

گزارش پروژه پایان درس کنترل تطبیقی

ربات بازو منعطف

استاد درس:

دکتر آیتی

ارائه دهنده:

پرویز نریمانی

۸۱۰۶۹۴۱۷۰

خرداد ۹۵

## چکیده

طراحی، مدل سازی و کنترل حرکت رباتیکی با ساختار انعطاف پذیر به علت مزایای فراوان نسبت به لینک های سخت مورد توجه محققان قرار گرفته است. خواص و ویژگی های این نوع سیستم ها برای زمانی که محدودیت فضای کاری وجود دارد و یا زمانی که عملیات مونتاژ در فضا صورت می گیرد اهمیت ویژه ای می یابد. مشکل عمده در کنترل ربات های انعطاف پذیر ردیابی یک مسیر با حداقل ارتعاش می باشد. با اندازه گیری تغییر شکل الاستیک لینک و با استفاده از یک الگوریتم کنترل پیچیده، نقطه پایانی ربات می توانند با درجه بالایی از دقت و با حداقل ارتعاش کنترل شود.

در این پروژه کوتاه که اقتباس از پروژه ی کارشناسی ارشد در همین موضوع می باشد ابتدا معادلات دینامیکی را بررسی نموده و با آن ها معادلات فضای حالت سیستم را استخراج می نماییم و با استفاده از روش طراحی کنترلر مدل لغزشی ابتدا برای موتور DC موجود در ربات و سپس برای خود بازو طراحی نموده، همچنین نتایج شبیه سازی با بخش سیمولینک نرم افزار متلب را با دادهای به دست آمده در پروژه مقایسه کرده و در پایان نیز برای بهبود سیستم پیشنهاداتی ارائه می گردد.

فهرست مطالب

کاربردها و ضرورت

- مقدمه
- کاربردها
- طرح مسئله

مدل سازی دینامیکی

کنترل ربات

مدل سازی و کنترل موتور

- روش مدل لغزشی
- روش مدل مرجع با تئوری لیاپانوف

مدل سازی و کنترل بازو

نتیجه گیری، پیشنهادات

## کاربردها و ضرورت

## مقدمه

بازوهای رباتیک به طور گسترده ای برای کمک در مشاغل خطرناک، طولانی و خسته کننده مورد استفاده قرار می گیرند. بسیاری از بازوهای رباتیک موجود به شیوه ای برای به حداکثر رساندن استحکام و حداقل رساندن اثرات لرزش در نقطه انتهایی ربات طراحی و ساخته می شوند. این استحکام بالا با استفاده از مواد سنگین و طراحی بزرگ به دست می آید. این در حالی است که بازوهای سخت و سنگین از نظر سرعت انجام کار و نیز مصرف انرژی ناکارآمد می باشند. در مقایسه با ربات های معمولی، سنگین و بزرگ، بازوهای لینک انعطاف پذیر دارای مزیت بالقوه در کاهش هزینه ها، حجم بزرگ تر کار، سرعت عملیاتی بالاتر، نسبت وزن بیشتر بار به ربات، محرک های کوچک تر، مصرف انرژی پایین تر، قدرت مانور بهتر، حمل بهتر و عملیات امن تر به دلیل (actuators) کاهش اینرسی می باشند. با این حال، مشکل عمده این ربات ها، عدم دقت در نقطه انتهایی با توجه به استحکام کم است.

## کاربردها

در بسیاری از برنامه های کاربردی، در اختیار داشتن بازوهای بلند ضروری است. ساختار این نوع ربات ها برای به حداقل رساندن لرزش طراحی شده است. با وجود طراحی دقیق، زمان پاسخ، به ارتعاشات داخلی سیستم وابسته می باشد. کنترل نوسانات فعال به منظور بهبود زمان پاسخ در این بازوها ضروری می باشد. از آنجایی که زمان پاسخ به عنوان یک پارامتر حیاتی شمرده می شود، از این رو مطالعات فراوانی برای کاهش پاسخ در این سیستم ها صورت گرفته است. رباتیک فضایی و بازرسی از مخازن ذخیره سازی زباله های هسته ای دو نمونه از برنامه های کاربردی هستند که در آن از ربات های با طول بازوی بلند استفاده می شوند. خواص و قابلیت های ارائه شده توسط بازوهای انعطاف پذیر، نیاز به استفاده از این نوع ربات را افزایش داده است. شرایطی که در آن فضای کاری محدود است، انجام عملیات مانند مونتاژ در فضا و نیز هنگامی که به جای استفاده از لینک های سخت و کلاسیک در ساخت ربات های صنعتی به کاربرده شود. برای رسیدن به این اهداف جرم ساختاری و سختی لینک ها باید کاهش یابد. در این صورت بازو قادر به وارد شدن به فضاهای کاری بسیار محدود خواهد بود و هزینه راه اندازی کاهش و دقت در کنترل افزایش می یابد. این ویژگی ها نه تنها برای برنامه های کاربردی در فضا، بلکه در بخش صنعت نیز مورد توجه است. بازوی انعطاف پذیر مجهز به سیستم کنترل فعال ارتعاشات، می تواند با همان دقت ربات صنعتی سنتی، ولی این بار با جرم کمتر قطعات متحرک، کاهش هزینه و مصرف انرژی مورد استفاده قرار گیرد. از نمونه های استفاده شده از این سیستم ها را می توان به بسته بندی رباتیکی در صنعت مواد غذایی و نیز عملیات مونتاژ اشاره کرد.

## طرح مسئله

در این پروژه یک ربات برای بررسی موارد مورد نیاز آماده شده است، این ربات دارای یک لینک منعطف از جنس استیل فنی م یباشد که به کمک یک استپر موتور ارتعاشات در حین حرکت تیغه را از بین می برد. جهت اندازه گیری تغییرات خمش لینک، از کرنش سنج به صورت پل استفاده می شود. تغییرات خمش به صورت تغییر ولتاژ بود و با تقویت مناسب می توان اطلاعات مورد نیاز برای کنترل سیستم را به دست آورد.

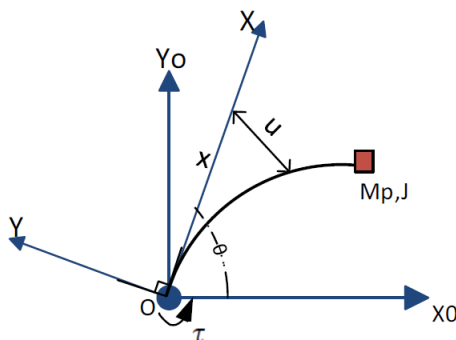
از آنجایی که فعالیت های انجام شده بر روی روبات های با لینک انعطاف پذیر به دودسته مدل سازی دینامیکی سیستم و کنترل ارتعاشات آن دست هبندی می شود و همچنین، هدف از این پژوهش کنترل ارتعاشات این سیستم است، بنابراین مدل دینامیکی سیستم در شبیه سازی ها برگرفته از مقالات می باشد . به همین منظور در این پژوهش ابتدا به بررسی مدل سازی دینامیکی لینک انعطاف پذیر پرداخته سپس در اولین گام با استفاده از متد برگرفته از کتاب کنترل پیشرفته یک کنترلر ساده برای آن طراحی می گردد و نتایج پارامترهای پایداری و مباحث اولیه کنترلی برای آن بررسی می گردد و ادامه دو روش کنترل تطبیقی برای آن پیشنهاد داده شده و نتایج آن با نتایج به دست آمده از پژوهش اصلی مقایسه می گردد.

## مدل سازی دینامیکی

در عمل، مدل های دینامیکی عمدتاً بر اساس دینامیک مستقیم و معکوس فرمول بندی می شوند. این روش، به بهره وری محاسباتی، سادگی و دقت مدل معطوف شده است. در اینجا، هدف پیش بینی تغییرات در دینامیک روبات ناشی از تغییر در تنظیمات و بارگذاری می باشد که تغییرات در شکل و فرکانس های حالت را می توان بدون نیاز به حل معادله کامل از سیستم پیش بینی کرد. برای رسیدن به اهداف کنترلی، شناخت ماهیت روبات انعطاف پذیر و ایجاد یک چارچوب ریاضی مناسب برای مدل سازی سیستم اهمیت دارد.

بازوی مکانیکی انعطاف پذیر موردنظر یک سیستم اغتشاشی با بدنه سخت و همچنین جنبش های انعطاف پذیر می باشد. دو محدودیت فیزیکی در ارتباط با سیستم وجود دارد (۱) کنترل گشتاور تنها، می تواند در مفاصل (تویی) اعمال می شود و (۲) تنها تعداد محدودی از حس گر با پهنای باند محدود و در مکان محدود در امتداد طول بازو را می توان مورد استفاده قرار داد. سیستم ربات انعطاف پذیر مورد بررسی توسط یک تیر قابل انعطاف، با جرمی در مرکز که می تواند آزادانه در سطح افقی خم شود اما در محور عمودی سفت و بدون چرخش باقی بماند، مدل می شود. برای جلوگیری از مشکلات ناشی از افزایش طول در زمان های مختلف، طول ربات ثابت فرض شده است. علاوه بر این، تغییر شکل برشی، اینرسی چرخشی و اثر نیروی محوری نادیده گرفته شده است.

در نمودار شکل ۱، که در آن یک بازو با ممان اینرسی  $I_b$  و مرکز اینرسی  $I_h$ ، چگالی خطی  $\rho$  و طول  $L$  نشان داده شده است. جرم بار  $M_p$  و اینرسی بار  $I_p$  در نظر گرفته شده است. گشتاور کنترل  $\tau(t)$  که بازو در مرکز اعمال می کند، جابجایی زاویه ای بازو در صفحه  $X_0OY_0$  توسط  $\theta(t)$  بیان می گردد. طول لینک بسیار بیشتر از عرض آن تصور می شو؛ بنابراین، ارتعاش لینک غالباً در جهت افقی است. تغییر شکل و اینرسی چرخشی نیز صرف نظر شده است.



برای مشخص نمودن مکان جسم  $M_p$  مطابق شکل مقدار دوران بازو  $\theta$  و مقدار خمش بازو  $u$  را باید مد نظر قرار دهیم و چنین داریم

$$y(x, t) = x\theta(t) + u(x, t)$$

و برای به دست آوردن معادلات حرکت باید روابط انرژی های مرتبط مورد بررسی قرار گیرند. انرژی های مرتبط با سیستم شامل انرژی جنبشی، پتانسیل ها و تلفات می باشد. در این محاسبات از اثر اینرسی چرخشی صرف نظر شده است.

## ۱. معادلات انرژی

## • انرژی جنبشی

$$E_k = \frac{1}{2} I_h \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \int_0^l \left( \frac{\partial u}{\partial t} + x \dot{\theta} \right)^2 \rho dx + \frac{1}{2} M_p \left( \frac{\partial u}{\partial t} + x \dot{\theta} \right)^2_{x=1}$$

## • انرژی پتانسیل

$$E_p = \frac{1}{2} EI \int_0^l \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^2 dx$$

فرض: حرکت ربات در صفحه عمودی می باشد و همچنین تغییر شکل الاستیک ناشی از نیروهای گرانشی در جهت عمودی نادیده گرفته می شود و انعطاف پذیری در جهت عمودی حداقل خواهد بود.

• انرژی تلف شده

$$E_F = \frac{1}{2} \int_0^l D(x) \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^l D_s \left( \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \right)^2 dx + \frac{1}{2} D_0 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \right)^2_{x=0}$$

قسمتی از انرژی در حین حرکت ربات جذب ساختار آن می شود، مقاومت به سرعت عرضی توسط  $D(x)$ ، مقاومت به سرعت زاویه‌ای در مرکز  $D_0$  و مقاومت به کرنش  $D_s$  بیان می‌گردد.

و در عبارات بالا چنین داریم.

$$D(x) = b_0 \rho A, \quad D_s = b_1 E, \quad D_0 = b_0 I_h$$

که  $b_1$  و  $b_0$  ثوابت تناسب و  $A$  نیز سطح مقطع بازو می‌باشد.

۲. معادلات دینامیکی حرکت

$$W = \tau \theta$$

و معادلات حرکت ربات از اصل توسعه یافته همیلتون استفاده می‌گردد.

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta L + \delta W) dt = 0 \rightarrow \delta \int_{t_1}^{t_2} (E_k - E_p + W) dt = 0$$

که در این عبارت  $L = E_k - E_p$  لاگرانژ سیستم،  $\delta W$  کار مجازی،  $\theta \delta$  چرخش مجازی و  $\delta u$  جابجایی الاستیک مجازی است. و در ادامه چنین داریم.

$$EI \frac{\partial^4 u(x, t)}{\partial x^4} + \rho \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = -\rho x \ddot{\theta}$$

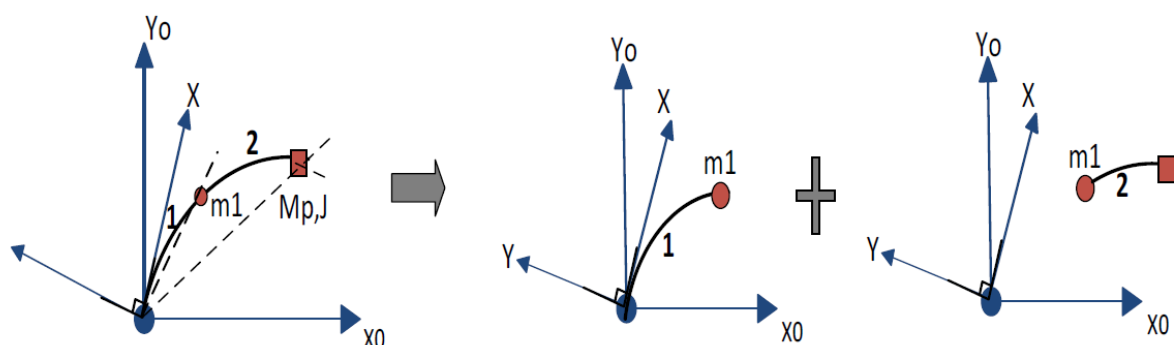
$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + \rho \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = 0$$

در مدل ارائه شده، از جرم گسترده تیر صرف نظر شده و جرم به صورت نقطه ای اعمال شده است. به طوری که یک جرم نقطه‌ای در  $x = \frac{L}{2}$  و یک جرم غیر نقطه‌ای در  $x = L$  قرار دارد. جرم  $M_p$  در انتهای تیر فرض شده است، همچنین از جرم تیر به صورت گسترده صرف نظر شده و در آخر چنین داریم.

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} = 0$$

حال حرکت سیستم را چنین فرض نمودیم

که با چهار بار انتگرال گیری از معادلات حرمت و با فرض وجود جرم  $m_1$  در دو طرف سیستم داریم:



$$y_1(x) = a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0$$

$$y_2(x) = b_3 x^3 + b_2 x^2 + b_1 x + b_0$$

و ضرایب این معادلات را باید از شرایط مرزی به دست آوریم که به صورت مختصر در این قسمت بیان گردیده است.

$$a_0 = a_1 = 0$$

$$a_2 = \frac{-J}{2EI} \ddot{\theta}_g - \frac{M_p L^2}{4EI} \ddot{\theta}_t - \frac{m_1 L^2}{8EI} \ddot{\theta}_1$$

$$a_3 = \frac{m_1 L}{12EI} \ddot{\theta}_1$$

$$b_0 = \frac{m_1 L^4}{96EI} \ddot{\theta}_1$$

$$b_1 = -\frac{m_1 L^3}{16EI} \ddot{\theta}_1 + \frac{M_p L^3}{6EI} \ddot{\theta}_t$$

$$b_3 = \frac{M_p L}{6EI} \ddot{\theta}_t$$

و به این ترتیب معادله فضای حالت سیستم به این فرم ایجاد می گردد.

$$\dot{X}_s = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 192\delta & -48\delta \\ 48\rho & -60\rho & 18\rho \\ -12\gamma & 18\gamma & -7\gamma \end{bmatrix} X_s + \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} \\ 48\delta \\ -6\rho \\ \gamma \end{bmatrix} \theta_m$$

$$y_s = [I_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3}] X_s$$

که در این حالت متغیرهای حالت چنین است:  $X_s^T = [\theta_1 \quad \theta_t \quad \theta_g \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_t \quad \dot{\theta}_g]$

و در ثوابت در عبارات بالا چنین است:  $\delta = \frac{EI}{m_1 L}$ ,  $\rho = \frac{EI}{M_p L^3}$ ,  $\gamma = \frac{EI}{JL}$

و به این ترتیب تابع تبدیل بین ورودی و خروجی سیستم چنین است.



$$\frac{\theta_1(s)}{\theta_m(s)} = \frac{48\delta(s^4 + (6\gamma + 36\rho)s^2 + 48\gamma\rho)}{\Delta}$$

$$\frac{\theta_t(s)}{\theta_m(s)} = \frac{-6\rho(s^4 + (4\gamma - 192\delta)s^2 - 384\delta\gamma)}{\Delta}$$

$$\frac{\theta_g(s)}{\theta_m(s)} = \frac{\gamma(s^4 - (48\rho + 384\delta)s^2 + 2304\delta\rho)}{\Delta}$$

$$\Delta = s^6 + (7\gamma + 60\rho + 192\delta)s^4 + (96\gamma\rho + 768\gamma\delta + 2304\rho\delta)s^2 + 2304\gamma\rho\delta$$

## کنترل ربات

تکنیک های کنترل لرزش برای سازه های انعطاف پذیر به طور کلی به دودسته طبقه بندی می شوند: کنترل فعال از اصل تداخل امواج بهره می گیرد. این هدف با استفاده از کنترل غیرفعال و فعال منابع مصنوعی جهت از بین بردن اختلالات ناخواسته و در نتیجه کاهش سطح ارتعاش تحقق می یابد. کنترل فعال به دودسته حلقه باز و حلقه بسته تقسیم شده است. کنترل حلقه باز شامل تغییر شکل دستورات محرک با توجه به خواص فیزیکی و ارتعاشات سیستم های انعطاف پذیر می باشد. کنترل حلقه بسته نسبت به کنترل حلقه باز از جهاتی متفاوت است. در این نوع کنترل با استفاده از اندازه گیری حالات سیستم و تغییر ورودی عملگر می توان نوسانات پاسخ دهی سیستم را کاهش داد. کنترل غیرفعال از خاصیت کشش ماده و در نتیجه تغییر در پارامترهای ثابت فیزیکی مانند اضافه کردن مواد ویسکوالاستیک برای افزایش خواص میرایی، بهره می گیرد. گزارش شده است که کنترل لرزش بازوی انعطاف پذیر با استفاده از کنترل غیرفعال به خودی خود برای از بین بردن انحراف ساختاری کافی نیست. از سوی دیگر اگر تنها از کنترل فعال استفاده شود، با توجه به محرک و دینامیک حس گر، منجر به بی ثباتی مودها اطراف پهنای باند محرک یا حسگر می شود. برای جلوگیری از چنین بی ثباتی، مقدار مشخصی از میرایی غیرفعال با استفاده از کنترل ترکیبی شامل ترکیب روش های فعال و غیرفعال مورد نیاز خواهد بود. در طول سال ها، روش کنترل لرزش های سریع در بازوی انعطاف پذیر توسعه یافته است. به طور عمده این روش ها عبارت اند از اجرای یک لایه ویسکوالاستیک با میرایی محدود برای فراهم کردن یک محیط با اتلاف انرژی حداقل و استفاده از مواد کامپوزیت در ساخت ربات انعطاف پذیر برای داشتن قدرت و سختی بالاتر نسبت به یک ربات فلزی انعطاف پذیر. مشاهدات نشان داده است که اگرچه میرایی غیرفعال، یک افزایش ناگهانی در میرایی مودهای فرکانس بالاتر فراهم می کند اما مودهای فرکانس پایین تر کنترل نشده باقی می ماند.

• کنترل حلقه بسته

کنترل مؤثر یک سیستم به نظارت لحظه ای و کنترل مربوطه بستگی دارد. بحث اولیه در کنترل، بازخورد از یک ربات انعطاف پذیر و سودمندی تنظیم بهینه در اوایل سال ۱۹۷۰ مورد توجه قرار گرفت. طرح های متنوعی در طول دو دهه اخیر با انواع مختلف سیستم های اندازه گیری ارتعاش برای بازوهای انعطاف پذیر ارائه شده است.

از جمله فعالیت های انجام شده بر روی کنترل بازوهای انعطاف پذیر، استفاده از کرنش سنج برای اندازه گیری حالات سیستم می باشد. دو جزء ضروری در اندازه گیری پاسخ مودال با استفاده از کرنش سنج وجود دارد. اول، روش اندازه گیری مودهای ارتعاش در بازوی انعطاف پذیر و دوم، توسعه روش محاسباتی برای تشخیص مودهای مختلف در انحراف کلی بازو. زمانی که اطلاعات مودال در دسترس باشد، یک حلقه کنترل بسته می تواند ارتعاشات را کاهش دهد. به نظر می رسد که اندازه گیری مودها توسط کرنش سنج بسیار ساده و نسبتاً ارزان قیمت است؛ اما از معایب کرنش سنج ها این است که اندازه گیری مستقیمی از جابجایی بازو ندارند و تنها می توانند اطلاعات محلی فراهم کنند؛ بنابراین استفاده از کرنش سنج ها مستلزم محاسبات پیچیده و وقت گیر است که می توانند منجر به رخ دادن خطا شوند. برای حل این مشکل برخی محققان روشی با بهره گیری از اندازه گیری محلی را پیشنهاد کرده اند.

استراتژی کنترلی برای بازوی انعطاف پذیر تنها شامل کنترل حالت سخت با دقت مناسب نیست بلکه برای کنترل ارتعاشات بازو جهت رسیدن به سرعت بالا و موقعیت دقیق است. روش های معمول استفاده شده در این موضوع به صورت زیر خلاصه می شوند: روش حوزه فرکانسی، کنترل خطی، روش تأخیر زمانی، تکنیک های شکل دادن به ورودی، جبران کننده روبه جلو، روش های بازتعریف خروجی. از سال 1980 دو پیشرفت مهم توجه همه را به کنترل کننده های

ساختار متغیر معطوف کرد. مسئله اول وجود کنترل کننده های ساختار متغیر کلی برای سیستم های پیچیده بود. مسئله دوم درک کامل از مقاومت این سیستم ها در مقابل اغتشاشات خارجی و نیز تغییر در پارامترهای سیستم بود. کنترل مد لغزشی یک تکنیک قوی کنترل بازخورد غیرخطی است. در طراحی مد لغزشی، فرض بر این است که کنترل را می توان از یک ساختار به ساختار دیگری به سرعت تغییر داد. با این حال، به دلیل تأخیر سوئیچینگ و محدودیت فیزیکی محرک ها است که سوئیچینگ سیگنال کنترل با سرعت بالا امکان پذیر نیست و آن را عملاً غیرممکن می سازد. نتیجه کنترل ناقص سوئیچینگ بین سازه این است که به جای لغزش در امتداد سطح لغزنده شاهد حرکات تند هستیم.

## مدل سازی و کنترل موتور

## • روش مدل لغزشی

در این قسمت قبل از کنترل رفتار مکانیکی بازو باید رفتار موتور را کنترل کنیم به همین دلیل با نوشتن معادلات دینامیکی و اعمال کنترلر آن را به سمت پاسخ مطلوب بیاوریم.

با توجه به مدار الکتریکی موتور، همان طور که می دانیم، گشتاور با جریان ورودی رابطه مستقیم دارد ( $\tau = k_t i_a$ ) و نیروی پس زن الکتروموتوری با سرعت موتور رابطه مستقیم دارد ( $e_b = k_b \dot{\theta} = EMF$ ) که در سیستم SI دو ضریب  $k_t$  و  $k_b$  و با نوشتن قانون دوم نیوتن و قانون کیرشهف داریم

$$e_a - e_b = Ri + L \frac{di}{dt} \rightarrow V - K\dot{\theta} = Ri + L \frac{di}{dt}$$

$$\tau = J\ddot{\theta} + C_m\dot{\theta} \rightarrow Ki = J\ddot{\theta} + C_m\dot{\theta}$$

از معادلات بالا تبدیل لاپلاس گرفته و تابع تبدیل سیستم را داریم.

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s((Js + C_m)(R + Ls) + K^2)}$$

و مدل فضای حالت را نیز چنین داریم.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{C_m}{J} & \frac{K}{J} \\ 0 & -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V \\ \theta' = [1 \quad 0 \quad 0] * \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} \end{cases}$$

در مسئله پیش رو برخلاف انتظار برای طراحی مدل لغزشی آنچه از دینامیک موتور نیاز داریم را می نویسیم و بعد از روی آن کنترلر لغزشی را استخراج می نماییم.

از قانون دوم نیوتن برای موتورهای الکتریکی داریم.

$$J\ddot{\theta}_m + v\dot{\theta}_m + \Gamma_c\dot{\theta}_m = ku$$

و برای رابطه تابع تبدیل مورد نیاز برای کنترل را چنین داریم:

$$\frac{\theta_m(s)}{U(s)} = \frac{\frac{k}{J}}{s^2 + \left(\frac{v + \Gamma_c}{J}\right)s}$$

و برای این سیستم خطا را داریم:  $e = \theta_m - \theta_d$

در طراحی برای کنترل لغزشی رسته خطا را یک درجه پایین تر از رسته دینامیک سیستم در نظر می گیریم و چنین داریم

$$n = 2 \rightarrow s = \dot{e} - \lambda e$$

و کنترلر مدل لغزشی را برای این سیستم چنین تعریف می کنیم.

$$u = \frac{1}{b} \left[ \frac{v}{J} \dot{\theta}_m + \ddot{\theta}_d - \lambda e - k \operatorname{sgn}(s) \right]$$

$$s = \dot{e} - \lambda e$$

$$e = \theta_m - \theta_d$$

در روش کنترل لغزشی برای کاهش لرزش، به جای تابع علامت از تابع نرم تر  $\operatorname{sat}(\frac{s}{\Phi})$  استفاده می گردد.

$$\operatorname{sat}(s/\Phi) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(s) & |s| \geq \Phi \\ \frac{s}{\Phi} & |s| < \Phi \end{cases}$$

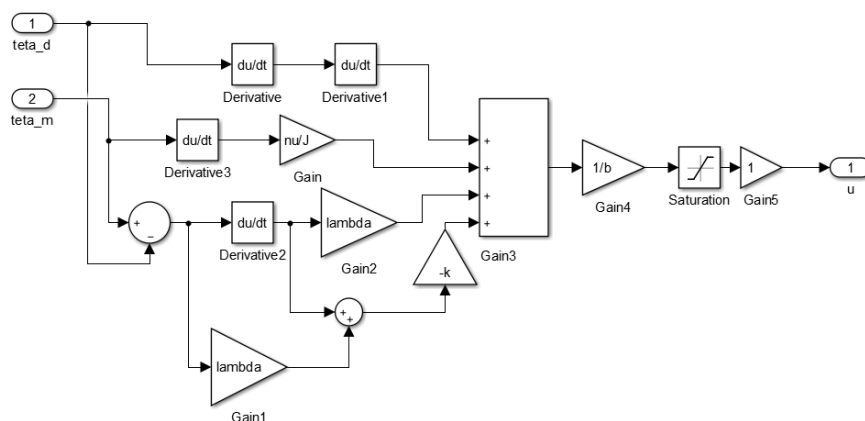
که در رابطه بالا  $\Phi$  ضخامت لایه مرزی و  $\varepsilon$  عرض لایه مرزی است، به طوری که وقتی  $n = 2$  است عرض لایه مرزی از رابطه  $\varepsilon = \frac{\Phi}{\lambda}$  به دست می آید و با تغییر ضریب  $\lambda$  می توان عرض لایه مرزی را تغییر داد. در رابطه زیر براساس آنچه گفته شد می توان چنین نوشت.

$$n = 2 \rightarrow s = \dot{e} + \lambda e = \Phi \rightarrow \begin{cases} e = 0 & \dot{e} = \Phi \\ \dot{e} = 0 & e = \frac{\Phi}{\lambda} \end{cases}$$

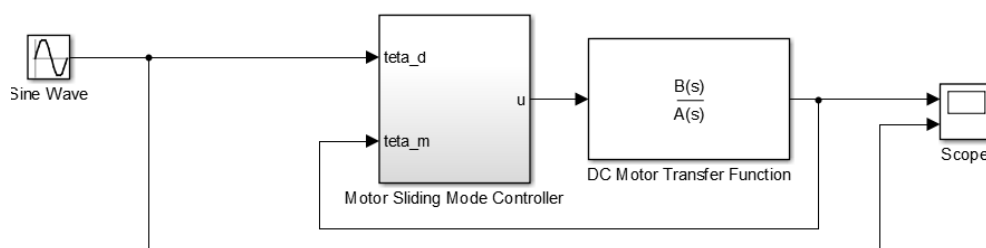
با استفاده از روابط بالا، ابتدا پارامترهای موتور و پارامترهای کنترلر را تعریف می کنیم:

```
%% DC Motor Parameter for Sliding Mode Controller
J=6.87*1e-5;           % Motor inertia
nu=1.041*1e-3;         % Viscous friction
k=.21;                 % Electromechanical constant
Gamma=119.7*1e-3;      % Motor Coulomb friction torque
lambda=-10000000;      |
b=k/J;
```

حال در قسمت سیمولینک نرم افزار متلب برای موتور DC کنترلر مدل لغزشی را دقیقاً براساس کنترلی که بیان شد چنین تشکیل می دهیم.

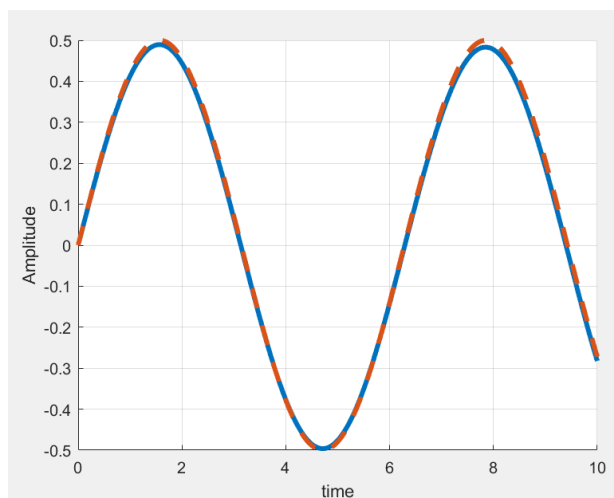


و سیستم کنترلی همراه با مدل موتور را نیز چنین داریم



و نتایج به دست آمده برای تابع سینوسی به عنوان ورودی چنین است.

همان طور که مشاهده می‌گردد مدل کنترلی ما ورودی مرجع را به دقت بسیار خوبی دنبال کرده است. و این قسمت دقیقاً بر اساس مرجع مدل مورد نظر را برآورده نموده‌است.



• روش مدل مرجع با تئوری لیاپانوف

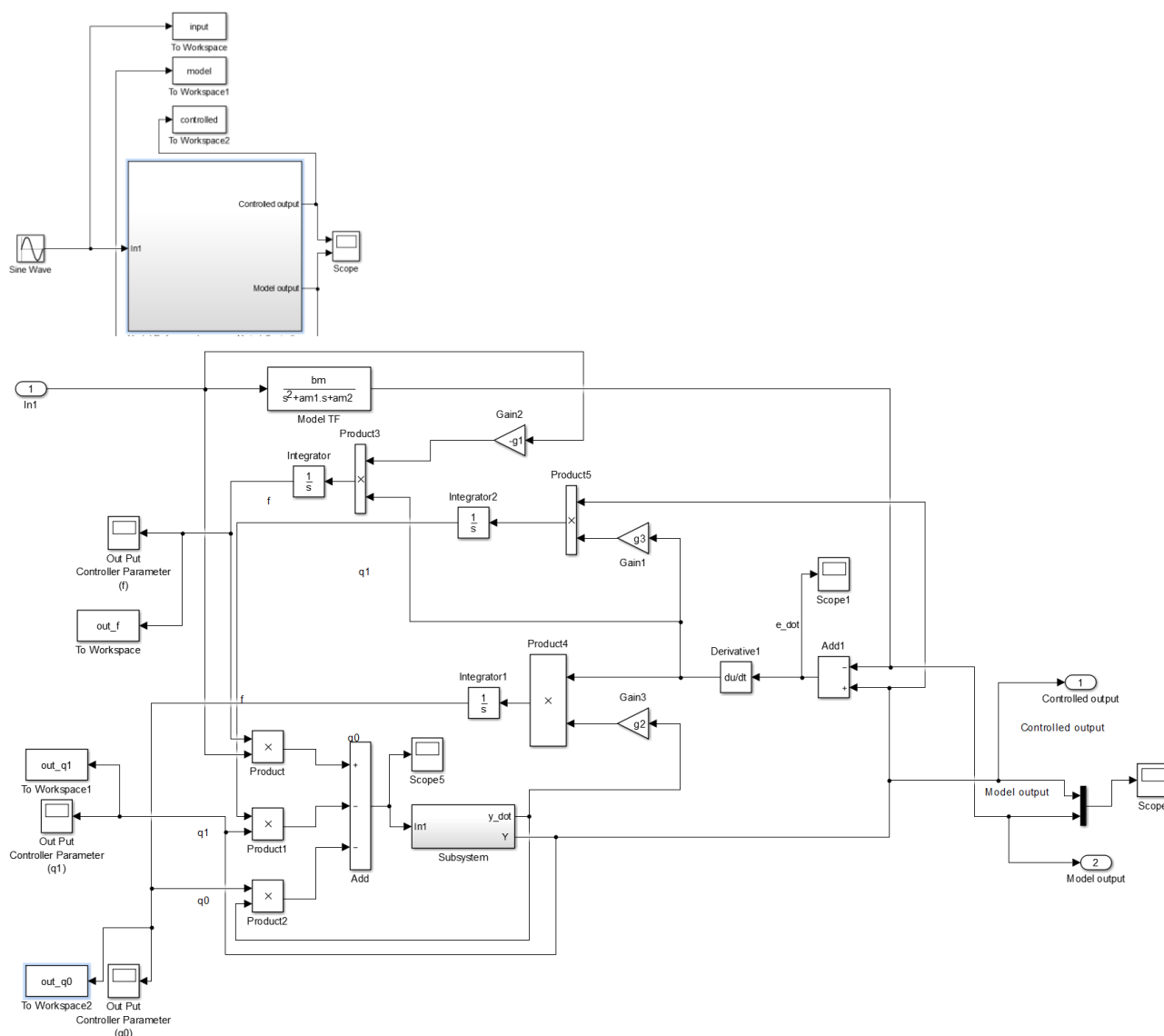
در قسمت قبل از با استفاده از روش مدل لغزشی برای موتور مورد نظر یک کنترلر لغزشی طراحی نمودیم، حال در این قسمت به بررسی کنترلر دیگری می-پردازیم و رفتار آن را ابتدا برای موتور بررسی می-کنیم.

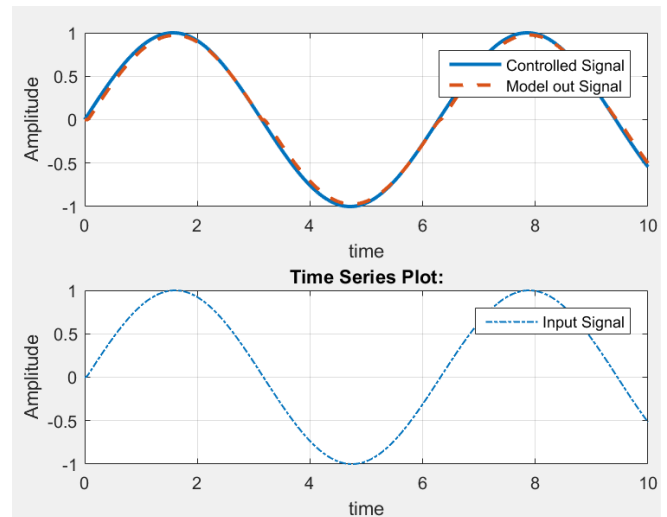
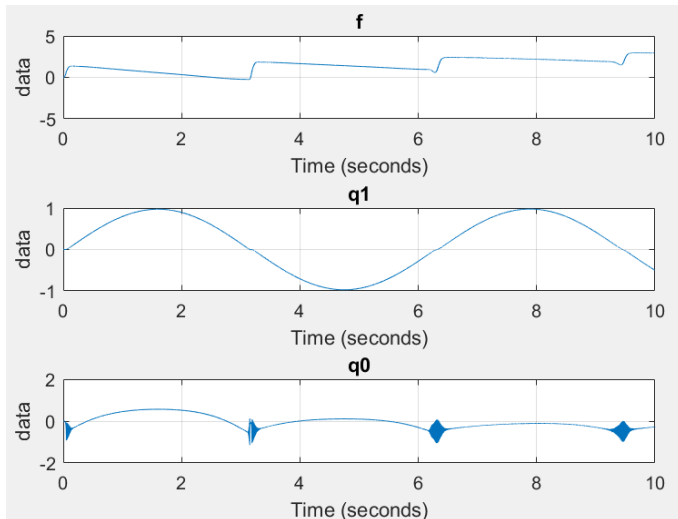
در این قسمت از کنترلر مدل مرجع با استفاده از روش لیاپانوف برای سیستم مورد نظر کنترلر را پیاده می-کنیم اما قبل از آن درمورد این روش به صورت کوتاه توضیحاتی را ارائه می-کنیم. در این روش کنترلر ما چنین است :  $u(t) = f u_c(t) - q_0 \dot{y}(t) - q_1 y(t)$  و پارامترهای کنترل  $q_0$  ،  $q_1$  و  $f$  را با روش لیاپانوف چنین به دست می-آوریم.

$$\begin{aligned} \dot{f} &= -g_1 u_c \dot{e} \\ \dot{q}_0 &= g_2 \dot{y} \dot{e} \\ \dot{q}_1 &= g_3 y \dot{e} \end{aligned}$$

که در این قسمت نیز داریم:  $\dot{e} = \dot{y} - \dot{y}_m$

همچنین در این قسمت باید برای سیستم خود مدل مرجعی را برگزینیم که آن نیز به شرایط سوال و پارامترهای متفاوتی بستگی دارد که در پروژه مذکور به آن اشاره‌ای نشده بود به همین دلیل به دلخواه یک تابع پایدار ساده را در نظر گرفته و مدل را در بخش سیمولینک نرم افزار متلب شبیه سازی کرده و خروجی-های زیر را داریم.





همان طور که مشاهده می شود با دقت بسیار خوبی سیگنال ورودی دنبال شده است؛ و همچنین در این قسمت سعی گردیده پارامتر  $\gamma$  نیز کمترین مقدار خود انتخاب شود تا کمترین فشار به عملگر بیاید که در این قسمت ضرایب کنترلر را مشاهده می کنید که چنین به دست آمده اند و از نظر اندازه مقدار کمی هستند. درمورد مدل مرجع انتخابی نیز چنین داریم.

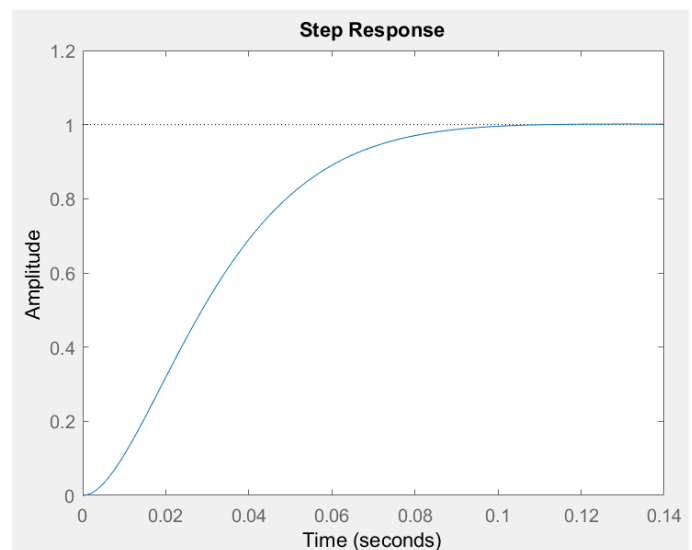
Gm =

3057

-----  
s<sup>2</sup> + 99.52 s + 3057

Continuous-time transfer function.

در این قسمت، هدف کنترل موتور هست و یکی از پارامترهای مهم در آن عدم وجو فراجش بوده است و به همین دلیل پارامتر  $\xi = 0.9$  انتخاب شده است و همان طور که مشاهده می شود پاسخ مدل مرجع ما بسیار سریع و بدون فراجش است.



در مورد این کنترلر مورد بررسی آنچه در این قسمت انجام گردید از نظر تئوری است و به صورت عملی بررسی نگردید است و اینکه پارامترهای موتور در این قسمت همان داده های قبلی است و اینکه آیا موتور مورد استفاده به این اندازه قوی و سریع باشد نیز باید مورد بررسی واقع شود اما براساس آنچه به صورت تئوری پیرامون کنترلر مدل مرجع با تئوری لیاپانوف انجام شده است، این کنترلر بسیار پایدار است و می توان به آن اطمینان نمود اما همان طور که می دانیم این کنترلر به علت فرکانس بالا در پارامترهای کنترلی که در شکل ها نیز مشاهده می گردد ممکن است هر عملگری (موتور) از عهده اجرای آن بر نیاید.



## مدل سازی و کنترل بازو

دینامیک لینک انعطاف پذیر را در قسمت قبل به صورت مختصر توضیح داده شد، حال در این قسمت در مدل مورد مطالعه، با فرض عدم تغییر جرم نوک روبات و نیز صرف نظر کردن از اینرسی چرخشی، تابع انتقال به دست آمده را در زیر داریم.

$$\ddot{\theta}_t = \omega^2(\theta_m - \theta_t) \rightarrow \omega = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{c}{m_0}}$$

و با استفاده از این مدل تابع تبدیل را داریم:

$$\frac{\theta_m(s)}{\theta_t(s)} = \frac{\omega^2}{s^2 + \omega^2}$$

همچنین در این قسمت مدل لغزشی را با استفاده همان قوانین بیان شده در قسمت قبل کنترلر را طراحی می کنیم.

$$u = \frac{1}{\omega^2} [\omega^2 \theta_t + \ddot{\theta}_d - \lambda \dot{e} - k s]$$

$$s = \dot{e} + \lambda e$$

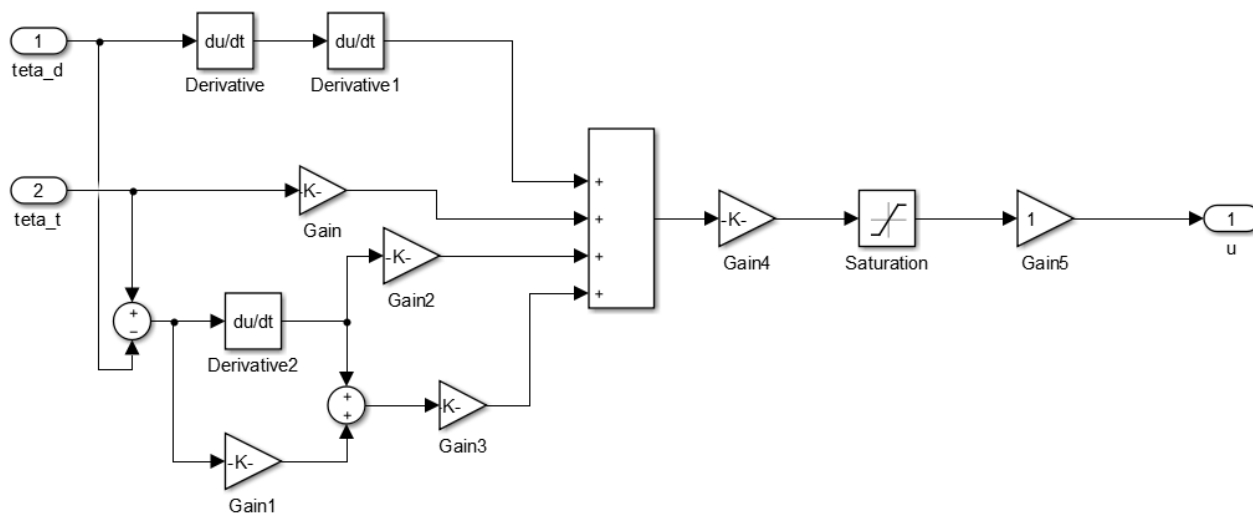
$$e = \theta_t - \theta_d$$

و در این قسمت پارامترهای مربوط به بازو برای کنترلر مدل لغزشی را چنین داریم.

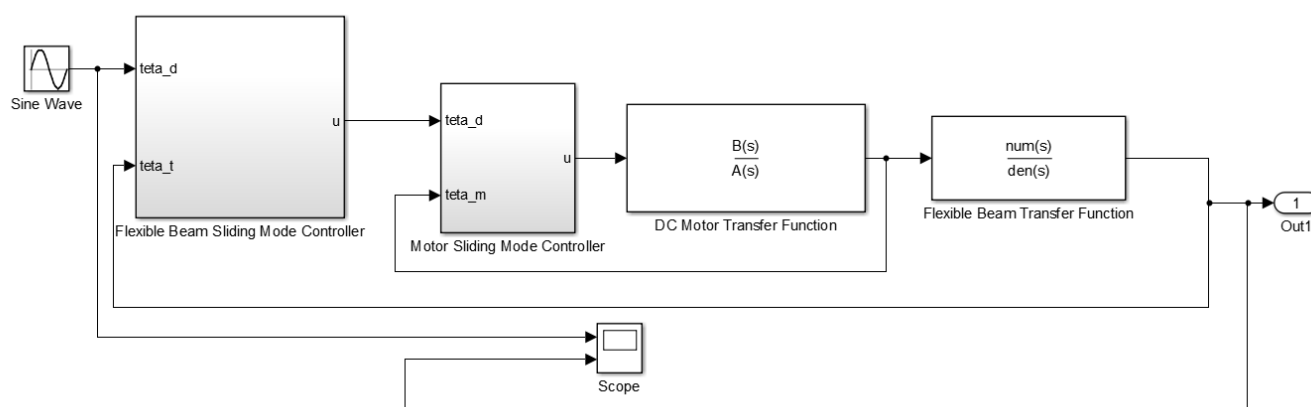
```
%% Parameter For Flexible Beam for Sliding Mode Controller
m0=0.05;           % Nominal mass
L=0.4;             % Link length
EI=0.325;          % Flexural rigidity
c=1.395;           % Stiffness

% Controller Parameter
k2=k;
omega_tr=(1/L)*sqrt(c/m0);
omega=omega_tr;
lambdaF=40000000;
```

و نمودار بلوکی کنترلر مدل لغزشی برای بازو مورد نظر چنین است.



و در این قسمت باید موتور و کنترلر را همراه با کنترلر بازو و سیستم بازو در یک سیستم قرار گرفته و سیستم را شبیه سازی می کنیم و چنین داریم.



و نتایج ناشی از این سیستم برای ورودی مرجع داده شده را چنین داریم.

```

clear;
clc;
%% DC Motor Parameter for Sliding Mode Controller
J=6.87*1e-5;
nu=1.041*1e-3;
k=.21;
lambda=-100000;
b=k/J;
Gamma=119.7*1e-3;

%% DC Motor Transfer Function
B=k/J;
A=[1, (nu+Gamma)/J, 0];

%% Parameter For Flexible Beam for Sliding Mode Controller
m0=0.05;           % Nominal mass
L=0.4;             % Link length
EI=0.325;          % Flexural rigidity
c=1.395;           % Stiffness

% Controller Parameter
k2=k;
omega_tr=(1/L)*sqrt(c/m0);
omega=omega_tr;
lambdaF=40000000;

%% Flexible Beam Transfer Function
delta=EI/(m0*L);
Mp=0.3;
rho=EI/(Mp*L^3);
gamma = EI/(J*L);
%num_F=[-6*rho, 0, -6*rho*(4*gamma-192*delta), 0, 6*rho*384*gamma*delta];
%den_F=[1, 0, (7*gamma+60*rho+192*delta), 0, (96*gamma*rho+768*gamma*delta+2304*rho
*delta), 2304*gamma*rho*delta];
num_F=[omega_tr^2];
den_F=[1, 0, omega_tr^2];
%}

```

### نتیجه گیری، پیشنهادات

در این قسمت همان طور که مشاهده شده است، سیستم ما با استفاده از الگوریتم مدل لغزشی توانسته ورودی مرجع را به خوبی دنبال کند، در این مدل ما نویز و اغتشاشات بیرونی را در نظر نگرفته ایم البته الگوریتم لغزشی در برابر نویز و اغتشاشات مقاومت خوبی را نشان می دهد، و می توان از آن برای طراحی های جدی تر نیز استفاده نمود، اما براساس کارهای انجام شده اگر همراه با این الگوریتم، کنترلر فازی رو نیز همراه سازیم مدل ما رفتار سریعتری خواهد داشت، روش مدل لغزشی به عملکرد فشار زیادی را وارد می سازد، می توان از کنترلرهای ساده تری مانند PID و یا کنترلرهای پیچیده تر تطبیقی نیز استفاده نمود که هر کدام از این مدل ها به تنهایی موضوع یک پروژه می تواند واقع شود، به خصوص برای ربات های پیچیده تر که پیدا کردن مدل سیستم بسیار سنگین است و نیازمند شناسایی سیستم نیز هستیم.