیت عالی روی طناب تعادلش را حفظ نماید، تقلید می‌کند. در واقع، آکروبات بخاطر شبیه بودنش به انسان آکروبات باز به این نام نامیده شده است. این سیستم یک ربات زیر فعال ناپایدار سودمند است و به‌عنوان یک بستر تست برای مطالعه تئوری و کاربردی از سیستم‌های غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. طراحی یک کنترل‌کننده هوشمند برای دو مسئله چالش برانگیز تاب خوردن و تعادل در کنترل این نوع ربات‌ها مساله بسیار مهمی است. تا به امروز هیچ تئوری مرسوم برای ربات‌های زیر فعال از قبیل آکروبات برای کنترل موقعیت دو لینک با یک ورودی انجام نشده است. در واقع دینامیک غیرخطی روبات، پژوهشگران را مجبور می‌کند تا دو نوع مختلف از کنترل‌کننده یکی برای تاب خوردن و دیگری تعادل ربات به کار گیرند (شکل (۱)) [۲]. در حالت کلی نیز می‌توان روش‌های پیاده شده بر روی آکروبات تکه‌ای خطی را به روبات‌های n مفصلی تعمیم داد [۷]. در شکل (۲)، مدل یک آکروبات نمایش داده شده است. موتور محرک برای حرکت دادن لینک دوم، درست در انتهای لینک اول که به آن متصل شده است قرار دارد. لینک دوم مجاز نیست در یک دایره کامل حرکت کند و در چرخش از لینک اول نمی‌تواند عبور کند. همچنین، یک گشتاور غیرخطی از موتور برای محرک قرار داده شده است.





شکل ۱- موقعیت‌های آکروبات [۲]



شکل ۲- مدل آکروبات [۳]

رفتار دینامیکی به نرخ تغییر حالت و وضعیت بازو نسبت به گشتاور اعمالی به وسیله‌ی موتورهای محرک اطلاق می‌شود و این ارتباط را می‌توان با یک سری معادلات دیفرانسیل به نام معادلات حرکت که بر پاسخ بازو به گشتاور اعمال شده حاکم است، بیان کرد. سپس، می‌توان سیستم کنترل را بر پایه این معادلات دیفرانسیل طراحی کرد. معادلات حاکم بر سیستم آکروبات به صورت رابطه (۱)، قابل نمایش است.

$$\begin{aligned} (I_1 + I_2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 l_{c_2} c_2) \ddot{\theta}_1 + (I_2 + m_2 l_1 l_{c_2} c_2) \ddot{\theta}_2 - m_2 l_1 l_{c_2} s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ - m_2 l_1 l_{c_2} s_2 \dot{\theta}_2^2 + m_1 g l_{c_1} s_1 + m_2 g (l_1 s_1 + l_{c_2} s_{1+2}) = \tau_1 \\ (I_2 + m_2 l_1 l_{c_2} c_2) \ddot{\theta}_1 + I_2 \ddot{\theta}_2 + m_2 l_1 l_{c_2} s_2 \dot{\theta}_2^2 + m_2 g l_{c_2} s_{1+2} = \tau_2 \end{aligned} \quad (1)$$

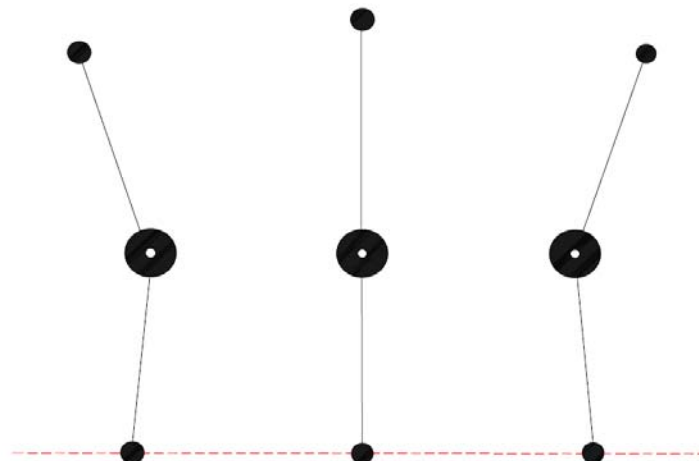
در رابطه (۱)، θ_1 ، θ_2 بیانگر زاویه مفصل‌ها، m_1 ، m_2 جرم لینک‌ها، l_1 ، l_2 طول لینک‌ها، l_{c_1} ، l_{c_2} فاصله از محور چرخش هر لینک را نسبت به مرکز جرم و در نهایت I_1 ، I_2 اینرسی لحظه‌ای از هر لینک یک محور که از صفحه خارج می‌شود و از مرکز جرم آن عبور می‌کند را نشان می‌دهند. تنها ورودی سیستم τ تعریف می‌شود که بعنوان یک گشتاور مثبت سبب می‌گردد θ_2 در جهت خلاف عقربه‌های ساعت افزایش یابد. از آنجایی که در سیستم آروبات تنها یک گشتاور ورودی وجود دارد، بنابراین گشتاور ورودی در مفصل اول یعنی τ_1 صفر می‌باشد. لینک دوم در چرخش کامل آزاد نیست و نمی‌تواند از لینک اول عبور کند. همچنین، $s_i = \sin(\theta_i)$ ، $c_i = \cos(\theta_i)$ ، $i = 1, 2$ می‌باشند.

۳- طراحی کنترل کننده

اولین کنترل کننده‌های گسترش داده شده برای آروبات کنترل کننده‌های تعادلی می‌باشند. تعادل روبات بندباز به معنای نگهداشتن آن در موقعیت معکوس در نزدیکی این موقعیت است. برای تعادل آروبات در نقطه و موقعیت معکوس، باید کنترل کننده‌ای طراحی شود که رفتار سیستم را در نزدیکی نقطه تعادل، پایدار سازد. نقطه تعادل پایدار این روبات در موقعیتی است که لینک‌هایش بصورت عمودی پایین‌تر از مفصل اول آویزان شود. به‌جای یک نقطه تعادل معکوس، دینامیک آروبات موقعیت‌های متنوعی از تعادل معکوس را ایجاد می‌کند. بصورت فیزیکی، آروبات زمانی در موقعیت تعادلی معکوس می‌باشد که مرکز جرم سیستم مستقیماً بالای مفصل اول قرار گیرد. هر موقعیت تعادلی به گشتاور ورودی ثابت و یکتا وابسته است. بنابراین فقط موقعیت کاملاً عمودی معکوس منجر به ورودی گشتاور صفر می‌شود. چندین مورد از موقعیت‌های معکوس در شکل (۳) نشان داده شده است. بنابراین می‌بایست کنترل کننده‌ای طراحی شود تا روبات را فقط در موقعیت کاملاً عمودی متعادل نماید. در این تحقیق کنترل کننده فیدبک خروجی دینامیکی به این منظور طراحی خواهد شد. هدف، به‌دست آوردن یک سیگنال کنترلی مناسب (τ_2) به منظور قرار دادن لینک‌ها در موقعیت‌های تعیین شده می‌باشد.

۳-۱- کنترل کننده فیدبک خروجی دینامیکی

طراحان سیستم‌های کنترلی همواره بر آن بوده‌اند تا با استفاده از روش‌های ارائه شده برای سیستم‌های خطی و تعمیم آن به سیستم‌های غیرخطی به سادگی مورد نظر در طراحی دست یابند. از طرفی دیگر چون سیستم مورد مطالعه در این پژوهش غیرخطی می‌باشد، بنابراین در ابتدا با استفاده از روش ژاکوبین سیستم خطی شده و با استفاده از روش کنترلی فیدبک خروجی دینامیکی، کنترل کننده مناسب برای سیستم خطی شده طراحی می‌گردد. مدل خطی از روبات بندباز به وسیله خطی‌سازی دینامیک آروبات در موقعیت معکوس به‌دست می‌آید. در ادامه کنترل کننده طراحی شده روی سیستم غیرخطی پیاده‌سازی می‌شود.



شکل ۳- چند موقعیت احتمالی تعادل آکروبات [۲]

۳-۱-۱- نقطه تعادل

از لحاظ دینامیکی، نقطه تعادل به نقاطی از سیستم اطلاق می‌شود که در آن سیستم مذکور به شرایط ماندگار رسیده و در نتیجه تغییرات متغیرهای حالت نسبت به زمان صفر باشند. لازم به ذکر است که ابتدا سیستم حول نقطه تعادل $x^* = (\frac{\pi}{2}, 0, 0, 0)$ خطی‌سازی شده و سپس طراحی کنترل‌کننده برای این سیستم انجام می‌پذیرد. در نهایت، کنترل‌کننده فازی به منظور بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی به حلقه کنترلی اضافه می‌گردد.

۳-۲- کنترل‌کننده فیدبک خروجی دینامیکی

در این قسمت کنترل‌کننده فیدبک خروجی دینامیکی بر روی مدل روبات بندباز طراحی می‌شود. سیستم ربات آکروبات پس از خطی‌سازی به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= A_p x_p(t) + B_p u(t) \\ y_p(t) &= C_p x_p(t) + D_p(t) u(t) \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه فوق $x_p \in \mathbb{R}^{n_x}$ بردار حالت سیستم، $u \in \mathbb{R}^{n_u}$ بردار ورودی کنترلی، $y_p \in \mathbb{R}^{n_y}$ بردار خروجی قابل اندازه‌گیری و A_p, B_p, C_p ماتریس‌های ثابت مشخص می‌باشند. در این سیستم $D_p = 0$ می‌باشد. ساختار سیستم کنترلی نیز به صورت رابطه (۳) در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= A_c x_c(t) + B_c y_p(t) \\ u(t) &= C_c x_c(t) + D_c y_p(t) \end{aligned} \quad (3)$$

در رابطه (۳) بردار حالت کنترل کننده و $0 < n_c \leq n_x$ می‌باشند. با اعمال کنترل کننده به سیستم (۲)، ساختار سیستم حلقه بسته به صورت رابطه (۴) بدست خواهد آمد:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A + BKC)x(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، ماتریس‌ها به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شوند و هدف از این روش محاسبه ماتریس K می‌باشد.

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} x_p \\ x_c \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_p \\ x_c \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} A_p & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_p & 0 \\ 0 & I_{n_c} \end{bmatrix}, \\ C &= \begin{bmatrix} C_p & 0 \\ 0 & I_{n_c} \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} D_c & C_c \\ B_c & A_c \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (۵)$$

روند طراحی به طور خلاصه در سه گام شرح داده می‌شود.

گام اول: محاسبه ماتریس‌های رنک کامل ستونی با ابعاد $n_x \times n_c$ ، V و U به صورتی که رابطه (۶) برقرار باشد:

$$VU^T = I - JT \quad (۶)$$

گام دوم: محاسبه پاسخ یکتای $P > 0$ از معادله (۷):

$$\begin{bmatrix} T & I \\ U^T & 0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} I & J \\ 0 & V^T \end{bmatrix} \quad (۷)$$

این معادله همیشه پاسخی برای P دارد، چون $T > 0$ و V رنک کامل ستونی دارد.

گام سوم: با محاسبه ماتریس P از روابط (۷)، ماتریس‌های کنترل کننده (A_c, B_c, C_c, D_c) با حل معادله LMI (۸) و محاسبه ماتریس K به دست می‌آیند.

$$\begin{aligned} G + Y^T KZ + Z^T K^T Y &< 0 \\ K &= \begin{bmatrix} D_c & C_c \\ B_c & A_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (۸)$$

ماتریس‌ها به صورت (۹) تعریف می‌شوند:

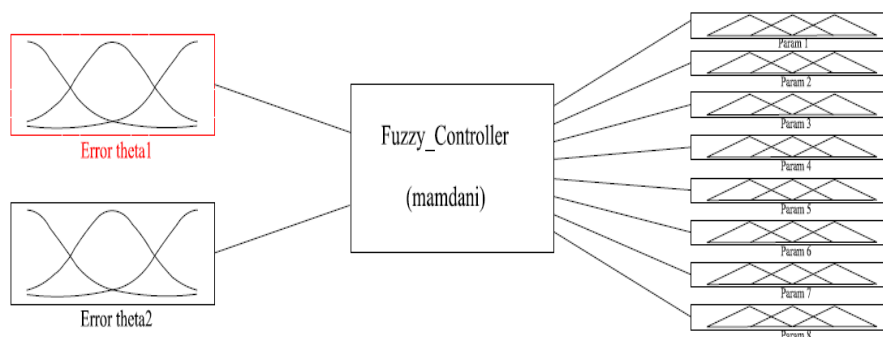
$$\begin{aligned} G &= \begin{bmatrix} -P & (1/r)P(A - qI_{n_x+n_c}) & (1/r)PM & 0_{(n_x+n_c) \times j} \\ (1/r)(A - qI_{n_x+n_c})^T P & -P & 0_{(n_x+n_c) \times t} & N_1^T \\ (1/r)M^T P & 0_{t \times (n_x+n_c)} & -\epsilon^{-1} I_t & 0_{t \times j} \\ 0_{j \times (n_x+n_c)} & N_1 & 0_{j \times t} & -\epsilon I_{j \times j} \end{bmatrix}, \\ Y &= [(1/r)B^T P, 0_{(n_u+n_c) \times (n_x+n_c)}, 0_{(n_u+n_c) \times t}, N_2^T], \\ Z &= [0_{(n_y+n_c) \times (n_x+n_c)}, C, 0_{(n_y+n_c) \times t}, 0_{(n_y+n_c) \times j}] \end{aligned} \quad (۹)$$

نکته: روش طراحی کنترل کننده در [۴] به صورت کامل شرح داده شده است. با توجه به روند طولانی اثبات، از آوردن معادلات کامل خودداری شده است. برای تحلیل رفتار سیستم و یا طراحی کنترل کننده، نیاز به مدل سازی سیستم می‌باشد. مدل سیستم توصیف ریاضی از رفتار سیستم فیزیکی و واقعی آن است. نکته مهم آن است که یک مدل ریاضی هیچ‌گاه نمی‌تواند به طور کامل و دقیق رفتار واقعی سیستم را توصیف نماید و

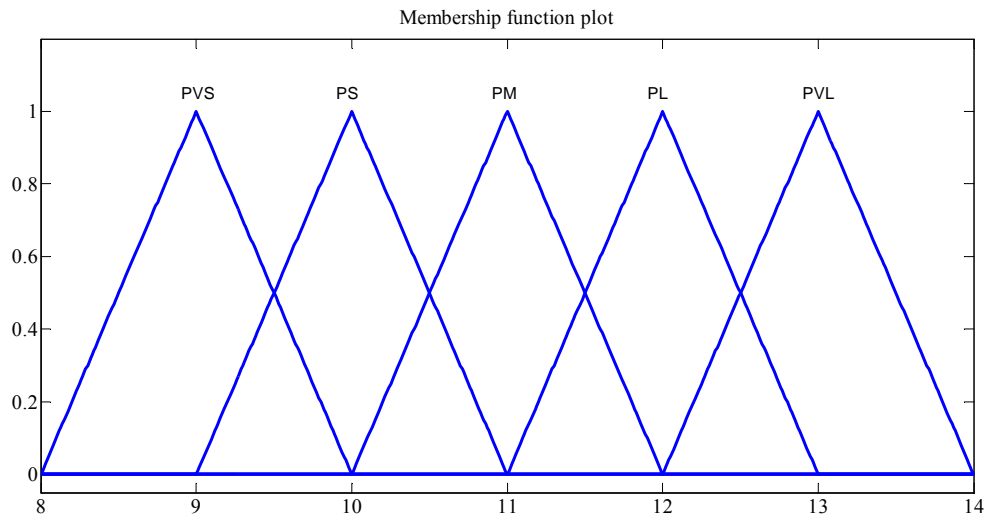
همواره نامعینی وجود خواهد داشت. نامعینی یا عدم قطعیت می‌تواند ناشی از خطی‌سازی سیستم‌های غیرخطی (بدون ساختار) و یا وجود نامعینی در پارامترهای سیستم مثل نامعینی روی جرم جسم (پارامتری) باشد. بنابراین، با توجه به غیرخطی بودن اغلب سیستم‌های عملی، به‌نظر می‌رسد سیستم‌هایی که دارای مدل‌های محلی خطی می‌باشند، مدل مناسبی برای مشخص کردن رفتار این‌گونه سیستم‌ها نیستند. از طرف دیگر ارائه‌ی روش‌های سیستماتیکی برای طراحی کنترل‌کننده که مدل‌های محلی غیرخطی دارند، پیچیدگی زیادی به همراه خواهد داشت. به‌همین دلیل، در بسیاری از رویکردها، مدل‌های محلی را به فرم یک مدل خطی با یک باند نامعینی در نظر می‌گیرند. جهت دستیابی به یک رفتار مقاوم در سیستم مذکور، از روش کنترل فازی استفاده شده است. همان‌گونه که از ساختار سیستم نیز مشخص است ورودی سیستم فازی خطای بین موقعیت ایده‌آل و موقعیت لحظه‌ای آکروبات می‌باشد و خروجی آن پارامترهای ماتریس‌های کنترل‌کننده فیدبک خروجی دینامیکی است. علت استفاده از کنترل‌کننده فازی، ایجاد پاسخ مناسب سیستم کنترلی در شرایط وجود نویز و اغتشاش در سیستم می‌باشد. در واقع کنترل‌کننده فازی با توجه به دامنه خطا، تعدادی از پارامترهای کنترل‌کننده فیدبک خروجی دینامیکی را در یک بازه محدود تغییر می‌دهد تا سیستم کنترلی به پاسخی مطلوب با پارامترهایی بهینه‌تر دست یابد.

۳-۳- طراحی کنترل‌کننده فازی

کنترل فازی یکی از روش‌های پرکاربرد است که به دلیل سهولت طراحی، مقاوم بودن، و عدم نیاز به مدل دقیق سیستم در بسیاری از سیستم مورد توجه قرار گرفته است [۱۳] و [۱۴]. قوانین فازی به‌منظور آموزش و طراحی کنترل‌کننده فیدبک خروجی دینامیکی به‌کار گرفته می‌شوند. توابع عضویت تمامی ورودی‌ها و خروجی‌ها به صورت مثلثی در نظر گرفته شده‌اند. ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها در شکل (۴) نمایش داده شده است. در ضمن قوانین فازی نیز با منطق "و" نوشته شده‌اند و وزن تمامی قوانین با یکدیگر برابر می‌باشد. در واقع دو ورودی سیستم قدر مطلق خطای موقعیت مربوط به زوایای θ_1 و θ_2 و هشت خروجی آن، پارامترهای ماتریس فیدبک خروجی دینامیکی می‌باشند. به‌عنوان نمونه در شکل (۵) توابع عضویت مربوط به پارامتر هشتم خروجی آورده شده است.



شکل ۴- بلوک دیاگرام ارتباط ورودی‌ها و خروجی‌ها در کنترل‌کننده فازی



شکل ۵- توابع عضویت یکی از خروجی‌ها در توابع عضویت مثلثی

جدول قوانین فازی به ازای ورودی‌ها و یکی از خروجی‌ها در جدول (۱) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که برای سایر خروجی‌ها نیز قوانین به صورت مشابه نوشته شده است.

جدول ۱- قوانین تعریف شده برای یکی از خروجی‌ها در توابع عضویت مثلثی

$e_{\theta_1} \backslash e_{\theta_2}$	PVS	PS	PM	PL	PVL
PVS	PVS	PVS	PS	PS	PS
PS	PVS	PS	PS	PM	PM
PM	PS	PS	PM	PL	PL
PL	PS	PM	PL	PL	PL
PVL	PS	PM	PL	PL	PVL

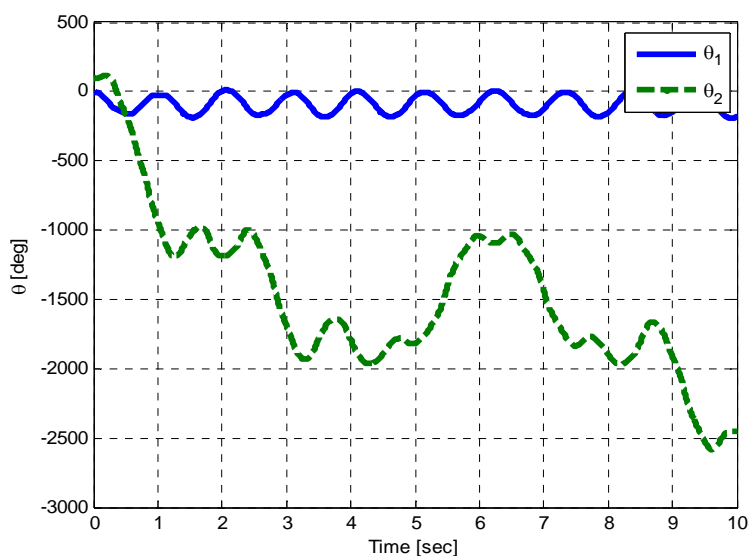
۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به شبیه‌سازی کنترل کننده پیشنهادی برای روبات آکروبات پرداخته خواهد شد. جهت شبیه‌سازی پارامترهای آکروبات به صورت جدول (۲) انتخاب شده‌اند [۲]. در این شبیه‌سازی که به صورت حلقه باز انجام گرفته است، ورودی کنترلی برابر با صفر فرض شده و شرایط اولیه به صورت $(\theta_{1,0}, \theta_{2,0}) = (0, 90) \text{deg}$ و $(\dot{\theta}_{1,0}, \dot{\theta}_{2,0}) = (0, 0) \text{deg/sec}$ در نظر گرفته شده‌اند [۳]. هدف از این شبیه‌سازی‌ها، پاسخ‌گویی به این مسئله است که آیا این سیستم بدون اعمال ورودی کنترلی قادر به انجام وظیفه (جاب‌جایی برخی اجسام از مکانی به مکان دیگر با حداکثر دقت و سرعت ممکن) خود می‌باشد یا نه. نتایج شبیه‌سازی این سیستم با شرایط اولیه ذکر شده، در شکل‌های (۶) و (۷) نمایش داده شده است. همان‌گونه که از شکل‌ها مشخص است، به واسطه عدم وجود کنترل کننده در سیستم، بازوها حرکات نامنظم و بی‌هدفی را انجام می‌دهند که امری بدیهی به نظر می‌رسد. با توجه به شکل‌های (۶) و (۷)، نیاز به یک کنترل کننده مناسب برای این سیستم کاملاً مشخص است. در ادامه با استفاده از کنترل کننده فیدبک خروجی دینامیکی فازی این نوسانات کنترل خواهند شد.

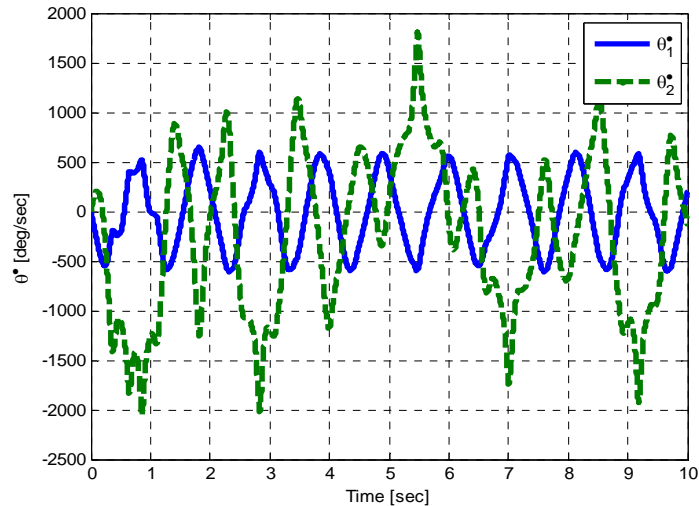
لازم به ذکر است وظیفه اصلی این روبات انجام جابه‌جایی برخی اجسام از مکانی به مکان دیگر با حداکثر دقت و سرعت ممکن می‌باشد. بنابراین هدف سیستم کنترلی کاملاً مشخص است. این سیستم باید در سریع‌ترین زمان و با حداکثر دقت و حداقل هزینه، این جابه‌جایی را انجام دهد.

جدول ۲- پارامترهای مدل آکروبات در شبیه‌سازی [۲]

پارامتر	توضیحات	مقدار	واحد
m_1	جرم لینک اول	۱,۹۰۰۸	kg
m_2	جرم لینک دوم	۰,۷۱۷۵	kg
l_1	طول لینک اول	۰,۲	m
l_2	طول لینک دوم	۰,۲	m
l_{c1}	فاصله از محور چرخش لینک اول تا مرکز جرم آن	۰,۱۸۵۲۲	m
l_{c2}	فاصله از محور چرخش لینک دوم تا مرکز جرم آن	۰,۰۶۲۰۵۲	m
I_1	اینرسی لحظه‌ای لینک اول	۰,۰۰۴۳۳۹۹	kg.m ²
I_2	اینرسی لحظه‌ای لینک دوم	۰,۰۰۵۲۲۸۵	kg.m ²



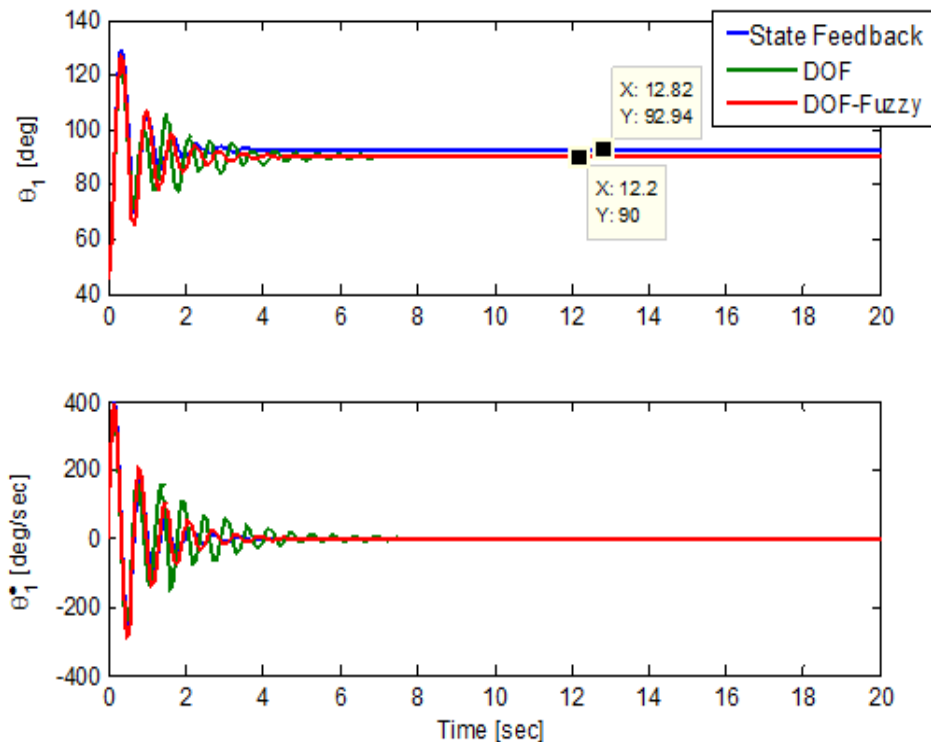
شکل ۶- زوایای لینک‌ها در شرایط حلقه باز



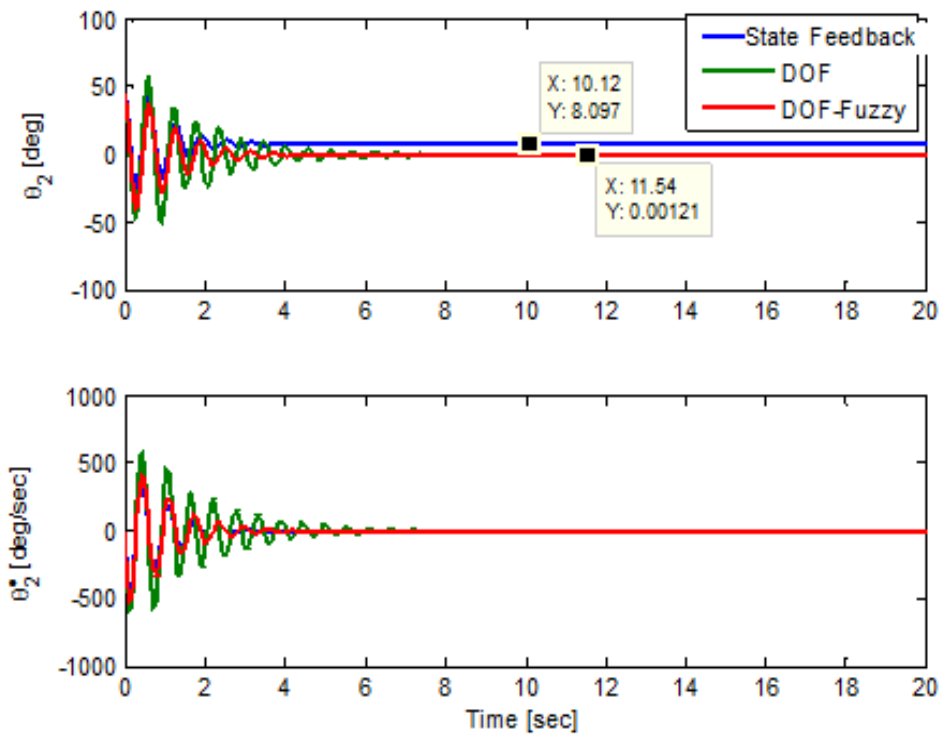
شکل ۷- سرعت زاویه‌ای زوایای لینک‌ها در شرایط حلقه باز

۴-۱- عملکرد کنترل کننده فیدبک خروجی دینامیکی فازی بدون حضور اغتشاش

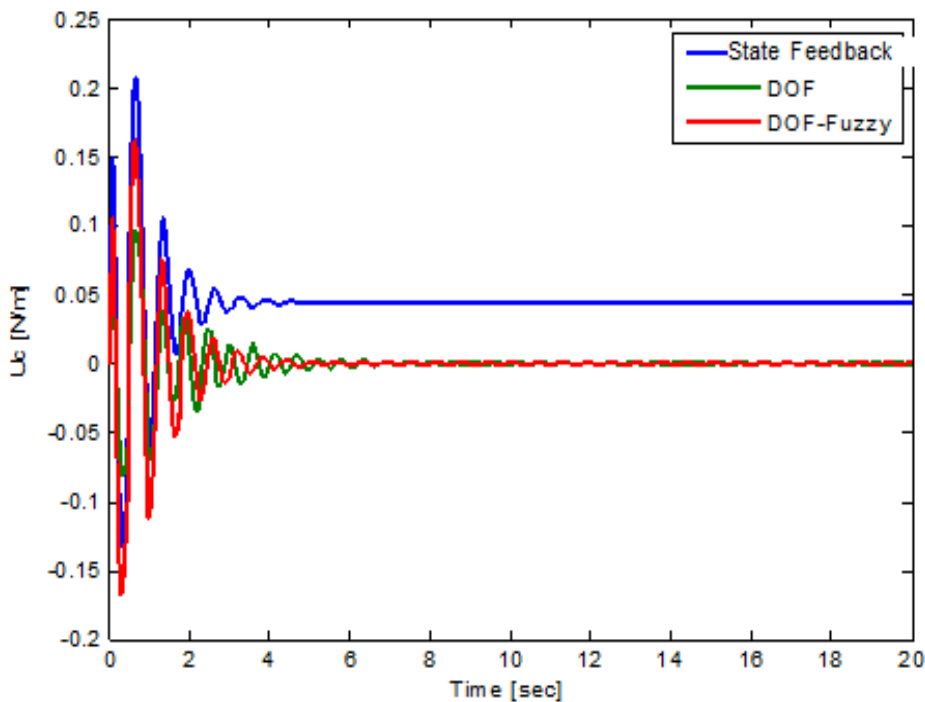
در این بخش عملکرد سیستم کنترلی بدون حضور اغتشاش خارجی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور مقایسه نیز عملکرد کنترل طراحی شده با کنترل کننده فیدبک حالت و همچنین فیدبک خروجی دینامیکی مقایسه شده است. هدف سیستم کنترلی، رسیدن به نقطه تعادل در شرایط اولیه‌های مختلف می‌باشد. در این قسمت شرایط اولیه به صورت $(\frac{7\pi}{36}, 0, \frac{-\pi}{4}, 0)$ در نظر گرفته شده است. شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب رفتار زاویه لینک اول و سرعت زاویه لینک دوم و رفتار زاویه‌های آن را نشان می‌دهد.



شکل ۸- رفتار $\theta_1, \dot{\theta}_1$ بدون حضور اغتشاش و با شرایط اولیه $(\frac{7\pi}{36}, 0, \frac{-\pi}{4}, 0)$



شکل ۹- رفتار $\theta_1, \dot{\theta}_1$ بدون حضور اغتشاش و با شرایط اولیه $(\frac{7\pi}{36}, 0, \frac{-\pi}{4}, 0)$



شکل ۱۰- سیگنال کنترلی بدون حضور اغتشاش و با شرایط اولیه $(\frac{7\pi}{36}, 0, \frac{-\pi}{4}, 0)$

همچنین شکل (۱۰) سیگنال کنترلی یا به عبارت دیگر خروجی کنترلی را نشان می‌دهد. همچنین، جهت بررسی دقیق‌تر عملکرد کنترلی پیشنهادی نسبت به کنترل‌کننده‌های مذکور جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳- مقایسه عملکرد کنترل کننده ها بدون حضور اغتشاش و با شرایط اولیه $(\frac{7\pi}{36}, 0, \frac{-\pi}{4}, 0)$

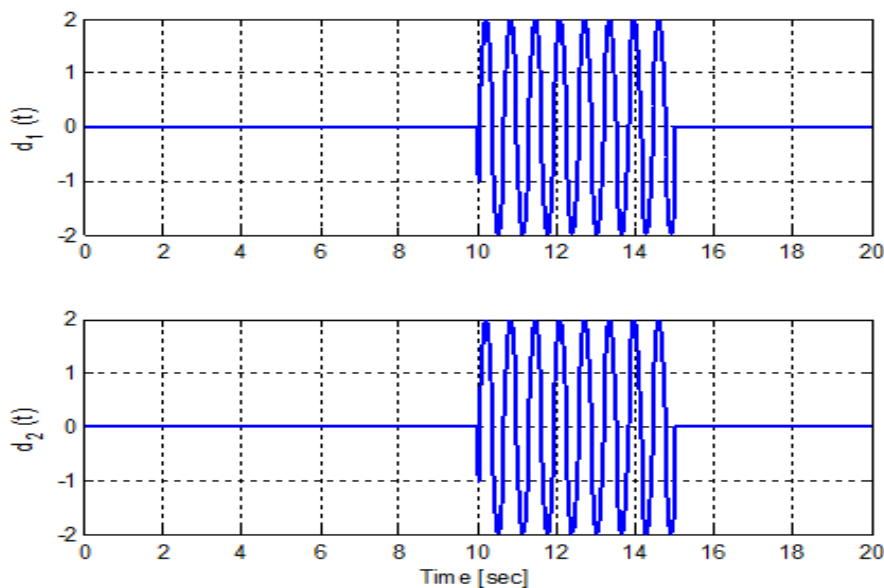
ITAE	ITSE	IAE	ISE	حداکثر زمان نشست (ثانیه)	حداکثر تلاش کنترلی	حالت ردیابی
در حال رشد	در حال رشد	در حال رشد	۳۵,۲۸	۴	در حال رشد	فیدبک حالت استاتیکی
۳۶,۵۸	۷۷,۸۵	۲۱,۷۳	۸۴,۰۷	۵	۰,۱۱۲۸	فیدبک خروجی دینامیکی
۱۲,۹	۲۴,۶۴	۱۳,۰۳	۴۴,۰۳	۴	۰,۱۶۳	فیدبک خروجی دینامیکی فازی

۲-۴- عملکرد کنترل کننده فیدبک خروجی دینامیکی فازی با حضور اغتشاش

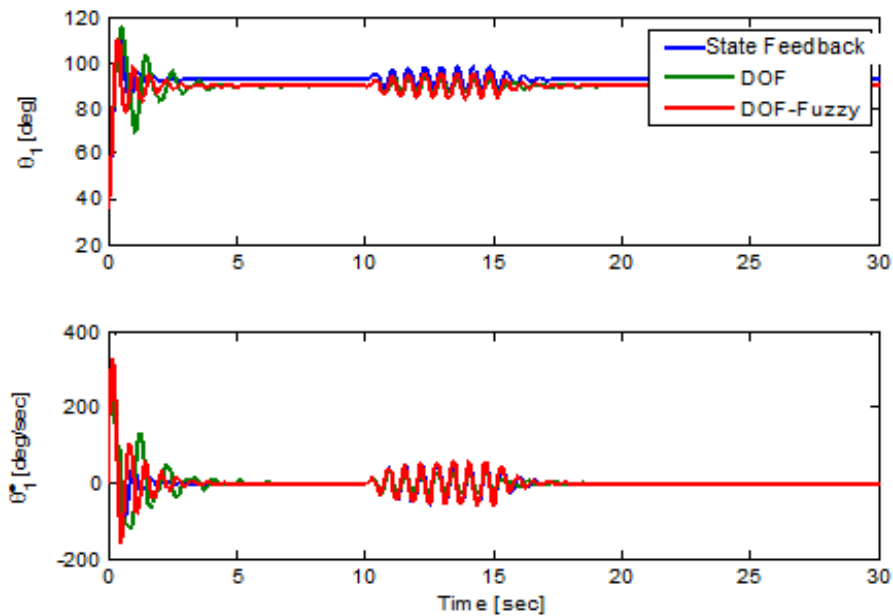
در این بخش عملکرد سیستم کنترلی با حضور اغتشاش خارجی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور مقایسه نیز عملکرد کنترل طراحی شده مانند مراحل قبل با کنترل کننده فیدبک حالت و همچنین فیدبک خروجی دینامیکی مقایسه شده است. هدف سیستم کنترلی رسیدن به نقطه تعادل $x^* = (\frac{\pi}{2}, 0, 0, 0)$ در شرایط اولیه‌های مختلف می‌باشد. اغتشاش اعمالی به سیستم نیز به صورت (۱۰) تعریف می‌گردد:

$$d_1(t) = d_2(t) = \begin{cases} 2\sin 10t & 10 \leq t \leq 15 \\ 0 & \text{other Wise} \end{cases} \quad (10)$$

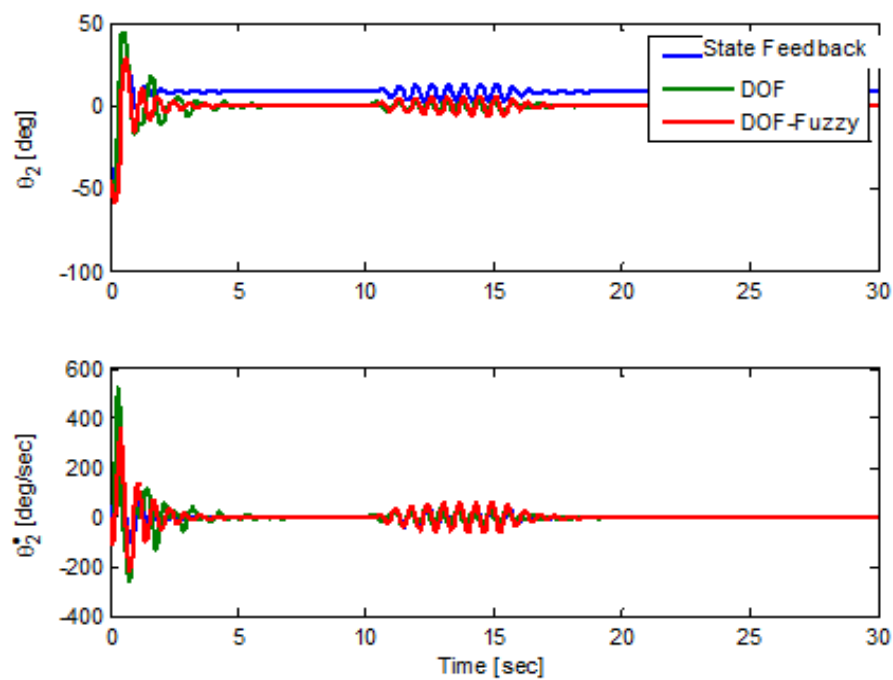
اغتشاش فوق در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- سیگنال اغتشاش اعمالی



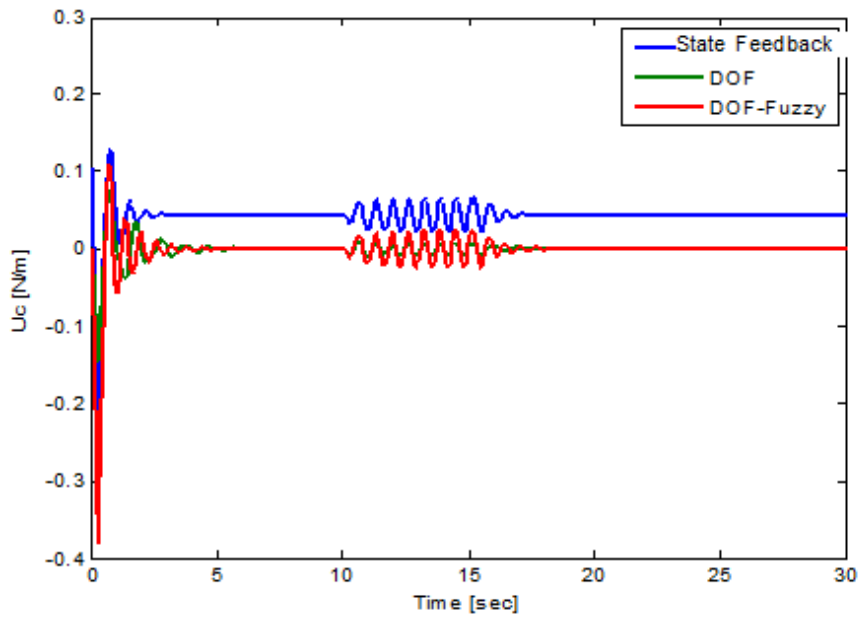
شکل ۱۲- رفتار $\theta_1, \dot{\theta}_1$ با حضور اغتشاش و با شرایط اولیه $(-\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}, 0)$



شکل ۱۳- رفتار $\theta_2, \dot{\theta}_2$ با حضور اغتشاش و با شرایط اولیه $(-\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}, 0)$

در این قسمت شرایط اولیه به صورت $(-\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}, 0)$ در نظر گرفته شده است. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب رفتار زاویه لینک اول و سرعت زاویه‌ای آن و رفتار زاویه لینک دوم و سرعت زاویه‌ای آن را در حضور اغتشاش نشان می‌دهد.

همچنین شکل (۱۴) سیگنال کنترلی یا به عبارت دیگر خروجی کنترل‌کننده را نشان می‌دهد. همچنین جهت بررسی دقیق‌تر عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی نسبت به کنترل‌کننده‌های مذکور جدول (۴) آورده شده است.



شکل ۱۴- سیگنال کنترلی با حضور اغتشاش و با شرایط اولیه $(-\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}, 0)$

جدول ۴- مقایسه عملکرد کنترل کننده ها با حضور اغتشاش و با شرایط اولیه $(-\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}, 0)$

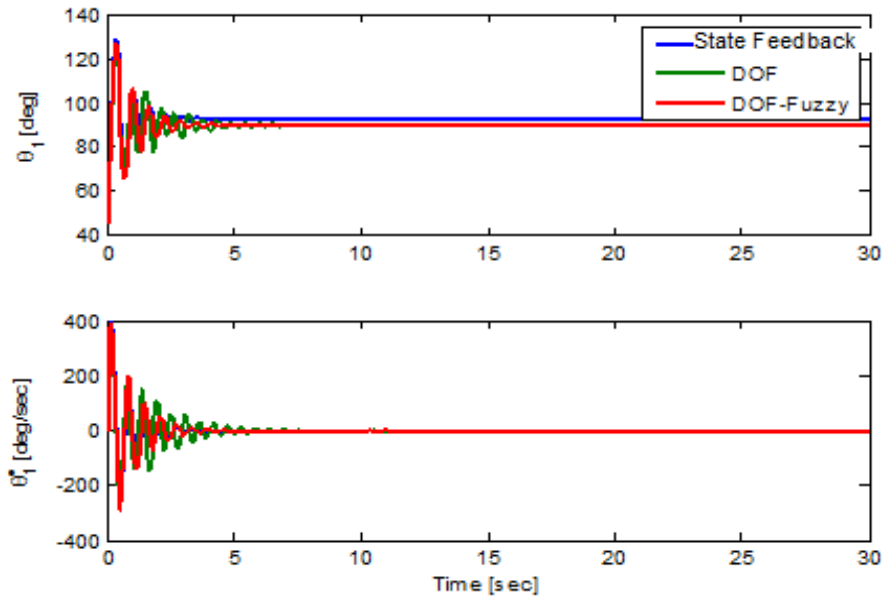
ITAE	ITSE	IAE	ISE	حداکثر زمان نشست (ثانیه)	حداکثر تلاش کنترلی	حالت ردیابی
در حال رشد	در حال رشد	در حال رشد	در حال رشد	۴	در حال رشد	فیدبک حالت استاتیکی
۱۱۰٫۶	۹۳٫۸۷	۲۵٫۷۴	۸۵٫۳	۵	۰٫۱۴۴	فیدبک خروجی دینامیکی
۸۹٫۰۴	۸۳٫۵۷	۲۰٫۲۲	۴۸٫۴	۴	۰٫۲۵۱۱	فیدبک خروجی دینامیکی فازی

۴-۳- عملکرد کنترل کننده فیدبک خروجی دینامیکی فازی با حضور نویز

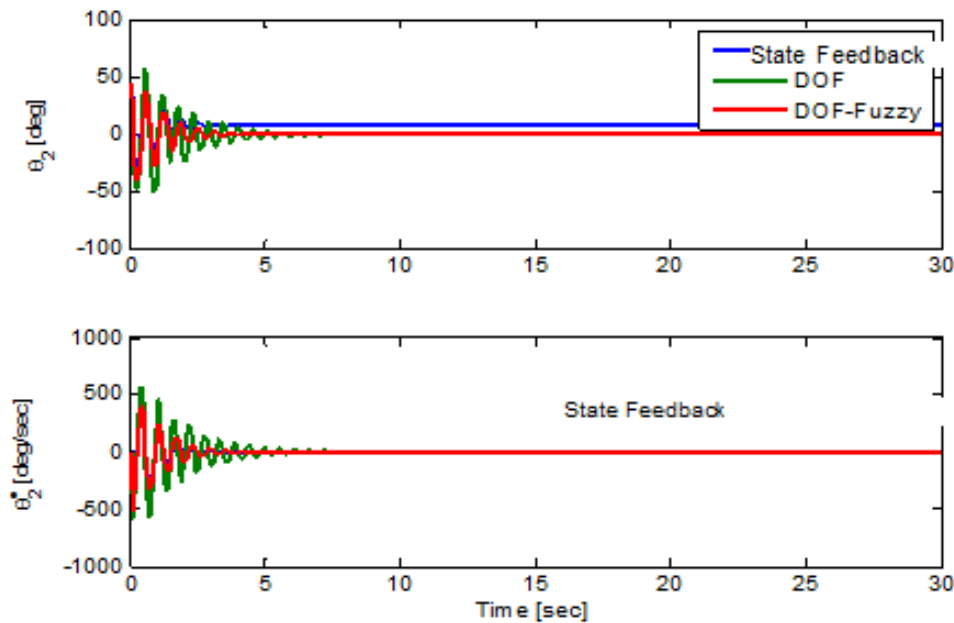
در این بخش عملکرد سیستم کنترلی با حضور نویز خارجی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور مقایسه نیز عملکرد کنترل طراحی شده مانند مراحل قبل با کنترل کننده فیدبک حالت و همچنین فیدبک خروجی دینامیکی مقایسه شده است. هدف سیستم کنترلی رسیدن به نقطه تعادل $x^* = (\frac{\pi}{2}, 0, 0, 0)$ در شرایط اولیه‌های مختلف می‌باشد. نویز اعمالی به سیستم نیز به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌گردد:

$$n_1(t) = n_2(t) = \begin{cases} 2\sin 1000t & 10 \leq t \leq 15 \\ 0 & \text{other Wise} \end{cases} \quad (11)$$

در این قسمت شرایط اولیه به صورت $(\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}, 0)$ در نظر گرفته شده است. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) به ترتیب رفتار زاویه لینک اول و سرعت زاویه‌ای آن و رفتار زاویه لینک دوم و سرعت زاویه‌ای آن را در حضور نویز نشان می‌دهد.

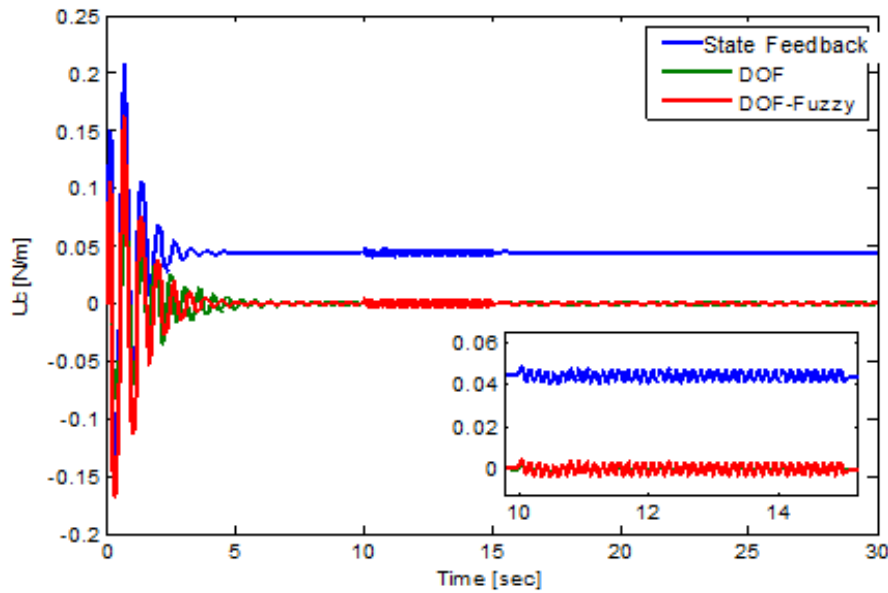


شکل ۱۵- رفتار $\theta_1, \dot{\theta}_1$ با حضور نویز و با شرایط اولیه $(\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}, 0)$



شکل ۱۶- رفتار $\theta_2, \dot{\theta}_2$ با حضور نویز و با شرایط اولیه $(\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}, 0)$

همچنین شکل (۱۷) سیگنال کنترلی یا به عبارت دیگر خروجی کنترل کننده را نشان می‌دهد. همچنین جهت بررسی دقیق‌تر عملکرد کنترل کننده پیشنهادی نسبت به کنترل کننده های مذکور جدول (۵) آورده شده است. با یک مقایسه کلی می‌توان نتیجه گرفت در بحث پیاده‌سازی مدت زمان پیاده‌سازی با استفاده از فیدبک خروجی دینامیکی کمتر از مدت زمان پیاده‌سازی کنترل کننده فیدبک حالت است. در مورد امکان وجود کنترل کننده جهت پایدارسازی و کنترل مقاوم، طراحی براساس فیدبک خروجی دینامیکی سیستم‌های بیشتری را پوشش می‌دهد و تنوع عملکرد با رویکرد فیدبک خروجی دینامیکی بیشتر است.



شکل ۱۷- سیگنال کنترلی با حضور نویز و با شرایط اولیه $(\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}, 0)$

جدول ۵- مقایسه عملکرد کنترل کننده ها با حضور نویز و با شرایط اولیه $(\frac{\pi}{4}, 0, \frac{\pi}{4}, 0)$

ITAE	ITSE	IAE	ISE	حداکثر زمان نشست (ثانیه)	حداکثر تلاش کنترلی	حالت ردیابی
در حال رشد	در حال رشد	در حال رشد	در حال رشد	۴	در حال رشد	فیدبک حالت استاتیکی
۴۰,۵	۷۷,۹۸	۲۲,۱۳	۸۴,۰۸	۵	۰,۱۱۶۲	فیدبک خروجی دینامیکی
۱۷,۰۴	۲۴,۷۶	۱۳,۳۵	۴۴,۰۳	۴	۰,۱۷۳۷	فیدبک خروجی دینامیکی فازی

در یک جمع بندی کوتاه با توجه به نتایج بدست آمده، عملکرد کنترل کننده ها به صورت زیر قابل تشریح است:

- زمان نشست تقریباً برابر در دو روش
- نوسانات ابتدایی کمتر در روش فیدبک حالت نسبت به روش فیدبک خروجی دینامیکی
- وجود خطای حالت ماندگار در روش فیدبک حالت و عدم وجود خطای حالت ماندگار در روش فیدبک خروجی دینامیکی
- وجود سیگنال کنترلی در حالت ماندگار در روش فیدبک حالت و عدم وجود سیگنال کنترلی در حالت ماندگار در روش فیدبک خروجی دینامیکی
- استفاده از اطلاعات کمتر در روش فیدبک خروجی دینامیکی نسبت به روش فیدبک حالت (هزینه کمتر)

- دفع بسیار مناسب اغتشاش در روش فیدبک خروجی نسبت به روش فیدبک حالت با مقایسه انجام گرفته، برتری روش فیدبک خروجی دینامیکی فازی به خصوص با در نظر گرفتن اغتشاشات و نویز کاملاً بدیهی می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که روش پیشنهادی کنترل فیدبک خروجی دینامیکی فازی روش مناسبی برای سیستم روبات بندباز است. در این روش، با در نظر گرفتن مدل خطی شده سیستم، ضرایب ماتریس فیدبک حالت دینامیکی به دست می‌آید. در ادامه، جهت دستیابی به یک رفتار مقاوم، از روش کنترل فازی استفاده می‌شود. مزایای کنترل کننده فیدبک خروجی دینامیکی فازی نسبت به کنترل کننده فیدبک حالت استاتیکی عبارتست از خطای حالت ماندگار بسیار کمتر، سیگنال کنترلی با دامنه کمتر، نیاز به اطلاعات کمتر، مقاوم بودن در مقابل اغتشاش خارجی با دامنه بزرگ و استفاده مستقیم از داده‌های خروجی که هرچند موجب پیچیدگی حل مساله خواهد شد، اما دیگر نیازی به تخمین حالت های سیستم نیست. در نظر گرفتن این نکته که آکروبات یک مدل واقعی است که همواره در معرض اغتشاش، نویز و عدم قطعیت است و کنترل موقعیت برای این دسته ربات‌های متحرک از مسایل چالش برانگیز محسوب می‌شود، اهمیت نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد. همچنین، از آنجایی که در طراحی کنترل کننده تقریباً ملاحظات عملیاتی در نظر گرفته شده است، می‌توان در راستای پیاده‌سازی عملی سیستم آکروبات در محیط آزمایشگاهی تلاش کرد.

مراجع

- [1] Yoo, D. S., "Modeling and Control of an Acrobot using MATLAB and Simulink", World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering Vol. 9, No. 6, pp. 1031-1034, (2015).
- [2] Brown, S. C., and Passino, K. M., "Intelligent Control for an Acrobot", Journal of Intelligent and Robotic Systems Vol. 18, No. 3, pp. 209-248, (1997).
- [3] Soleimanzad, H., Bosche, J., Dahmane, M., and El Hajjaji, A., "Dynamic Output Feedback Control for a Micro Wind Turbine", Energy Procedia, Vol. 83, pp. 350-359, (2015).
- [4] Wang, Z., and Burnham, K. J., "LMI Approach to Output Feedback Control for Linear Uncertain Systems with D-stability Constraints", Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 113, No. 2, pp. 357-372, (2002).
- [5] Zhang, W., Zhao, Y., Abbaszadeh, M., and Ji, M., "Full-order and Reduced-order Exponential Observers for Discrete-time Nonlinear Systems with Incremental Quadratic Constraints", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control Vol. 141, No. 4, pp. 041005, (2019).

- [6] Anderle, M., and Čelikovský, S., "Stability Analysis of the Acrobot Walking with Observed Geometry", IFAC Proceedings Vol. 44, No. 1, pp. 1046-1051, (2011).
- [7] He, B., Zhang, P., Liu, W., and Tang, W., "Dynamics Analysis and Numerical Simulation of a Novel Underactuated Robot Wrist", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 231, No. 12, pp. 2145-2158, (2017).
- [8] Zikmund, J., and Moog, C. H., "The Structure of 2-bodies Mechanical Systems", In Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 6454-6459, San Diego, CA, USA, (2006).
- [9] Jafari, R., Mathis, F. B., and Mukherjee, R., "Swing-up Control of the Acrobot: An Impulse-Momentum Approach", In Proceedings of the 2011 American Control Conference, pp. 262-267, San Francisco, CA, USA, (2011).
- [۱۰] حبیب نژاد کورایم، محرم، علمداری، علی اکبر، "کنترل ربات با استفاده از روش های کنترل غیر خطی و شبکه عصبی"، دومین کنفرانس بین المللی و هشتمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید، (۱۳۸۶).
- [11] Wang, C., "Modeling and Adaptive Control for Multirotor Subject to Thruster Dynamics", IEEE Access, Vol. 7, pp. 44503-44513, (2019).
- [12] Tran, H. C., Tran, V. D., Le, T. T. H., and Nguyen, M. T., "Genetic Algorithm Implementation for Optimizing Linear Quadratic Regulator to Control Acrobat Robotic System", Robotica and Management, Vol. 23, No. 1, pp. 31-36, (2018).
- [13] Alouache, A., and Wu, Q., "Fuzzy Logic PD Controller for Trajectory Tracking of an Autonomous Differential Drive Mobile Robot", Industrial Robot: An International Journal, Vol. 45, No. 1, pp. 23-33, (2018).
- [14] Bonadies, S., Smith, N., Niewoehner, N., Lee, A. S., Lefcourt, A. M., and Gadsden, S. A., "Development of Proportional-integral-derivative and Fuzzy Control Strategies for Navigation in Agricultural Environments", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 140, No. 6, pp. 061007 (6 pages), (2018).
- [15] Glushchenko, A. I., Petrov, V. A., and Lastochkin., K. A., "Adaptive Neural Network Based Control of Balancing Robot in Real Time Mode", In CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2258, pp. 168-178, (2018).
- [16] Ding, Y., Pandala, A., and Park, H. W., "Real-time Model Predictive Control for Versatile Dynamic Motions in Quadrupedal Robots", In 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 8484-8490, (2019).
- [17] Betancourt-Vera, J., Castillo, P., Lozano, R., and Vidolov, B., "Robust Control Scheme for Trajectory Generation and Tracking for Quadcopters Vehicles: Experimental Results", In 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp. 1118-1124, (2018).

فهرست نمادهای انگلیسی

A_p : ماتریس ثابت

B_p : ماتریس ثابت

$c = \cos(\theta)$: کسینوس زاویه مفصل

C_p : ماتریس ثابت

D_p : ماتریس ثابت

I_1 : اینرسی لحظه‌ای لینک اول

I_2 : اینرسی لحظه‌ای لینک دوم

K : ماتریس ثابت

l_1 : طول لینک اول

l_2 : طول لینک دوم

l_{c1} : فاصله محور چرخش تا مرکز جرم لینک اول

l_{c2} : فاصله محور چرخش تا مرکز جرم لینک دوم

m_1 : جرم لینک اول

m_2 : جرم لینک دوم

$s = \sin(\theta)$: سینوس زاویه مفصل

u : بردار ورودی کنترلی

x^* : نقطه تعادل

x_c : بردار حالت کنترل‌کننده

x_p : بردار حالت سیستم

y_p : بردار خروجی قابل اندازه‌گیری

نمادهای یونانی

θ_1 : زاویه مفصل اول

θ_2 : زاویه مفصل دوم

τ_1 : گشتاور ورودی مفصل اول

τ_2 : گشتاور ورودی مفصل دوم

Abstract

An Acrobat robot is a two-link surface robot that emulates the behavior of an acrobat man. This paper designed a dynamic output feedback control strategy to overcome system challenges such as its balancing and swing. This method is employed for the optimal control of the nonlinear model of the acrobat robot. It is important to note that dynamic feedback controllers are preferable to static ones due to their more effective control performances alongside with more degrees of freedom in achieving control objectives.

In addition, the presented approach is incorporated with fuzzy control to optimize and update the parameters of the proposed controller. Simulations are performed in several cases consisting of the nominal system and considering the noise and disturbances. Simulation results demonstrate that the proposed controller in the form of fuzzy dynamic output feedback has a good performance compared to the static and dynamic output feedback in various situations.