

کنترل عملکرد ربات تک بازو با مفصل انعطاف پذیر با عملکرد در صفحه قائم در حضور اغتشاش

علیرضا الفی^۱، محمدرضا جاهد مطلق^۲، محمد فرخی^۳

دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت

a_alfi@iust.ac.ir

چکیده

تأثیر نامناسب اغتشاشات به عنوان جزء لاینفک در سیستم‌ها از یکسو و از سوی دیگر عدم قطعیت در سیستم‌ها، که می‌تواند هم در مدل دینامیکی سیستم و هم در پارامترهای سیستم باشد، استفاده از الگوریتم‌های تطبیقی و مقاوم را برای سیستم‌های غیرخطی ضروری می‌سازد. در این مقاله، با در نظر گرفتن مفروضات فوق، به کمک روش ردیابی با دفع اغتشاشات (Tracking with Disturbance Rejection) که از نوع الگوریتم‌های غیرخطی مدرن می‌باشد، با طراحی یک فیدبک حالت استاتیک به مساله کنترل عملکردی یک ربات تک بازو با مفصل انعطاف‌پذیر با عملکرد در صفحه قائم می‌پردازیم. شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده عملکرد مناسب کنترل‌کننده برای ردیابی تک بازو با مفصل انعطاف‌پذیر با عملکرد در صفحه قائم به همراه سیگنال کنترلی مناسب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ردیابی - کنترل غیرخطی - فیدبک حالت غیرخطی - عدم قطعیت - ربات

مقدمه

که در آن سیستم غیرخطی به سیستمی با فضای حالت کاملاً خطی تبدیل می‌شود. در این روش، پس از تبدیل معادلات حالت غیرخطی به خطی، طراحی کنترل‌کننده برای پایدارسازی یا تعقیب مسیر حالت دلخواه به روش‌های خطی امکان‌پذیر می‌گردد، که به عنوان مثال می‌توان از روش جایابی قطب‌ها استفاده کرد. در این روش، مساله تعقیب مسیر حالت دلخواه بررسی می‌شود که حالت خاص آن مساله پایدارسازی می‌باشد. روش دیگر، خطی‌سازی ورودی-خروجی (Input-Output Linearization) است، که در آن سیستم غیرخطی به یک سیستم نیمه‌خطی تبدیل شده به گونه‌ای که یک رابطه دیفرانسیل خطی بین یک ورودی جدید و خروجی سیستم به وجود آید. اگر چه تا به امروز، این روش‌ها برای حل مسائل کنترل غیرخطی مختلفی بکار رفته است، ولی از یکسو محدودیت آنها در اعمال به سیستم‌ها از جمله عدم قطعیت در پارامترهای سیستم و اغتشاشات، مانع از رسیدن به عملکرد مناسب و یا حتی پایداری این‌گونه

در مورد سیستم‌های غیرخطی، عموماً یک کمیت کیفی برای رفتار مطلوب در حوزه کاری مورد درخواست تعریف می‌گردد، که از شبیه‌سازی کامپیوتری به عنوان ابزار بسیار مناسبی برای پی‌بردن به صحت رسیدن به کمیت کیفی مورد نظر استفاده می‌کنیم. مشخصه کیفی که باید طراح مورد نظر قرار دهد عبارت است از پایداری در محدوده کلی یا در محدوده محلی و خطا و سرعت پاسخ سیستم. با در نظر گرفتن رفتار مطلوب سیستم با مشخصات ذکر شده، یکی از روش‌های مهم در کنترل سیستم‌های غیرخطی، روش خطی‌سازی با فیدبک است [۱]. ایده اصلی این روش استفاده از یک تبدیل جبری برای تبدیل دینامیک سیستم غیرخطی به یک دینامیک کاملاً یا قسمتی خطی است به گونه‌ای که روش‌های کنترل خطی را بتوان به آن اعمال کرد. این روش کنترلی، از دو راه قابل انجام است [۲]. یکی روش خطی‌سازی حالت ورودی (Input-State Linearization)

۱- دانشجوی دکتری

۲- استادیار

۳- استادیار

را تعریف کند [۴]. علاوه بر این می توان $f_{r+1}(x), \dots, f_n(x)$ را به نحوی یافت که رابطه $L_g f_i(x) = 0$ ($i = r+1, \dots, n$) برقرار باشد. ساختار مقاله بدین صورت است که در بخش دوم، مدل ریاضی سیستم و معادلات حاکم بر دینامیک سیستم بیان می گردد. در بخش سوم، روش کنترلی مورد نظر توضیح داده می شود. در بخش چهارم، شبیه سازی ها آورده شده است و در انتها نتیجه گیری حاصل از این کار ارائه شده است.

مدل دینامیکی سیستم

در این بخش، دینامیک ربات تک بازو با مفصل انعطاف پذیر با عملکرد در صفحه قائم ارائه می شود. مهمترین اختلاف ربات تک بازو با مفصل انعطاف پذیر با عملکرد در صفحه قائم با هم نوع خودش در صفحه افقی، حضور جاذبه زمین می باشد، که سبب ایجاد ترم غیر خطی در معادلات دینامیکی سیستم می گردد.

استخراج مدل ریاضی

مدل ریاضی از دینامیک سیستم با استفاده از معادلات لاگرانژ بدست می آید. این سیستم دارای دو درجه آزادی است که یکی مربوط به چرخش محور موتور نسبت به چارچوب مختصات متصل به پایه و دیگری مربوط به چرخش مفصل انعطاف پذیر که بازو به آن متصل است، نسبت به محور موتور می باشد. بنابراین، مختصات کلی شامل موقعیت زاویه ای محور موتور (q) و جابجایی زاویه ای بازوی انعطاف پذیر (a) است که در شکل ۲ نشان داده شده است. مدل ریاضی این سیستم با استفاده از معادلات حرکت لاگرانژ بدست می آید [۵]. انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم را به صورت زیر در نظر می گیریم.

$$k = k_h + k_v, \quad v = v_g + v_s \quad (1)$$

که در رابطه اخیر v_g و v_s به ترتیب انرژی پتانسیل نسبت به جاذبه و جرمها می باشند و k_h و k_l انرژی جنبشی و بار را نشان می دهند، که با معادلات زیر محاسبه می گردند.

سیستمها می گردد. از سویی دیگر، روش فیدبک حالت برای سیستمهای بدون عدم قطعیت نیاز به اندازه گیری حالتها و حذف ترم غیر خطی دارد [۳]. در حالی که در بسیاری از سیستمهای فیزیکی، علاوه بر دارا بودن دینامیک غیر خطی و عدم دسترسی به حالتها، تمام پارامترهای سیستم ممکن است به طور دقیق مشخص نباشند و اغتشاش نیز بر عملکرد سیستم اثر بگذارد. از این رو به الگوریتمهایی نیازمندیم که با وجود عدم قطعیت های سیستم، ضمن دارا بودن خصیصه پایداری، عملکرد مناسب را داشته باشد، که به عنوان مثال می توان به روشهای تطبیقی و مقاوم اشاره کرد [۱]. در این مقاله، جهت برآورده کردن خواسته های مورد نظر، از روش ردیابی با دفع اغتشاش (Traching With Disturbance Rejection) یا به اختصار TDR، به کنترل ربات تک بازو با مفصل انعطاف پذیر با عملکرد در صفحه قائم که دارای عدم قطعیت در پارامتر می باشد، می پردازیم. عملکرد در صفحه قائم این ربات سبب تحمیل یک ترم غیر خطی به صورت سینوسی در معادلات دینامیکی سیستم می گردد که ناشی از انرژی پتانسیل به واسطه جاذبه زمین می باشد. به منظور تاکید، در خطی سازی حالت ورودی-خروجی، سیستم غیر خطی یک ورودی-یک خروجی را در نظر بگیرید. در

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases}$$

این جا، هدف یافتن قانون کنترل به صورت $u = a(x) + b(x)v$ است به گونه ای که سیستم حلقه بسته $\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)a(x) + g(x)b(x)v \\ y = h(x) \end{cases}$ که در شکل ۱ نشان داده شده است، دارای رابطه ورودی-خروجی خطی به فرم $y = G(s)v$ بین ورودی جدید v و خروجی آن y باشد. اگر سیستم مورد نظر دارای درجه نسبی r باشد آنگاه r تابع از تبدیل غیر خطی f به صورت $f_r(x) = L_f^{r-1}h(x)$ انتخاب می شوند که ثابت می شود مستقل خطی هستند. حال اگر $r < n$ ، آنگاه $n-r$ تابع هموار $f_{r+1}(x), \dots, f_n(x)$ وجود دارند به طوری که $f = [f_1(x) \ f_2(x) \dots \ f_n(x)]^T$ یک *diffeomorphism*

$$t = \frac{K_m K_g}{R_m} v - \frac{K_m^2 K_g^2}{R_m} \dot{q} \quad (10)$$

که در آن R_m مقاومت موتور و K_m و K_g پارامترهای ثابت هستند. با انتخاب متغیرهای حالت به صورت $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] = [q \ a \ \dot{q} \ \dot{a}]$ و در نظر گرفتن ولتاژ به عنوان ورودی سیستم (u) و انتخاب موقعیت نوک بازو ($y = x_1 + x_2$) به عنوان خروجی و معادلات (۸) و (۹) در بخش قبل، معادلات حالت حاکم بر سیستم به صورت زیر بدست می آید.

$$\dot{x}_1 = x_3$$

$$\dot{x}_2 = x_4$$

$$\dot{x}_3 = \frac{K_s}{J_h} x_2 - \frac{K_m^2 K_g^2}{R_m J_h} x_3 + \frac{K_m K_g}{R_m J_h} v$$

$$\dot{x}_4 = -\left(\frac{K_s}{J_h} + \frac{K_s}{J_l}\right) x_2 + \frac{K_m^2 K_g^2}{R_m J_h} x_3 - \frac{K_m K_g}{R_m J_h} v + \frac{mgh}{J_l} \sin(x_1 + x_2)$$

حال سیستم را می توان به فرم فضای حالت

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \text{ نوشت که در آن:}$$

$$f(x) = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_4 \\ \frac{K_s}{J_h} x_2 - \frac{K_m^2 K_g^2}{R_m J_h} x_3 \\ -\left(\frac{K_s}{J_h} + \frac{K_s}{J_l}\right) x_2 + \frac{mgh}{J_l} \sin(x_1 + x_2) + \frac{K_m^2 K_g^2}{R_m J_h} x_3 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$g(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_m K_g}{R_m J_h} \\ \frac{K_m K_g}{R_m J_h} \\ -\frac{K_m K_g}{R_m J_h} \end{pmatrix}, \quad h(x) = x_1 + x_2 \quad (12)$$

طراحی کنترل کننده

در این بخش به طور خلاصه به توضیح روش طراحی TDR می پردازیم. قبل از پرداختن به طراحی کنترل کننده پیشنهادی، ابتدا مفهوم مربوط به ردیابی

$$k_h = \frac{1}{2} J_h \dot{q}^2 \quad (2)$$

$$k_l = \frac{1}{2} J_l (\dot{q} + \dot{a})^2 \quad (3)$$

$$v_g = mgh \cos(q + a) \quad (4)$$

$$v_s = \frac{1}{2} k_s a^2 \quad (5)$$

که در آن m جرم بازو، g ثابت گرانش، h ارتفاع مرکز جرم بازو نسبت به وضعیت سکون، J_h اینرسی موجود در خروجی موتور، J_l اینرسی بازو، K_s ضریب سختی فنر و t گشتاور تولیدی موتور است که با ولتاژ اعمالی به موتور (v) تغییر می کند، و ورودی کنترلی سیستم می باشد. قابل ذکر است که مقدار K_s وابسته به روش اتصال فنرها به بازو می باشد، که در این مقاله با در نظر گرفتن روش کوانزر مقدار آن را بدست می آوریم [۵ و ۷].

$$k_s = \frac{2R}{D^{3/2}} ((Dd - Rr^2)F_r + (D^{3/2}d - DLd + Rr^2L)K) \quad (6)$$

$$D = r^2 + (R - d)^2 \quad (7)$$

R نقطه لنگر بازو، d نقطه عمودی لنگر بدنه (Y)، r نقطه افقی لنگر بدنه (X)، k سختی فنرها، F_r نیروی ذخیره شده در فنرها و L طول فنرها در حالت بدون کشش می باشد. با در نظر گرفتن لاگرانژین به صورت $L = k - v$ و معادلات لاگرانژ به صورت $\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$ و $\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{a}} - \frac{\partial L}{\partial a} = 0$ ساده سازی در نهایت مدل ریاضی زیر برای ربات تک بازو با مفصل انعطاف پذیر و با عملکرد در صفحه عمودی به صورت زیر بدست می آید:

$$J_l \ddot{q} + J_l \ddot{a} + K_s a - mgh \sin(q + a) = 0 \quad (8)$$

$$(J_h + J_l) \ddot{q} + J_l \ddot{a} - mgh \sin(q + a) = t \quad (9)$$

فضای حالت

رابطه بین گشتاور و ولتاژ اعمال شده به موتور (v) نیز به صورت زیر است:

با فیدبک حالت استاتیک (Tracking by static State Feedback) را تشریح می‌کنیم.

ردیابی با فیدبک حالت استاتیک

همانطور که می‌دانیم، اگر برای هر سیستمی با درجه n ، درجه نسبی آن به خوبی تعریف گردد ($r \leq n$)، یک سیستم خطی فیدبک ورودی-خروجی (Input-Output feedback Linearization) است، و همچنین برای چنین سیستمی، مساله ردیابی، با یک فیدبک حالت استاتیک با ورودی محدود و حالت‌های محدود حل خواهد شد. حال با داشتن هر سیگنال مرجع محدود $y_r(t)$ و مشتقات محدود $y_r^{(1)}(t), \dots, y_r^{(r)}(t)$ ، مساله ردیابی به وسیله یک فیدبک حالت استاتیک برای سیستم
$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases}$$
 قابل حل است اگر سیگنال کنترلی به فرم $u = k(x) + b(x)v_r(y_r, \dots, y_r^{(r)})$ وجود داشته باشد که در آن b توابع هموار، v_r یک تابع پیوسته هموار و برای کلیه $x \in \mathcal{X}$ ، $b(x) \neq 0$ است، به طوری که برای شرایط اولیه $x(0) \in \mathcal{X}$ ، سیستم حلقه بسته بدست آمده به فرم

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)k(x) + g(x)b(x)v_r \\ y = h(x) \end{cases}$$

شرایط زیر را برآورده سازد:

- برای $t \geq 0$ ، $\|x(t)\|$ محدود باشد.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_r(t)] = 0$$

طراحی کنترل کننده

همان‌طور که می‌دانیم الگوریتم‌های کنترل غیرخطی معمولاً به صورت تغییر یک مختصات حالات سیستم غیرخطی می‌باشد، و با اعمال فیدبک حالت غیرخطی سعی می‌کنیم که سیستم حلقه-بسته خطی گردد و یا در صورت امکان حداقل با یک مختصات ساده‌تر این موضوع بررسی گردد (شکل ۳) [۶]. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود خطی‌سازی فیدبک، روشی است که از یک کنترل کننده چندحلقه‌ای برای کنترل

سیستم‌های غیرخطی استفاده می‌کند. این طرز نگرش را طراحی فیدبک حالت غیرخطی مدرن می‌نامند [۸]. یکی از این روش‌ها، کنترل به‌روش TDR می‌باشد. سیستم $\dot{x} = f(x) + g(x)u + q(x, q(t))$ که به فرم

$$\dot{x} = \tilde{f}(x, q(t)) + g(x)u$$
 نمایش می‌دهیم را در نظر بگیرد که در آن $x \in \mathcal{X}$ ، $q \in \Omega \subset \mathcal{R}^p$ ، $u \in \mathcal{U}$ ، $f(x)$ و g توابع هموار، $g(0) \neq 0$ ، بردار نامعین $f(x)$ را برابر $\tilde{f}(x, \tilde{q})$ با فرض این که f نامی می‌باشد، در نظر می‌گیریم. همچنین تابع بردار ثابت نامی مشخص است را فرض می‌کنیم. سیستم دارای یک نقطه تعادل است و بدون از دست دادن کلیت مساله، نقطه تعادل را مبدا فرض می‌کنیم که $q(t)$ اثری روی آن ندارد. طبق تعریف، مساله ردیابی با دفع اغتشاش به صورت کلی به وسیله فیدبک حالت استاتیک قابل حل است اگر برای سیستم $\dot{x} = f(x) + g(x)u + q(x, q(t))$ یک فیدبک حالت استاتیک به فرم $u = k(x) + b(x)v_r(y_r, \dots, y_r^{(r)})$ وجود داشته باشد که در آن k و b توابع هموار برای $x \in \mathcal{X}$ ، $b(x) \neq 0$ ، r درجه نسبی و v_r یک تابع پیوسته هموار می‌باشد، به طوری که برای هر سیگنال مرجع محدود y_r و مشتقات $y_r^{(1)}, \dots, y_r^{(r)}$ محدود و برای هر شرایط اولیه $x(0) \in \mathcal{X}$ ، سیستم حلقه بسته بدست آمده به فرم

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)k(x) + g(x)b(x)v_r + q(x, q(t)) \\ y = h(x) \end{cases}$$

شرایط زیر را برآورده سازد:

- برای $t \geq 0$ ، $\|x(t)\|$ محدود باشد.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_r(t)] = 0$$

- $v = \infty$

در این صورت با فرض درجه نسبی $r \leq n$ برای سیستم نامی و کامل بودن

وکتورفیلدهای $g = \frac{L_f^r h}{L_g L_f^{r-1} h}$ و $\tilde{f} = f - \frac{L_f^r h}{L_g L_f^{r-1} h} g$

$$b(x) = -1/p(a-c) \quad (18)$$

و در نهایت یک فیدبک حالت استاتیک به فرم $u = k(x) + b(x)v_r(y_r, \dots, y_r^{(r)})$ بدست می‌آید. همچنین به منظور تعقیب خروجی مرجع از روش جابجایی قطب‌ها یک کنترل‌کننده برای سیستم خطی شده طراحی می‌شود که چهار قطب مکرر در -20 برای بدست آوردن مشخصات مطلوب در نظر گرفته شده است. با توجه به این که مشتقات خروجی مرجع نیز مورد نیاز است، در اینجا از یک مدل مرجع که در واقع یک فیلتر ساده با تابع تبدیل $G_f(s) = \frac{1}{(s+4)^4}$ استفاده شده است.

شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی‌ها از دو ورودی مرجع معمول پله با دامنه ۴۵ و سینوسی با دامنه ۴۵ و فرکانس ۲ رادیان بر ثانیه استفاده شده است. همچنین، با توجه به حضور اغتشاش از جمله دما، پارامتر نامعین q ، ضریب سختی فنر در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای نامی مختلف مدل مطابق با جدول (۱) می‌باشد. با توجه به معادلات دینامیکی حاکم بر ربات، درجه نسبی سیستم ۴ بوده که برابر با درجه کلی سیستم است. این بدان معنی است که سیستم دینامیک داخلی ندارد. همچنین، خطی‌سازی ورودی-خروجی با خطی‌سازی حالت ورودی یکی خواهد بود. در شکل‌های ۴ و ۵، به ترتیب پاسخ سیستم به ورودی مرجع پله و خطای تعقیب خروجی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با کنترل‌کننده موردنظر ربات به خوبی ورودی را دنبال کرده و خطای تعقیب به صورت مجانبی به سمت صفر میل می‌کند. شکل ۶ ولتاژ ورودی را برای تعقیب نشان می‌دهد که همان‌طور که مشاهده می‌شود یک سیگنال هموار است. شکل‌های ۷ و ۸ نیز به ترتیب پاسخ ربات تک بازو با مفصل انعطاف‌پذیر به ورودی سینوسی و خطای تعقیب خروجی را نشان می‌دهد که بیانگر پاسخ مناسب و قابل قبول سیستم به ورودی مورد نظر است.

$\tilde{g} = \frac{1}{L_g L_f^{r-1} h}$ و محدود بودن دینامیک

محدود و حالت محدود برای هر اغتشاش محدود $q(t)$ ، مساله ردیابی با دفع اغتشاش با فیدبک حالت استاتیک به فرم زیر قابل حل خواهد بود [۸].

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{r-1} h} (-L_f^r h - k_1 h - \dots - k_r L_f^{r-1} h + v_r) \quad (13)$$

که چندجمله‌ای $s^r + k_r s^{r-1} + \dots + k_1 = 0$ هرویتس و $v_r = k_1 y_r + \dots + k_r y_r^{(r-1)} + y_r^{(r)}$ می‌باشد. در این مساله، ابتدا پارامترهای زیر را به منظور سهولت در نوشتار تعریف می‌کنیم.

$$a = \frac{K_s}{J_h}, b = \frac{K_m K_g^2}{R_m J_h}, c = \left(\frac{K_s}{J_h} + \frac{K_s}{J_l} \right), d = \frac{mgh}{J_l} \\ p = \frac{K_m K_g}{R_m J_h} \quad (14)$$

درجه نسبی سیستم به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$L_g h(x) = 0 \\ L_g L_f h(x) = 0 \\ L_g L_f^2 h(x) = 0 \\ L_g L_f^3 h(x) = p(c-a) \quad (15)$$

بنابراین درجه نسبی سیستم ۴ می‌باشد. تبدیل حالت غیرخطی نیز به صورت زیر بدست می‌آید:

$$z_1 = h(x) = x_1 + x_2 \\ z_2 = L_f h(x) = x_3 + x_4 \\ z_3 = L_f^2 h(x) = (a-c)x_2 + d \sin(x_1 + x_2) \\ z_4 = L_f^3 h(x) = d(x_3 + x_4) \cos(x_1 + x_2) + (a-c)x_4 \quad (16)$$

همچنین توابع $k(x)$ و $\beta(x)$ به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$k(x) = [-d \sin(x_1 + x_2)(x_3 + x_4)^2 + \cos(x_1 + x_2)(ax_2 - bx_3) + (a-c + d \cos(x_1 + x_2))(-cx_2 + d \sin(x_1 + x_2) + bx_3)] / [p(a-c)] \quad (17)$$

همچنین شکل ۹، ولتاژ ورودی برای تعقیب خروجی مرجع سینوسی را نشان می‌دهد.

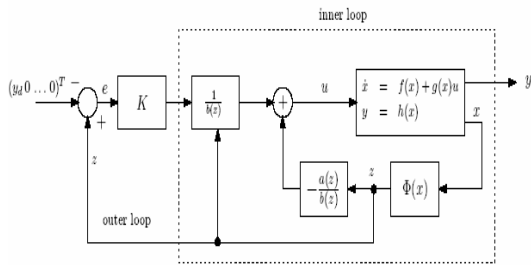
نتیجه‌گیری

در این مقاله مساله ردیابی کنترل ربات تک‌بازو با مفصل انعطاف‌پذیر به روش TDR ارائه شد. این الگوریتم کنترلی، از نوع الگوریتم‌های طراحی فیدبک غیرخطی مدرن می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی‌ها رفتار مطلوب ربات تک‌بازو با مفصل انعطاف‌پذیر با عملکرد در صفحه قائم را در حضور اغتشاش نشان می‌دهد.

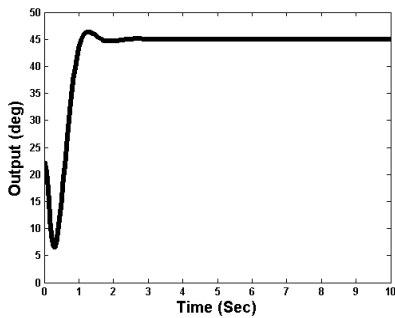
جدول ۱: پارامترهای نامی ربات تک‌بازو با مفصل

انعطاف‌پذیر

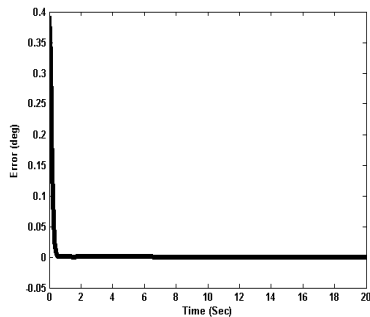
پارامتر	مقدار
ثابت موتور	$k_m = 0.00676 \text{ N / rad / S}$
نسبت دنده	$k_g = 70 \text{ N / rad / S}$
سختی فنر	$k_s = 1.61 \text{ N / m}$
اینرسی بار	$J_l = 0.0059 \text{ Kgm}^2$
اینرسی	$J_h = 0.0021 \text{ Kgm}^2$
مقاومت بار	$R_m = 2.6 \text{ } \Omega$
جرم بازو	$m = 0.403 \text{ Kg}$
شتاب جاذبه زمین	$g = 9.81 \text{ N / m}$



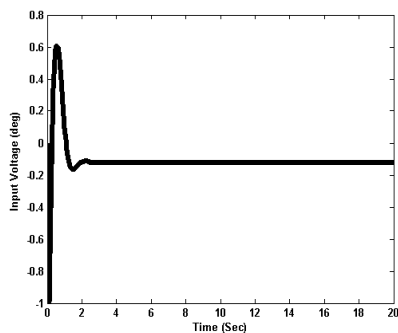
شکل ۳: کنترل کننده غیرخطی چند-حلقه



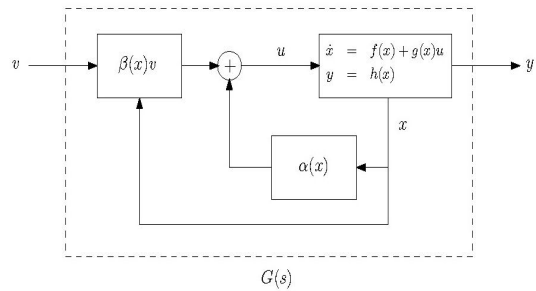
شکل ۴: پاسخ سیستم به ورودی پله



شکل ۵: خطای تعقیب به ورودی مرجع پله

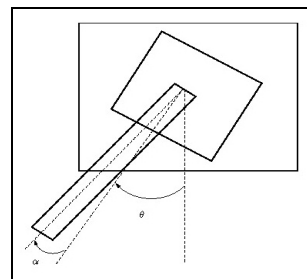


شکل ۶: ولتاژ ورودی برای تعقیب ورودی پله



شکل ۱: سیستم حلقه بسته خطی سازی شده در

حالت کلی



شکل ۲: تعریف مختصات کلی بازو

3- A. Isidori, *Nonlinear Control Systems*, Springer Verlag, 1995.

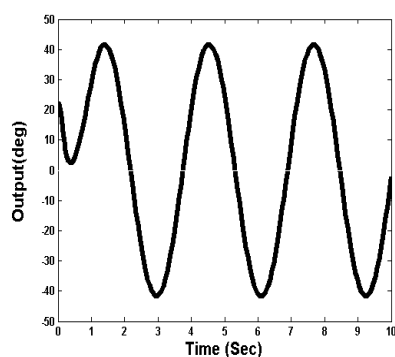
4- M. Vidyasagar, *Nonlinear System Analysis*, Second Edition, Prentice Hall, 1993.

5- R. Marino and M.W. Spong, "Nonlinear Control techniques For flexible Joint Manipulators: A Single Link case Study", *Proc. IEEE Robotics and Automation*, San Francisco, CA, pp.1026-1030.

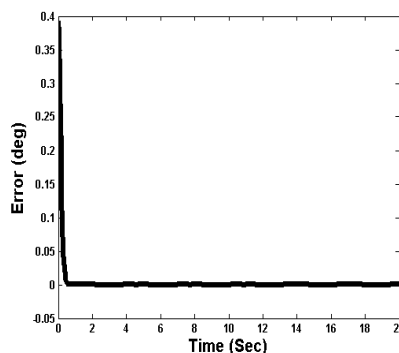
6- D.F. Golla, S.C. Garg and P.C. Hughes, "Linear State feedback Control of Manipulators", *Mech. Machine Theory*, Vol.16, 1981.

7- D. Wang and M. Vidyasagar, "Control of a Class of manipulators with a single flexible Link- Part I: Feedback linearization", *ASME J. Dynamic Sys., Measurement and Control*, Vol.4, pp.655-661, 1991.

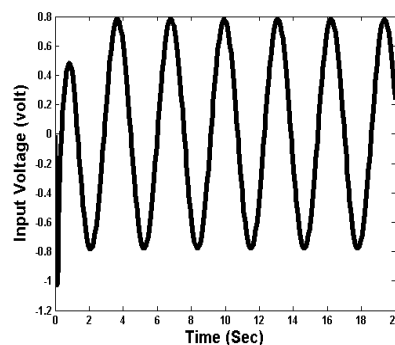
8- R. Marino and P. Tomei, *Nonlinear Control Design : Geometric , Adaptive and Robust*, Prentice Hall , 1995.



شکل ۷: پاسخ سیستم به ورودی مرجع سینوسی



شکل ۸: خطای تعقیب خروجی مرجع سینوسی



شکل ۹: ولتاژ ورودی برای تعقیب ورودی مرجع سینوسی

مراجع

1- J. J. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, New Jersey, 1992.

2- H. K. Khalil, *Nonlinear System*, Second Edition, Prentice Hall, 1996.