

طراحی کنترل کننده مد لغزشی فازی تطبیقی مرتبه کسری برای سیستم چند متغیره با عدم قطعیت

فریده اله وردی^{۱*}، علی باجی^۲

*۱- گروه برق، واحد اندیمشک، دانشگاه آزاد اسلامی، اندیمشک، ایران. Fa.allahverdi@iau.ac.ir

۲- گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران. alibaji37@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۷

چکیده: در این مقاله کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی فازی مقاوم مرتبه کسری برای سیستم های نامعین چند ورودی چند خروجی طراحی می گردد. به دلیل دستیابی به دقت و آزادی بیشتر در محاسبات مرتبه کسری نسبت به مرتبه صحیح، سطح لغزش در طراحی قانون کنترل بر اساس محاسبات مرتبه کسری خواهد بود. همچنین سیستم فازی جهت تنظیم پارامترهای کنترل کننده بکار گرفته می شود. در نهایت تحلیل پایداری کنترل کننده با روش لیاپانوف مرتبه کسری صورت می گیرد. عملکرد کنترل کننده پیشنهادی روی بازوی رباتیکی دولینکی مورد ارزیابی قرار می گیرد و در نهایت این کنترل کننده با سه کنترل کننده مد لغزشی نهایی مرتبه کسری، مد لغزشی نهایی سریع مرتبه کسری و مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری مقایسه می گردد. نتایج شبیه سازی با نرم افزار متلب نشان می دهد سرعت همگرایی خطا به صفر، تضمین پایداری و نیز کاهش نوسانات سیگنال خروجی در روش کنترل مد لغزشی سریع ناتکین مرتبه کسری بر اساس تنظیم پارامترها توسط سیستم فازی نسبت به سه نوع کنترل کننده دیگر بیشتر است.

واژه های کلیدی: کنترل کننده مد لغزشی ناتکین نهایی سریع، محاسبات مرتبه کسری، عدم قطعیت پارامترهای مدل

۱- مقدمه

مهندسی، مشخص شد که بسیاری از سیستم ها می توانند توسط این معادلات توصیف شوند [۵]. کنترل کننده های مرتبه کسری به دلیل انعطاف پذیری بیشتر نسبت به کنترل کننده های مرتبه صحیح در بسیاری از زمینه ها به خصوص در زمینه مهندسی بکار گرفته شده اند، به طوری که کسری بودن دینامیک کنترل کننده باعث کنترل آسان سیستم های پیچیده می شود و این امکان را به طراح می دهد که به پاسخ های مورد نظر دست یابد. همچنین با به کارگیری این معادلات، امکان طراحی کنترل کننده هایی با عملکرد بهتر در قیاس با کنترل کننده های مرتبه صحیح فراهم شده است. بنابراین با استفاده از سطح لغزش مرتبه کسری، سیستم کنترل در ردیابی مسیر مطلوب می تواند پاسخ مقاوم تر و سریع تری بدهد. همچنین نشان داده شده است

یکی از موضوعات اصلی در طراحی کنترل کننده ها، کنترل باوجود نامعینی و عدم قطعیت در پارامترها می باشد. به همین دلیل در سال های اخیر پژوهش ها و مطالعات زیادی بر روی فرآیندهایی که دارای نامعینی هستند انجام گرفته است و با وجود توسعه ی گسترده ی انواع روش های موفق کنترل تطبیقی، علاقه مندی فزاینده ای برای استفاده از روش های کنترل مد لغزشی به دلیل مشخصه ی مقاوم بودن بالا و نیز سادگی آن در مقابله با عدم قطعیت و نامعینی های غیرپارامتری و دینامیک های مدل نشده وجود دارد [۴]. در سالهای اخیر و پس از توسعه مفاهیم معادلات دیفرانسیل مرتبه کسری در زمینه های کاربردی

که ردیابی خطا و تضمین پایداری در حضور اغتشاش و نیز کاهش نوسانات در سیگنال خروجی در روش کنترل مد لغزشی مرتبه کسری براساس تنظیم پارامترها توسط کنترل فازی نسبت به مرتبه صحیح آن عملکرد بهتری دارد [۶]. در [۷] یک کنترل کننده مد لغزشی فازی مرتبه کسری برای کنترل یک سیستم غیر خطی استفاده شده است، که از کنترل کننده فازی جهت کاهش پدیده چترینگ و کنترل سیستم به صورت هوشمند استفاده شده است. در مراجع [۸، ۹] برای کاهش پدیده چترینگ در یک سیستم غیرخطی از یک سیستم فازی و تابع تانژانت هیپربولیک استفاده شده است. در طراحی کنترل کننده مد لغزشی به منظور رساندن حالت‌های سیستم در زمان محدود به نقاط تعادل خود و همچنین تضمین غیر تکین بودن سیگنال کنترلی از روش مد لغزشی ترمینال سریع استفاده می‌شود. در مرجع [۱۰] از روش مد لغزشی ترمینال سریع جهت تسریع در همگرایی حالت‌ها به نقطه تعادل استفاده شده است. در [۱۱، ۹] یک سطح لغزش انتگرالی برای سامانه تصادفی ساخته شده و شرایط کافی برای وجود سطح به صورت نامعادلات ماتریسی خطی ارایه شده است. خاندانی و همکارانش [۱]، روشی برای بررسی پایداری سامانه‌های تصادفی مرتبه کسری ارایه داده‌اند. در این رویکرد ابتدا از فرمول ایتوی کسری، مفهوم عملگر بینهایت کوچک توسعه داده شده، که به وسیله آن بررسی پایداری سامانه‌های تصادفی کسری با استفاده از توابع لیاپانوف ممکن می‌گردد. سپس از معیار پایداری ارایه شده برای توسعه روش کنترل مد لغزشی برای سامانه‌های تصادفی کسری دارای تاخیر حالت استفاده شده است. روش طراحی ارایه رسیدن مسیرهای حالت به سطح لغزش را با احتمال یک تضمین می‌نماید. بررسی پایداری سامانه در مد لغزش نیز با استفاده از عملگر بینهایت کوچک کسری ارایه شده انجام شده و شروط پایداری تصادفی سامانه در قالب نامعادلات ماتریس خطی ارایه شده است. جهت نشان دادن کارایی نتایج، کاربرد آن در کنترل زاویه پره یک توربین بادی با سرعت متغیر ارایه شده است. همچنین فاضلی اصل و موسی پور [۲]، یک کنترل کننده مد لغزشی ترمینال نوع سریع بازگشت به عقب مرتبه کسری برای کنترل یک ژيروسکوپ سه محوره میکروالکترومکانیکی دارای نامعینی پارامتری و اغتشاشات داخلی و خارجی، پیشنهاد داده‌اند. برای جبران نامعینی‌ها و همچنین اغتشاشات وارده به سیستم از ترکیب کنترل کننده‌های غیر خطی مقاوم مد لغزشی و بازگشت به عقب استفاده شده است. در روش پیشنهادی، سطح لغزش به صورت مرتبه کسری انتخاب شده است. پایداری مجانبی کلی سیستم حلقه بسته با استفاده از قضیه پایداری لیاپانوف اثبات شده است. همچنین علاوه بر کنترل کننده پیشنهادی مذکور، آنها یک کنترل کننده مد لغزشی بازگشت به عقب مرتبه کسری برای سیستم ژيروسکوپ طراحی و پیاده‌سازی نموده‌اند. به منظور ارزیابی کارایی کنترل کننده‌های طراحی شده در این تحقیق با کنترل کننده مد لغزشی بازگشت به عقب و مد لغزشی ترمینال سریع بازگشت به عقب مقایسه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی دارای پاسخ‌گذاری سریعتر

نسبت به دیگر کنترل کننده‌ها می‌باشد. همچنین پدیده چترینگ در کنترل کننده‌های طراحی شده مرتبه کسری، برخلاف دو کنترل کننده دیگر کاهش چشمگیری پیدا کرده است. فرهادی و همکارانش [۳]، در تحقیق خود از یک سطح لغزش مرتبه کسری برای طراحی قانون کنترل مد لغزشی برای کوادروتور استفاده نموده‌اند. هدف از آن بهبود عملکرد و کاهش پدیده چترینگ در روش مد لغزش بوده است. نوجوان‌زاده و همکاران [۱۲] از کنترل کننده مد لغزشی ترمینال سریع غیر تکین مرتبه کسری برای کنترل ربات استفاده کرده است. در [۱۳] یک کنترل کننده مد لغزشی مرتبه کسری فازی برای یک دسته از سیستم‌های غیرخطی بیان شده است و از یک سطح لغزش مرتبه کسری با مرتبه‌ی کسری کمتر از یک برای طراحی قانون کنترل استفاده شده است. روش ارائه شده در مورد دو سیستم بازوی ربات و مخازن به هم متصل مورد بررسی قرار گرفته و به این نتیجه رسیده است که با استفاده از سطح لغزش مرتبه کسری، سیستم کنترل در ردیابی مسیر مطلوب می‌تواند پاسخ مقاوم‌تر و سریع‌تری بدهد. سپس با هدف کاهش پدیده چترینگ از الگوریتم فازی در تعیین بهره تابع علامت استفاده کرده است. در [۱۴] کنترل فازی کسری تطبیقی لغزشی برای ردیابی مسیر ربات نامشخص ارائه شده است. در کنترل فازی کسری تطبیقی پارامترهای فازی از طریق قوانین انطباق مرتبه کسری به روز می‌شوند. ایده اصلی این کار استفاده از ورودی کسری برای کنترل سیستم‌های غیرخطی مرتبه صحیح پیچیده است. در [۱۵] یک روش کنترل مود لغزشی سریع ترمینال فازی تطبیقی (FO) جدید را برای یک کلاس از سیستم‌های غیرخطی در حضور عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات خارجی معرفی می‌کند. برای این منظور، ابتدا با استفاده از حساب کسری، یک سطح لغزشی غیرخطی FO پیشنهاد شده و سپس کنترل کننده حالت لغزشی ترمینال سریع FO (FOFTSMC) برای برآوردن شرایط لغزش در زمان محدود طراحی می‌شود. در این پژوهش روش غیرخطی کنترل کننده مد لغزشی با لایه مرزی تطبیقی از طریق تابع لغزشی متغیر با زمان به کار گرفته می‌شود. سطح لغزشی متغیر با زمان همه فرکانس‌های مدل نشده سیستم را فیلتر می‌کند. پهنای لایه مرزی با توجه به مقدار خطا قابل تنظیم است. از اینرو می‌توان تأثیرات منفی نامعینی‌ها و فرکانس‌های مدل نشده سیستم را بر فرآیند کنترل کاهش داد. پدیده چترینگ نیز رخ نخواهد داد و هزینه کنترل در مقایسه با دیگر روش‌ها کمتر خواهد بود، در نتیجه ردیابی بهینه بدست می‌آید. در ادامه در بخش ۲ انواع کنترل مد لغزشی توضیح داده خواهد شد سپس در بخش ۳ توابع عضویت و قواعد سیستم فازی بیان می‌شوند. در بخش ۴ جهت ارزیابی عملکرد کنترلر پیشنهادی مدل بازوی مکانیکی دو لینیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت در بخش ۵ نتایج شبیه سازی با نرم افزار متلب نشان داده می‌شوند.

۲- انواع کنترل مد لغزشی

۲-۱ کنترل مد لغزشی نهایی مرتبه کسری

خطای ردیابی در این مقاله بفرم زیر تعریف می‌گردد:

$$e(t) = x_d(t) - x(t) \quad (۱)$$

قضیه ۱ [۵]: سطح لغزشی بصورت زیر در نظر بگیرید:

$$s = D^\alpha \ddot{e} + \lambda e(t)^{p/q}, \quad \alpha \in (0,1) \quad (۲)$$

که p و q اعداد صحیح عددی مثبت هستند. سیستم تعریف شده در رابطه (۲) را به همراه عدم قطعیت انباشته شده با توجه به شرط $\|D^{\alpha+1}(L(x,t))\| \leq \delta$ در نظر بگیرید. اگر قانون کنترل مد لغزشی نهایی به شرح زیر طراحی شده باشد:

$$u(t) = G_n^{-1} \left[\ddot{x}_d - F_n(x,t) + D^{-1-\alpha} \left(\lambda \frac{p}{q} e^{(p/q)-1} \dot{e} + ks + K \operatorname{sgn}(s) + \delta \right) \right] \quad (۳)$$

که K و k ثابت مثبت هستند و $\operatorname{sgn}(s)$ تابع علامت سطح لغزشی s و λ یک ثابت طراحی مثبت است. در مرجع [۵] اثبات می‌گردد که با اعمال کنترل کننده فوق خطای ردیابی در زمان محدود همگرا به صفر می‌شود. با مشتق گیری از رابطه (۲) با توجه به زمان داریم:

$$\dot{s} = D^{1+\alpha} \ddot{e} + \lambda \frac{p}{q} e(t)^{(p/q)-1} \dot{e} \quad (۴)$$

برای حذف نوسانات شدید^۱ ورودی کنترلی فوق را می‌توان به فرم زیر اصلاح نمود:

$$u(t) = G_n^{-1} \left[\ddot{x}_d(t) - F_n(x,t) + D^{-1-\alpha} \left(\lambda \frac{p}{q} e(t)^{(p/q)-1} \dot{e} + ks + K \operatorname{sig}^\rho(s) + \delta \right) \right] \quad (۵)$$

که ρ یک پارامتر طراحی مثبت و $\operatorname{sig}^\rho(s) = |s|^\rho \operatorname{sgn}(s)$ است.

۲-۲ کنترل مد لغزشی نهایی سریع مرتبه کسری (OF-TSMC)

سطح لغزش مرتبه کسری را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد [۱۷]:

$$s = D^\alpha \ddot{e} + k_1 \operatorname{sig}^{a_1}(e) + k_2 \operatorname{sig}^{a_2}(e) \quad (۶)$$

که در آن: $0 \leq \alpha < 1$, $k_1 = \operatorname{diag}(k_{11}, \dots, k_{1n}) > 0$

$$k_2 = \operatorname{diag}(k_{21}, \dots, k_{2n}) > 0$$

$$a_i > 1, \operatorname{sig}^{a_i}(e) = |e|^{a_i} \operatorname{sgn}(e) (i=1,2)$$

و $0 < a_2 = p/q < 1$ و q, p اعداد فرد هستند. توجه داشته باشید که

$$\frac{d}{dt} \operatorname{sig}^{a_i}(e) = a_i |e|^{a_i-1}(e) \operatorname{sgn}(e) \dot{e} \quad (۷)$$

یک قانون دستیابی به نوع مد لغزشی نهایی سریع بفرم زیر تعریف شده است:

$$\dot{s} = D^{1+\alpha} \ddot{e} + \left(\bar{k}_1 |e|^{a_1-1} + \bar{k}_2 |e|^{a_2-1} \right) \dot{e} \quad (۸)$$

که $\bar{k}_1 = k_1 a_1$ و $\bar{k}_2 = k_2 a_2$. اگر قانون کنترل مد نهایی به صورت زیر تعریف شود:

$$u = G_n^{-1} \left[\ddot{x}_d(t) + D^{-\alpha-1} \left(\left(\bar{k}_1 |e|^{a_1-1} + \bar{k}_2 |e|^{a_2-1} \right) \dot{e} \right) - F_n(x,t) + D^{-\alpha-1} \left(\gamma_1 s + \gamma_2 \operatorname{sig}^\rho(s) + \delta \operatorname{sgn}(s) \right) \right] \quad (۹)$$

که $0 < \rho < 1$, آنگاه قضیه ۲ برقرار است.

لم ۱ [۱۸]. اگر مشتق کسری ریمان-لیوویل^۲ $D_t^\alpha f(t)$ ($n-1 \leq \alpha < n$) و تابع $f(t)$ انتگرال پذیر: آنگاه:

$$D_t^{-\alpha} \left(D_t^{\beta-\alpha} f(t) \right) = D_t^{\beta-\alpha} f(t) - \sum_{j=1}^n \left[D_t^{\beta-\alpha} f(t) \right]_{t=a} \frac{(t-a)^{\alpha-j}}{\Gamma(1+\alpha-j)} \quad (۱۰)$$

لم ۲ [۱۹]. عملگر انتگرال کسری I_t^α با $\alpha > 0$ کرانه‌دار است،

$$\|I_t^\alpha y\| \leq K \|y\|_p, \quad 0 \leq K < \infty, \quad 1 \leq p \leq \infty$$

لم ۳ [۲۰]. مشتقات و انتگرال مرتبه کسری دارای خواص زیر هستند: خاصیت نیم‌گروهی^۳:

$$D_t^{-\alpha} D_t^{-\beta} f(t) = D_t^{-\alpha-\beta} f(t) \quad (۱۱)$$

قوانین ترکیب^۴:

$$\frac{d^n}{dx^n} \left[D_t^\alpha f(t) \right] = D_t^{n+\alpha} f(t) \quad (۱۲)$$

$$D_t^\alpha \left[\frac{d^n}{dx^n} f(t) \right] = D_t^{n+\alpha} f(t) - \sum_{j=0}^{n-1} \frac{f^{(j)}(a)(t-a)^{j-\alpha-n}}{\Gamma(1+j-\alpha-n)} \quad (۱۳)$$

قضیه ۲ [۱۷]. سطح لغزشی تعریف شده توسط رابطه (۶) را در

نظر بگیرید، که p و q عدد صحیح عددی مثبت هستند. همچنین سیستم غیر خطی (۲) را با عدم قطعیت انباشته شده با شرط $\|D^{\alpha+1}(L(x,t))\| \leq \delta$ فرض کنید. اگر قانون کنترل مد لغزشی نهایی بفرم (۸) تنظیم شده باشد، خطای ردیابی در زمان محدود به صفر همگرا می‌شود.

اثبات: تابع لیپانوف بصورت زیر مفروض است:

$$V = \frac{1}{2} s^T s. \quad (۱۴)$$

با مشتق گیری زمانی از رابطه (۱۵)، با توجه به رابطه (۸) و

$$f(t) = D^{1+\alpha} \left(D^{-(1+\alpha)} f(t) \right)$$
 داریم:

$$-{}_t D_t^{-2-\alpha} (k_1 \text{sig}^{a_1} e + k_2 \text{sig}^{a_2} e) \leq K_1 \|e^{a_1}\| + K_2 \|e^{a_2}\| \quad (22)$$

که $K_2 = Kk_2$ و $K_1 = Kk_1$ است. حال می‌توان نتیجه گرفت که:

$$\left\| e(t) - [{}_t D_t e(t)]_{t=t_r} \frac{(t-t_r)}{2} \right\| - \|e(t_r)\| \leq K_1 \|e^{a_1}\| + K_2 \|e^{a_2}\| \quad (23)$$

توجه داشته باشید که $e(t_s) = 0$ است، بنابراین داریم:

$$\left\| \frac{[{}_t D_t e(t)]_{t=t_r}}{2} \right\| (t_s - t_r) \leq \|e(t_r)\| \quad (24)$$

حال دو حالت مختلف برای رابطه (۲۵) در نظر می‌گیریم، اگر $\|\dot{e}(t_r)\| \neq 0$ آنگاه داریم:

$$t_s \leq \frac{2\|e(t_r)\|}{\|\dot{e}(t_r)\|} + t_r \quad (25)$$

اگر $\|\dot{e}(t_r)\| = 0$ و $e(t_r) = 0$ باشد، داریم $t_s = t_r$. حال اگر $e(t_r) \neq 0$ باشد، می‌دانیم که $\|\dot{e}(t_r)\| = 0$ و $\|e(t)\| \leq \|e(t_r)\|$. بنابراین دو وضعیت بوجود می‌آید، در حالت نخست اگر $e(t) < 0$ باشد آنگاه $e(t) \rightarrow 0$ در $t \rightarrow \infty$ در حالت دوم اگر $e(t) > 0$ باشد آنگاه $e(t) \rightarrow 0$ در $t \rightarrow \infty$ است. برای ساده‌سازی، ما فقط مورد $\|\dot{e}(t_r)\| = 0$ ، $e(t_r) = 0$ و $t \geq t_r$ را در نظر می‌گیریم، زیرا اثبات مورد دیگر نیز مشابه خواهد بود. طبق قواعد ترکیب ۳ و (۶) داریم:

$$D^\alpha \ddot{e}(t) = D^{1+\alpha} \dot{e}(t) - \frac{\dot{e}(t_r)(t-t_r)^{-\alpha-n}}{\Gamma(1-\alpha-n)} \quad (26)$$

$$= D^{1+\alpha} \dot{e}(t) - k_1 \text{sig}^{a_1} e + k_2 \text{sig}^{a_2} e$$

$$\leq -k_1 \text{sig}^{a_1} e = -k_1 e^{a_1}$$

از آنجایی که $\|\dot{e}(t_r)\| = 0$ در نتیجه داریم:

$$\sum_{j=1}^2 [{}_t D_t^{\alpha+1-j} \dot{e}(t)]_{t=t_r} \frac{(t-t_r)^{\alpha+1-j}}{\Gamma(2-j)} = 0 \quad (27)$$

$$D^{-(\alpha+1)} (D_t^{\alpha+1} \dot{e}(t)) =$$

$$\dot{e}(t) - \sum_{j=1}^2 [{}_t D_t^{\alpha+1-j} \dot{e}(t)]_{t=t_r} \frac{(t-t_r)^{\alpha+1-j}}{\Gamma(2-j)} = \dot{e}(t) \quad (28)$$

براساس $\|\dot{e}(t_r)\| = 0$ و $e(t_r) > 0$ و تعریف مشتق کسری ریمان - لیوویل داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T \dot{s} = s^T \left(D^{1+\alpha} \ddot{e} + (\bar{k}_1 |e|^{a_1-1} + \bar{k}_2 |e|^{a_2-1}) \dot{e} \right) \\ &= s^T (D^{1+\alpha} (\ddot{x}_d(t) - F(x, t) - G_n(x, t)u(t) - L(x, t)) \\ &\quad + (\bar{k}_1 |e|^{a_1-1} + \bar{k}_2 |e|^{a_2-1}) \dot{e}) \\ &= s^T \left(-D^{1+\alpha} \left(D^{-\alpha-1} ((\bar{k}_1 |e|^{a_1-1} + \bar{k}_2 |e|^{a_2-1}) \dot{e}) \right) \right. \\ &\quad \left. - D^{1+\alpha} (D^{-\alpha-1} ((\gamma_1 s + \gamma_2 \text{sig}^\rho(s) + \delta \text{sgn}(s))) \right) \\ &\quad \left. - D^{1+\alpha} (L(x, t)) + ((\bar{k}_1 |e|^{a_1-1} + \bar{k}_2 |e|^{a_2-1}) \dot{e}) \right) \\ &= s^T (-\gamma_1 s - \gamma_2 \text{sig}^\rho(s) - \delta \text{sgn}(s) - D^{1+\alpha} (L(x, t))) \\ &= s^T (-\gamma_1 s - \gamma_2 \text{sig}^\rho(s) - \delta |s| - s^T D^{1+\alpha} (L(x, t))) \\ &\leq s^T (-\gamma_1 s - \gamma_2 \text{sig}^\rho(s)) = -\gamma_1 \|s\|^2 - \gamma_2 \|s\|^{\rho+1} \end{aligned} \quad (15)$$

با انتخاب مناسب $\gamma_1 > 0$ و $\gamma_2 > 0$ ، وقتی $\|s\| \neq 0$ ، $\dot{V} < 0$ خواهد بود، بنابراین حرکت لغزشی به صفر صفر همگرا می‌شود. برای تأیید اینکه خطای ردیابی در زمان محدود رخ می‌دهد، می‌توان یک زمان توقف را به صورت زیر تعریف نمود:

$$\tau_s = \inf \{t \geq t_r \mid e(t) = 0\} \quad (16)$$

که t_r زمان رسیدن به سطح لغزش برای حالت‌های سیستم و $s(t_r) = 0$ است. با در نظر گرفتن مفهوم اپراتورهای انتگرال و مشتق کسری در (۶) داریم:

$$D^{-\alpha} (D^\alpha \ddot{e}(t)) = D^{-\alpha} (-k_1 \text{sig}^{a_1} e - k_2 \text{sig}^{a_2} e) \quad (17)$$

با توجه به لم ۱ رابطه زیر برقرار است:

$$e(t) - [{}_t D_t^{\alpha-1} \ddot{e}(t)]_{t=t_r} \frac{(t-t_r)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} = -D^{-\alpha} (k_1 \text{sig}^{a_1} e + k_2 \text{sig}^{a_2} e) \quad (18)$$

از آنجا که $\alpha - 1 < 0$ داریم:

$$[{}_t D_t^{\alpha-1} \ddot{e}(t)]_{t=t_r} \frac{(t-t_r)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} = 0 \quad (19)$$

از ترکیب (۱۹) با (۲۰) بدست می‌آید:

$$\ddot{e}(t) = -D^{-\alpha} (k_1 \text{sig}^{a_1} e + k_2 \text{sig}^{a_2} e) \quad (20)$$

توسط تعریف ریمان-لیوویل و لم ۱، عملگر D_t^{-2} و قانون انجمنی نتیجه می‌گیریم:

$$\begin{aligned} e(t) - [{}_t D_t e(t)]_{t=t_r} \frac{(t-t_r)}{2} - e(t_r) \\ = -{}_t D_t^{-2-\alpha} (k_1 \text{sig}^{a_1} e + k_2 \text{sig}^{a_2} e) \end{aligned} \quad (21)$$

باتوجه به لم ۲ داریم:

$x^{-\alpha}$ هستند که منجر به نامحدود شدن ورودی کنترلی در دستیابی x به صفر می‌شوند. حال در طراحی کنترل‌کننده، یک عبارت غیرتکین $\|\dot{e}\|^{2-a_2}$ برای جلوگیری از این مشکل اتخاذ می‌شود. برای دستیابی به مصالحه‌ای بین نرخ همگرایی و اجتناب از تکینگی، کنترل مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری (FO-NFTSMC) بصورت زیر پیشنهاد داده شده است:

$$s = D^\alpha e + k_1 \text{sig}^{a_1} e + k_2 \text{sig}^{a_2} \dot{e} = 0 \quad (35)$$

که $a_1 > a_2$ و $k_1 > 0, k_2 > 0, 1 < a_2 < 2$ است. حال قانون کنترل مد لغزشی نهایی بفرم زیر انتخاب می‌گردد [۱۷]:

$$u = G_n^{-1} \left[\ddot{x}_d - F_n(x, t) + \bar{k}_2^{-1} |\dot{e}|^{2-a_2} \cdot (\gamma_1 s + \gamma_2 \text{sig}^{\rho} s) + \delta \text{sgn}(s) + \bar{k}_2^{-1} |\dot{e}|^{2-a_2} (D^{1+\alpha} + \bar{k}_1 |e|^{a_1-1} \cdot \dot{e}) \right]$$

که γ_1, γ_2 و $\bar{k}_2 = k_2 a_2$, $\bar{k}_2^{-1} = 1/\bar{k}_2$ $\bar{k}_1 = k_1 a_1$ پارامترهای طراحی هستند.

قضیه ۳ [۲۰]. سطح لغزش تعریف شده توسط رابطه (۳۶) و $a_1 > a_2$ و $k_1 > 0, k_2 > 0, 1 < a_2 < 2$ در نظر بگیرید. همچنین سیستم غیر خطی (۲) را به همراه قطعیت انباشته $\|L(x, t)\| \leq \delta$ فرض کنید. حال اگر قانون کنترل مد لغزشی نهایی بفرم رابطه (۳۷) تنظیم شود، خطای ردیابی در زمان محدود به صفر همگرا می‌شود.

۲-۴ کنترل مد لغزشی ناتکین نهایی سریع فازی تطبیقی مرتبه کسری

در این بخش به منظور بهبود عملکرد و کاهش زمان نشست پاسخ حلقه بسته، یک سیستم فازی برای تنظیم پارامترهای کنترل مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری بیان شده در رابطه (۳۷) طراحی می‌شود. همانگونه که در معادله (۳۷) دیده می‌شود، معادله کنترل مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری دارای پارامترهای طراحی $\delta, k_1, k_2, \gamma_1, \gamma_2$ است. این پارامترهای طراحی بر عملکرد و کارایی کنترل‌کننده بسیار تاثیرگذار است، رویکرد متداول برای تنظیم آنها بصورت تجربه و آزمایش است. اما در این تحقیق یک سیستم فازی برای تنظیم پارامترهای مذکور پیشنهاد داده می‌شود. هدف تمامی سیستم‌های کنترلی ردیابی ورودی مرجع بدون وجود خطا است. از

$$D^{-(\alpha+1)}(-k_1 e^{a_1}) = \frac{-k_1}{\Gamma(\alpha+1)} \int_{t_r}^t \frac{e^{a_1}(\tau)}{(t-\tau)^\alpha} d\tau$$

$$\leq \frac{-k_1}{\Gamma(\alpha+1)} \int_{t_r}^t \frac{e^{a_1}(\tau)}{(t_s-t_r)^\alpha} d\tau \quad (29)$$

که به ازای تمامی $t \geq t_r$ داریم $0 < (t-\tau)^\alpha \leq (t_s-t_r)^\alpha$ بنابراین، رابطه (۲۹) را می‌تواند ساده‌سازی نمود:

$$\dot{e}(t) \leq \frac{-k_1}{\Gamma(\alpha+1)} \int_{t_r}^t \frac{e^{a_1}(\tau)}{(t_s-t_r)^\alpha} d\tau \quad (30)$$

انتگرال رابطه (۳۱) با توجه به t در بازه $[t_r, t_s]$ و ترکیب $e(t_s) = 0$ و رابطه (۳۰)، نامساوی زیر را نتیجه می‌دهد:

$$-e(t_r) \leq \frac{-k_1}{\Gamma(\alpha+1)} (t_s-t_r)^{-\alpha} \int_{t_r}^{t_s} \int_{t_r}^t e^{a_1}(\tau) d\tau dt \quad (31)$$

برای انتگرال دوگانه در رابطه (۳۲)، با بکارگیری قضیه مقدار میانگین $e(\xi_1) > 0$ و $\xi_1 \in (t_r, t_s)$ وجود خواهد داشت که معادله (۳۳) را برآورده می‌سازد،

$$-e(t_r) \leq \frac{-k_1 e^{a_1}(\xi_1) (t_s-t_r)^{2-\alpha}}{2\Gamma(\alpha+1)} \quad (32)$$

در نهایت داریم:

$$t_s \leq t_r + \left(\frac{2\Gamma(\alpha+1)e(t_r)}{k_1 e^{a_1}(\xi_1)} \right)^{1/(2-\alpha)} \quad (33)$$

از رابطه (۳۱) مشاهده می‌گردد که t_s نمی‌تواند بی‌نهایت باشد؛ در حقیقت، سمت راست معادله (۳۴) وقتی که $t_r < t < t_s$ محدود است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مسیرهای سیستم به مسیرهای مرجع در زمان محدود همگرا می‌شوند. سطح لغزشی کسری (۶) کمی متفاوت از سطح لغزش رابطه (۳۵) است که در مرجع [۲۱] تعریف شده است:

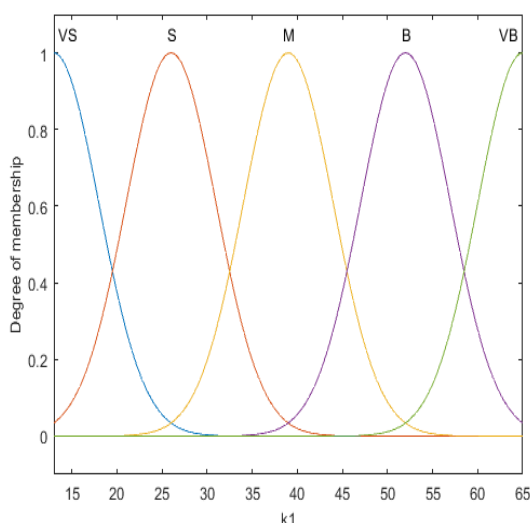
$$s = \dot{e} + k_1 \text{sig}^{a_1}(e) \quad (34)$$

که $a_1 > 1, k_1 > 0, k_2 > 0, 0 < a_2 < 1$. توجه داشته باشید که $a_2 = p/q$ و $\text{sig}^{a_i} e = |e|^{a_i} \text{sgn}(e)$ ($i=1, 2$)

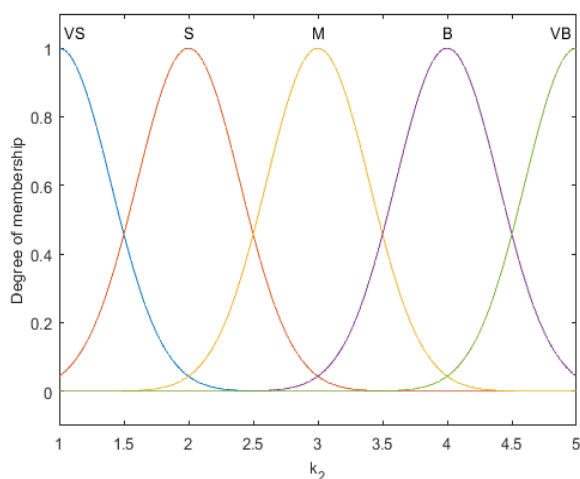
۲-۳ کنترل مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری^۶ (FO-NFTSMC)

در طراحی کنترل مد لغزشی، اغلب مشکل تکینگی وجود دارد. دلیل آن اینست که کنترل‌کننده‌های طراحی شده اغلب دارای ترم غیرخطی مانند

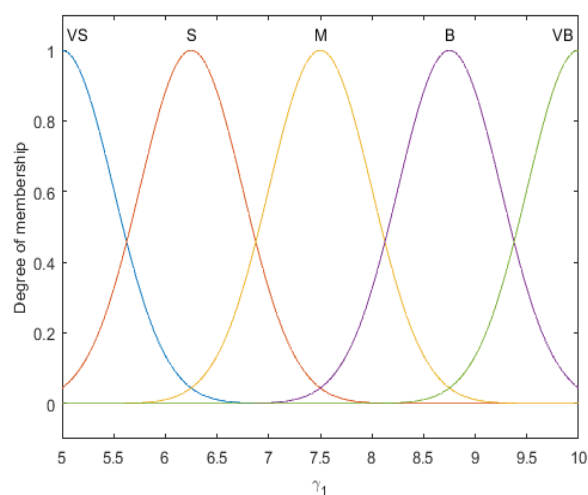
شکل (۱): توابع عضویت ورودی قدرمطلق خطا



شکل (۲): توابع عضویت خروجی مربوط به پارامتر k_1



شکل (۳): توابع عضویت خروجی مربوط به پارامتر k_2



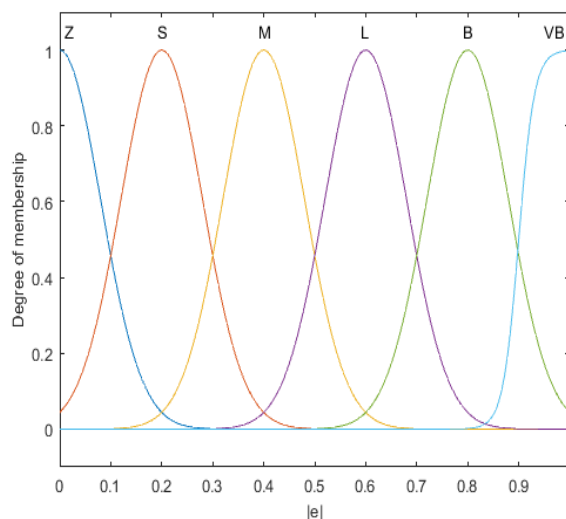
اینرو محققان علاقمند هستند که زمان گذرا به سرعت سپری شود و پاسخ سیستم به پاسخ مرجع همگرا گردد. بنابراین برای تحقق این امر نیاز است که در ابتدا فرآیند کنترلی، دامنه سیگنال کنترلی با حفظ پایداری تا حد امکان بزرگ باشد، تا زمان گذرا کمتر و سرعت کنترل‌کننده بالاتر باشد و با گذشت زمان دامنه سیگنال کنترلی به منظور همگرایی به ورودی مرجع باید کاهش یابد.

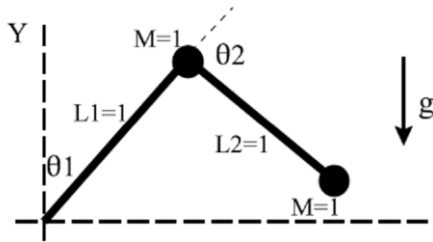
۳- قواعد و توابع عضویت فازی

حال با توجه به توضیحات فوق و همچنین با دقت در معادله (۳۷) می‌توان دریافت که مقدار پارامترهای طراحی $k_1, k_2, \gamma_1, \gamma_2, \delta$ با قدرمطلق خطا ردیابی e مرتبط است. از اینرو در این تحقیق، برای تنظیم مقادیر مذکور به صورت تطبیقی، یک سیستم فازی ممدانی با یک ورودی (خطا ردیابی e) و پنج خروجی $(k_1, k_2, \gamma_1, \gamma_2, \delta)$ ارائه می‌گردد. توابع عضویت ورودی و خروجی‌های سیستم فازی مذکور به ترتیب در شکل‌های ۱ تا ۶ نمایش داده شده است. قواعد فازی بکار گرفته شده به منظور طراحی رویکرد فازی مورد نظر نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱): قواعد فازی به منظور تنظیم پارامترها کنترل‌کننده پیشنهادی

VB	B	L	M	S	Z	$ e $
VB	VB	B	M	S	VS	k_1
VB	VB	B	M	S	VS	k_2
VS	S	M	B	VB	VB	γ_1
VB	VB	B	M	S	VS	γ_2
VB	VB	B	M	S	VS	δ





شکل (۷): یک بازوی رباتیکی با دو درجه آزادی

معادله دینامیک بازوی رباتیکی مذکور بصورت زیر ارایه شده است [۲۲].

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau(t) + \tau_d \quad (36)$$

که $\ddot{q}, \dot{q}, q \in R^2$ به ترتیب بردار موقعیت، سرعت و شتاب زاویه مفصل هستند. $M(q)$ یک ماتریس مثبت معین متقارن 2×2 برای بیان لختی است، $C(q, \dot{q})$ بردار 2×1 حاوی کریوولیس و نیروهای گریز از مرکز، $G(q)$ بردار 2×1 گشتاور گرانشی، τ بردار 2×1 گشتاور اعمالی به مفاصل که در حقیقت ورودی‌های کنترلی است و τ_d نشان‌دهنده بردار 2×1 کرانه‌دار اغتشاش ورودی است. ماتریس‌های مذکور را می‌توان بصورت رابطه زیر بیان نمود [۲۲]:

$$q = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} a_{11}(q) & a_{12}(q) \\ a_{21}(q) & a_{22}(q) \end{bmatrix}$$

$$c(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2 L_1 L_2 \sin \theta_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\ -m_2 L_1 L_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} -(m_1 + m_2) g L_1 \sin \theta_1 - m_2 g L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ -m_2 g L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

$$\tau_d = \begin{bmatrix} \tau_{d1} \\ \tau_{d2} \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

$$a_{11}(q) = (m_1 + m_2) L_1^2 + m_2 L_2^2 + 2m_2 L_1 L_2 \cos(\theta_2),$$

$$a_{12}(q) = a_{21}(q) = m_2 L_1 L_2 \cos(\theta_2),$$

$$a_{22}(q) = m_2 L_2^2 \quad (37)$$

که m_2, m_1 به ترتیب جرم لینک اول و دوم بازو، L_2, L_1 طول لینک‌ها در مدل سیستم بازو است. همچنین مختصات انتهای بازو را می‌توان توسط رابطه زیر بدست آورد:

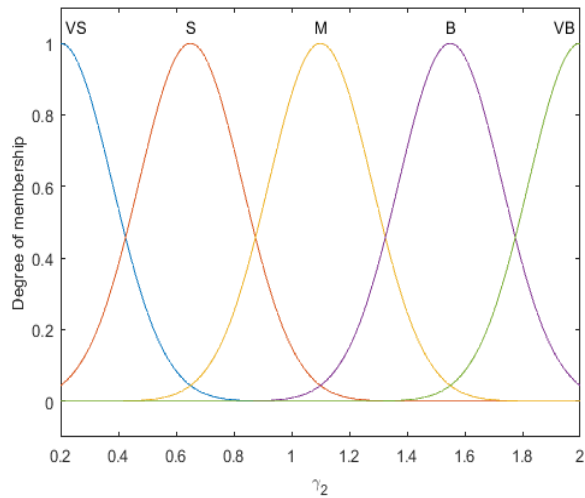
$$x = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$y = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (38)$$

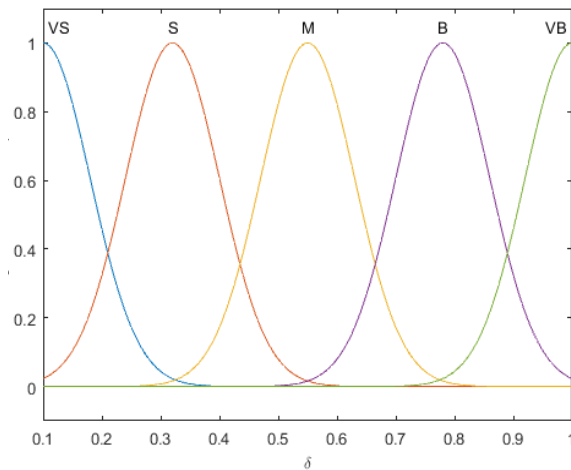
۴-۱ عدم قطعیت انباشته شده

این نوع عدم قطعیت ناشی از یک یا چند منبع از عدم قطعیت‌های پارامتری و یا دینامیک مدل نشده است که بصورت یک اغتشاش انباشته شده منفرد در ساختار سیستم نمایان می‌شود. در این پژوهش، از

شکل (۴): توابع عضویت خروجی مربوط به پارامتر γ_1



شکل (۵): توابع عضویت خروجی مربوط به پارامتر γ_2



شکل (۶): توابع عضویت خروجی مربوط به پارامتر δ

هدف از این بخش ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده مد لغزشی ناتکین نهایی سریع تطبیقی فازی مرتبه کسری پیشنهادی است. بدین منظور کنترل‌کننده پیشنهادی را بر روی یک بازوی رباتیکی دو لینکی پیاده‌سازی نموده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی این کنترل‌کننده را با سه کنترل‌کننده، مد لغزشی نهایی مرتبه کسری، مد لغزشی نهایی سریع مرتبه کسری و مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری مقایسه می‌گردد.

۴-۲ مدل دینامیکی بازوی مکانیکی دو لینکی

برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده تطبیقی پیشنهادی در این مطالعه یک بازو رباتیکی دو لینکی همانند شکل ۷ بکارگرفته می‌شود.

مقادیر عددی پارامترهای مدل دینامیکی بازوی رباتیکی دو لینکی عبارتند از [۲۶]:

$$m_1 = 0.5 \text{ kg}, m_2 = 1.5 \text{ kg}, L_1 = 1 \text{ m}, L_2 = 0.8 \text{ m},$$

$$J_1 = 5 \text{ kg.m}, J_2 = 5 \text{ kg.m}$$

سیگنال اغتشاش خارجی نیز بفرم زیر می‌باشد که در شکل ۸ نیز نشان داده شده است.

$$\tau_{d1} = 2 \sin(0.5t) + 0.5 \sin(100\pi t)$$

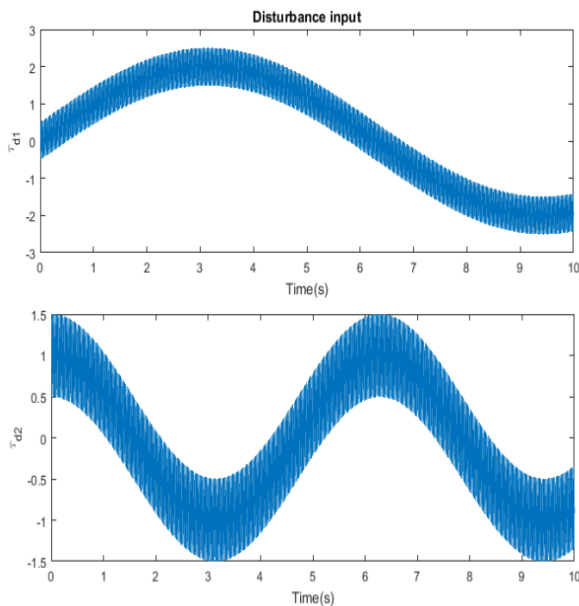
$$\tau_{d3} = \cos(t) + 0.5 \sin(100\pi t)$$

پارامترهای طراحی کنترل کننده مد لغزشی نهایی مرتبه کسری

(FO-TSMC) بصورت زیر تعیین شده‌اند:

$$p = 48, q = 50, \alpha = 0.9, K = [5, 5]^T,$$

$$k = [5, 5]^T, \lambda = [10, 10]^T, \rho = p/q, \delta = 0$$



شکل (۸): سیگنال اغتشاش خارجی اعمال شده به دو لینک بازوی رباتیکی پارامترهای طراحی کنترل کننده مد لغزشی نهایی سریع مرتبه کسری (FO-FTSMC) بصورت زیر می‌باشند:

$$\alpha = 0.9, k_1 = 10, k_2 = 2, a_1 = 1.1, a_2 = 0.9$$

$$\gamma_1 = [5, 5]^T, \gamma_2 = [1, 1]^T, \rho = 0.1, \delta = 0.1$$

پارامترهای طراحی کنترل کننده مد لغزشی نهایی سریع ناتکین مرتبه کسری (FO-NFTSMC) بصورت زیر مقداردهی شده است:

$$\alpha = 0.9, k_1 = [10, 10]^T, k_2 = [2, 2]^T, a_1 = 1.9,$$

$$a_2 = 1.8, \gamma_1 = [5, 5]^T, \gamma_2 = [1, 1]^T, \rho = 0.1, \delta = 0.1$$

معادله سیگنال مرجع برای زوایای مفاصل ربات بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$q_d = [2 \sin(0.5t), 1.5 \cos(t)]^T$$

موقعیت زاویه‌ای اولیه مفاصل ربات بدین صورت لحاظ شده است:

ساختار عدم قطعیت جمع شونده استفاده شده است. سیستم‌های غیرخطی زیر را در نظر بگیرید:

$$\ddot{x} = F(x, t) + G(x, t)u(t) + d(x, t) \quad (39)$$

که $u(t)$ ، سیگنال تلاشی کنترل و $d(x, t)$ اغتشاش خارجی است.

یک ترم $\Delta F(x, t)$ ، $F(x, t) = F_n(x, t) + \Delta F(x, t)$ نامعین است که نشان‌دهنده دینامیک مدل نشده یا تغییر ساختاری سیستم، $G(x, t) = G_n(x, t) + \Delta G(x, t)$ و $\Delta G(x, t)$ عدم قطعیت ورودی است. در این مطالعه فرض خواهد شد عدم قطعیت انباشته شده $L(x, t)$ بصورت زیر تعریف شده است:

$$L(x, t) = \Delta F(x, t) + \Delta G(x, t)u(t) + d(x, t) \quad (40)$$

که $L(x, t)$ شرط $\|D^{1+\alpha}(L(x, t))\| \leq \delta$ برآورده می‌سازد و δ یک ثابت مثبت داده شده است. لازم بذکر است که این فرض محدودکننده نیست، زیرا بسیاری از سیستم‌های دینامیکی این فرض را می‌توانند برآورده سازند [۵] مانند پاندول معکوس، ژيروسکوپ آشوبناک^۸ [۲۳]، بلبرینگ مغناطیسی [۲۴] و حرکت رول کشتی [۲۵]. البته کنترل کننده مد لغزشی طراحی شده در این پژوهش بدون لحاظ نمودن فرض مذکور خواهد بود.

۲-۴ مدل دینامیکی بازوی مکانیکی دو لینکی به همراه عدم قطعیت

در این بخش ماتریس لختی $M(q)$ بیان شده در رابطه (۳۹) به همراه عدم قطعیت از نوع انباشته لحاظ خواهد شد. بنابراین ماتریس مذکور را می‌توان بصورت رابطه زیر بیان نمود [۲۲]:

$$M(q) = \begin{bmatrix} a_{11}(q) & a_{12}(q) \\ a_{21}(q) & a_{22}(q) \end{bmatrix}$$

$$a_{11}(q) = (m_1 + m_2)L_1^2 + m_2L_2^2 + 2m_2r_1r_2 \cos(\theta_2) + J_1,$$

$$a_{12}(q) = a_{21}(q) = m_2L_rL_2 \cos(\theta_2),$$

$$a_{22}(q) = m_2L_2^2 + J_2$$

(۴۱)

که J_1, J_2 عدم قطعیت موجود در مدل سیستم بازو است.

۳-۴ مقداردهی به پارامتر مدل بازوی رباتیکی و پارامترهای کنترلی

$$\theta_1(0) = 3, \theta_2(0) = 2.5$$

۵- نتایج شبیه سازی

در شکل ۹ مسیر پیموده شده توسط نقطه انتهایی بازوی رباتیکی جهت ردیابی مسیر مطلوب با اعمال سه کنترل کننده مد لغزشی نهایی مرتبه کسری، مد لغزشی نهایی سریع مرتبه کسری و مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری در حضور اغتشاش خارجی و عدم قطعیت مدل نشان داده شده است. از این شکل به وضوح می‌توان دریافت که مسیر پیموده شده ناشی از کنترل کننده مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری نسبت به مسیرهای پیموده شده توسط دو کنترل کننده دیگر بهینه‌تر است. زیرا در این مسیر از مکان اولیه تا قرارگیری بر روی مسیر مطلوب کمترین مسافت پیموده شده است.

شکل ۱۰ زوایایی پیموده شده توسط دو مفصل بازوی رباتیکی جهت ردیابی زوایای مطلوب با اعمال سه کنترل کننده مد لغزشی نهایی مرتبه کسری، مد لغزشی نهایی سریع مرتبه کسری و مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری در حضور اغتشاش خارجی و عدم قطعیت مدل را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، پاسخ حالت گذرای ناشی از کنترل کننده مد لغزشی نهایی مرتبه کسری فروجهش بیشتری نسبت به دو کنترل کننده دیگر دارد. همچنین پاسخ حالت دایم ناشی از کنترل کننده مد لغزشی نهایی سریع مرتبه کسری در موقعیت زوایای مفصل دوم دارای خطا می‌باشد. از اینرو می‌توان گفت که کنترل کننده مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری نسبت به دو کنترل کننده پاسخ بهتری داشته است. زیرا هم دارای پاسخ حالت گذرای بدون فروجهش است و هم خطای حالت ماندگار آن صفر است.

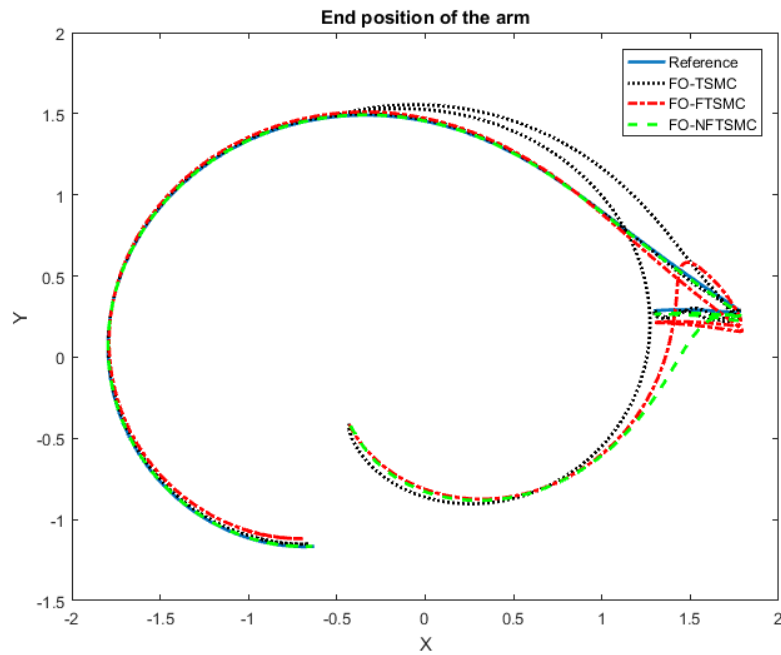
شکل ۱۱ سطوح لغزشی ایجاد شده توسط سه کنترل کننده مد لغزشی نهایی مرتبه کسری، مد لغزشی نهایی سریع مرتبه کسری و مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، با تنظیم مناسب پارامترهای کنترلی هر سه سیگنال لغزشی تولید شده توسط کنترل کننده‌های مذکور بدون چترینگ هستند و تقریباً همگی توانسته‌اند بعد از مدت زمان یک ثانیه به صفر همگرا شوند. در شکل ۱۲ سیگنال تلاش کنترلی ایجاد شده توسط سه کنترل کننده مد لغزشی نهایی مرتبه کسری، مد لغزشی نهایی سریع مرتبه کسری و مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری جهت ردیابی ورودی مرجع در حضور اغتشاش خارجی نمایش داده شده است. واضح است که دامنه سیگنال تلاش کنترلی ناشی از کنترل کننده مد لغزشی نهایی مرتبه کسری در حالت گذرا بسیار بزرگ است، علت امر آن است که قانون کنترلی مربوط به این کنترل کننده جهت تضمین ردیابی مسیر مطلوب نیازمند تلاش کنترلی زیادی است.

همانگونه که در ادامه مشاهده خواهد شد، نتایج شبیه‌سازی در این بخش موید عملکرد و کارایی بهتر کنترل کننده مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری جهت ردیابی ورودی مرجع در حضور اغتشاش خارجی بود. از اینرو در ادامه شبیه‌سازی به منظور سهولت در ارزیابی و جلوگیری از آشفته‌گی تحلیل نتایج، عملکرد کنترل کننده مد لغزشی ناتکین نهایی

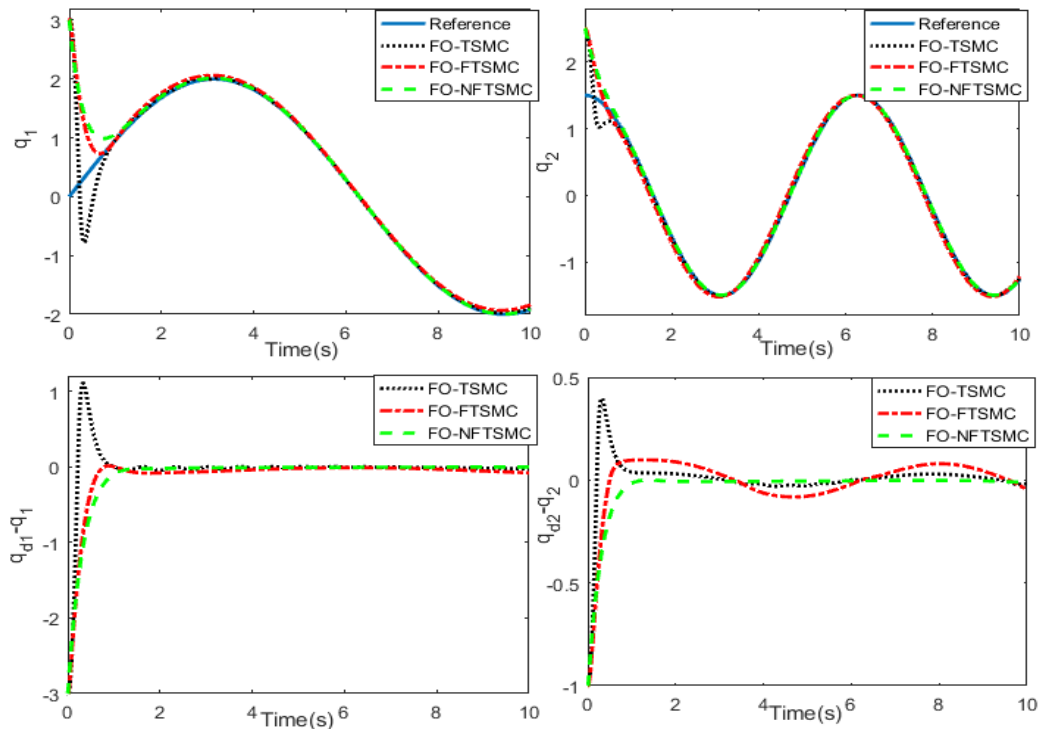
سریع تطبیقی فازی مرتبه کسری پیشنهادی تنها با کنترل کننده مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری مقایسه می‌گردد.

۵-۱ مقایسه عملکرد کنترل کننده مد لغزشی نهایی سریع ناتکین تطبیقی فازی مرتبه کسری با کنترل کننده FO-NFTSMC

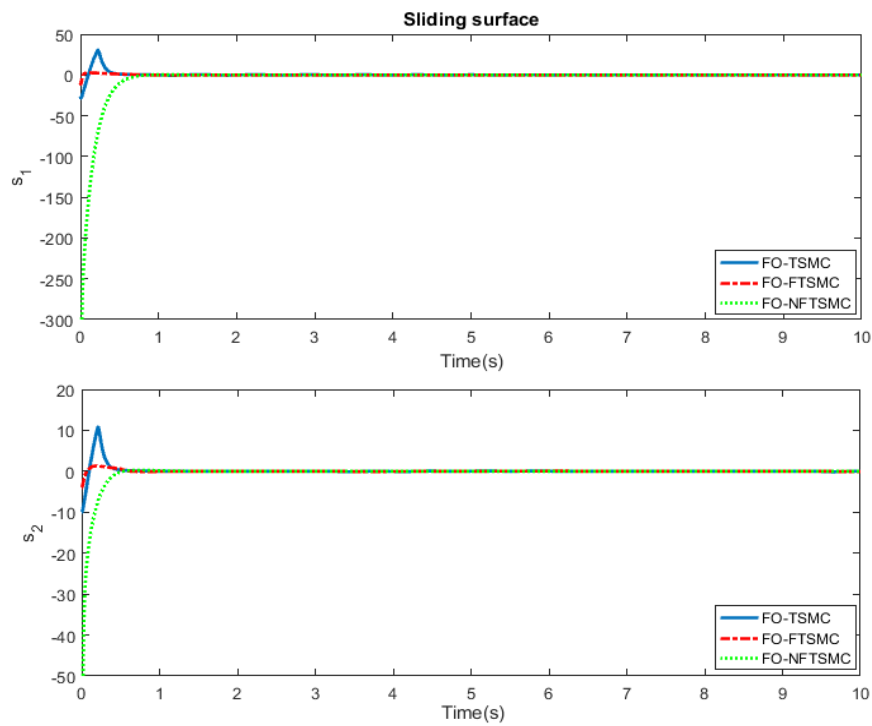
در شکل ۱۳ مسیر پیموده شده توسط نقطه انتهایی بازوی رباتیکی جهت ردیابی مسیر مطلوب با اعمال دو کنترل کننده مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری و کنترل کننده مد لغزشی ناتکین نهایی سریع تطبیقی فازی مرتبه کسری پیشنهادی در حضور اغتشاش خارجی و عدم قطعیت مدل نشان داده شده است. همانگونه که در شکل دیده می‌شود که مسیر پیموده شده ناشی از کنترل کننده مد لغزشی ناتکین نهایی سریع تطبیقی فازی مرتبه کسری پیشنهادی نسبت به مسیرهای پیموده شده توسط کنترل کننده دیگر بهینه‌تر و کوتاه‌تر است. دلیل امر را می‌توان متغیر با خطا بودن و تنظیم درست پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی عنوان نمود. شکل ۱۴ زوایایی پیموده شده توسط دو مفصل بازوی رباتیکی جهت ردیابی زوایای مطلوب با اعمال کنترل کننده‌های مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری و مد لغزشی ناتکین نهایی سریع تطبیقی فازی مرتبه کسری پیشنهادی در حضور اغتشاش خارجی و عدم قطعیت مدل را نشان می‌دهد. در اینجا نیز می‌توان دید خطای حالت گذرا ناشی از کنترل کننده مد لغزشی نهایی سریع تطبیقی فازی مرتبه کسری سریع‌تر به صفر همگرا می‌شود. از اینرو می‌توان گفت که کنترل کننده پیشنهادی نسبت به کنترل کننده مد لغزشی نهایی سریع مرتبه کسری سریع‌تر است. سطوح لغزشی ایجاد شده توسط دو کنترل کننده مد لغزشی ناتکین نهایی سریع مرتبه کسری و کنترل کننده مد لغزشی ناتکین نهایی سریع تطبیقی فازی مرتبه کسری در شکل ۱۵ نشان داده است. مشاهده می‌گردد، اگرچه هر دو سیگنال لغزشی تولید شده توسط کنترل کننده‌های مذکور بدون چترینگ به صفر همگرا شده‌اند ولی سرعت همگرا کنترل کننده مد لغزشی ناتکین نهایی سریع تطبیقی فازی مرتبه کسری اندکی بیشتر است.



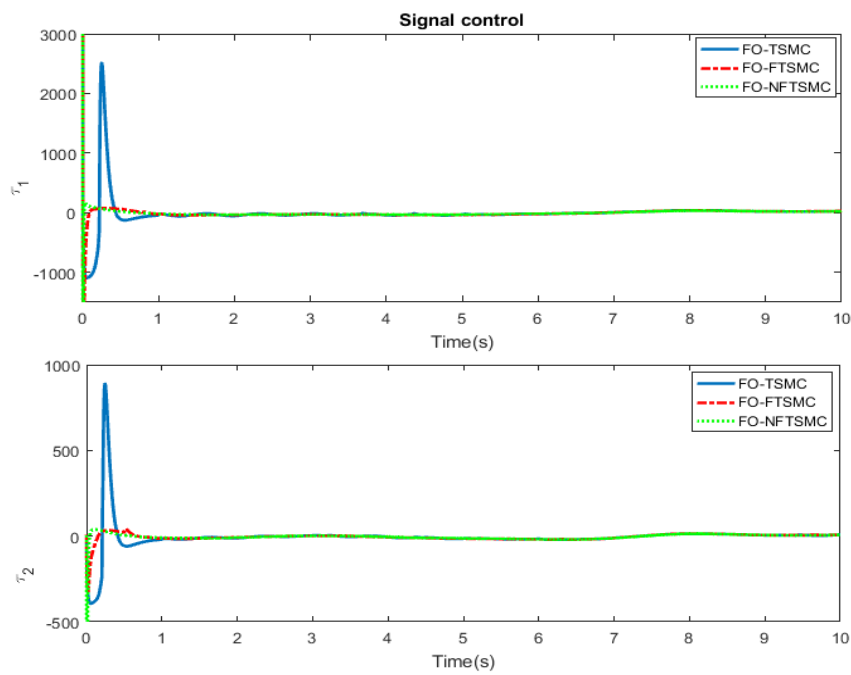
شکل (۹): مسیر مطلوب و مسیر پیموده شده نقطه انتهایی بازوی رباتیکی با اعمال کنترل‌کننده‌های مذکور در صفحه x-y



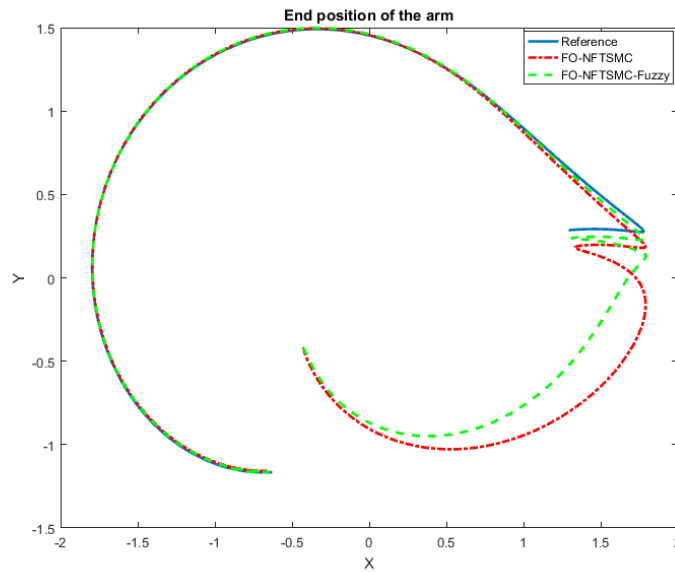
شکل (۱۰): ردیابی زوایایی مرجع توسط هر دو لینک بازوی رباتیکی و خطای ناشی از ردیابی زوایا



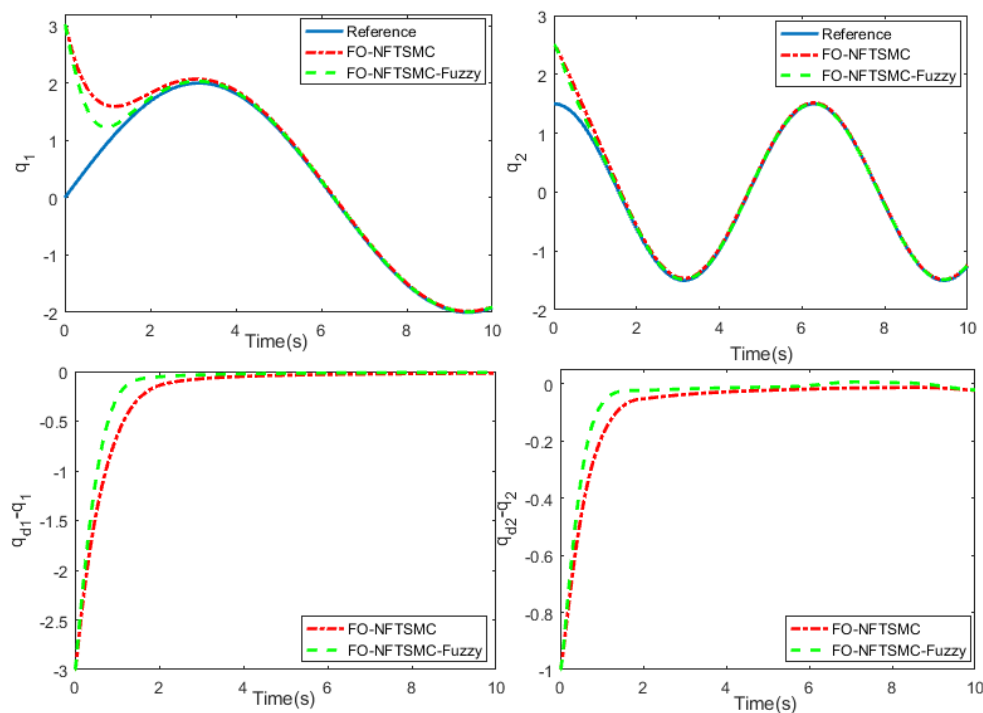
شکل (۱۱): سیگنال‌های لغزش ایجاد شده توسط دو لینک بازوی رباتیکی



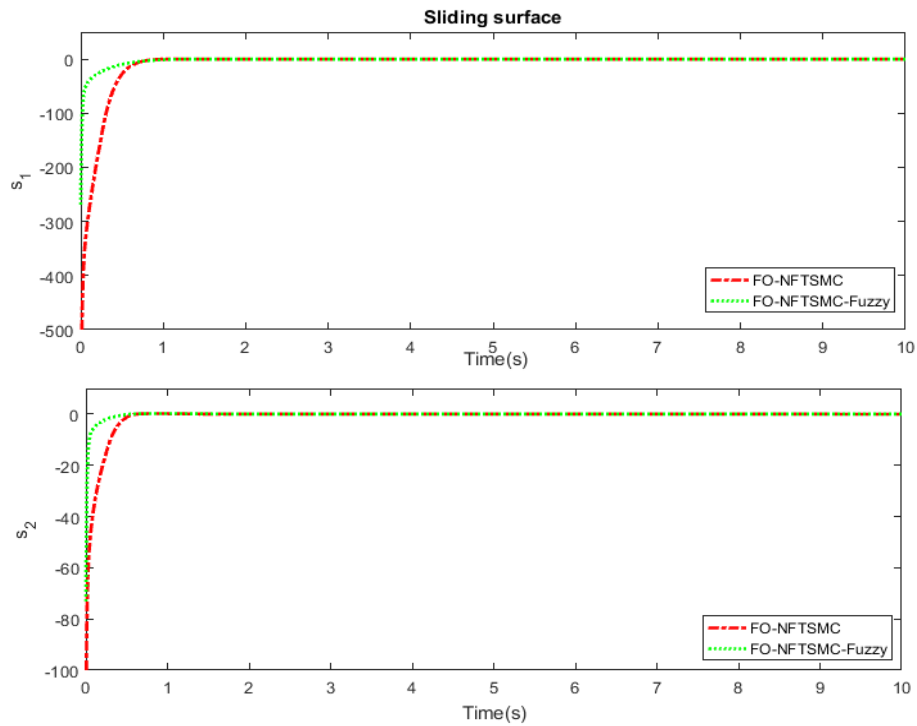
شکل (۱۲): سیگنال کنترلی تولید شده توسط سه کنترل‌کننده مذکور جهت اعمال به لینک‌های بازوی رباتیکی



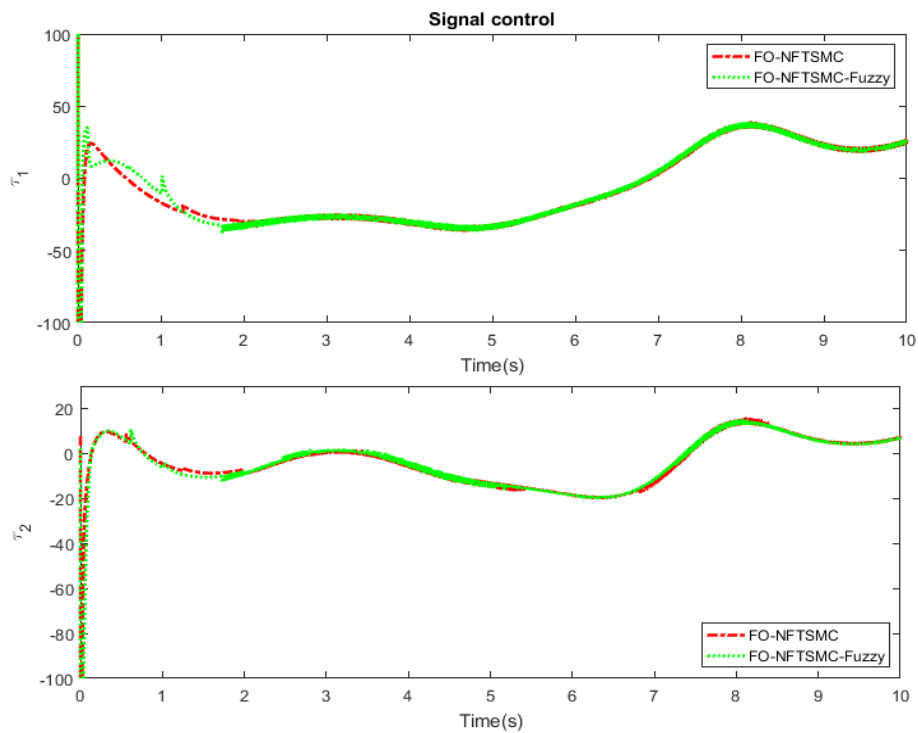
شکل (۱۳): مسیر مطلوب و مسیر پیموده شده نقطه انتهایی بازوی رباتیکی با اعمال کنترل‌کننده‌های مذکور در صفحه x-y



شکل (۱۴): ردیابی زوایایی مرجع توسط هر دو لینک بازوی رباتیکی و خطای ناشی از ردیابی زوایا

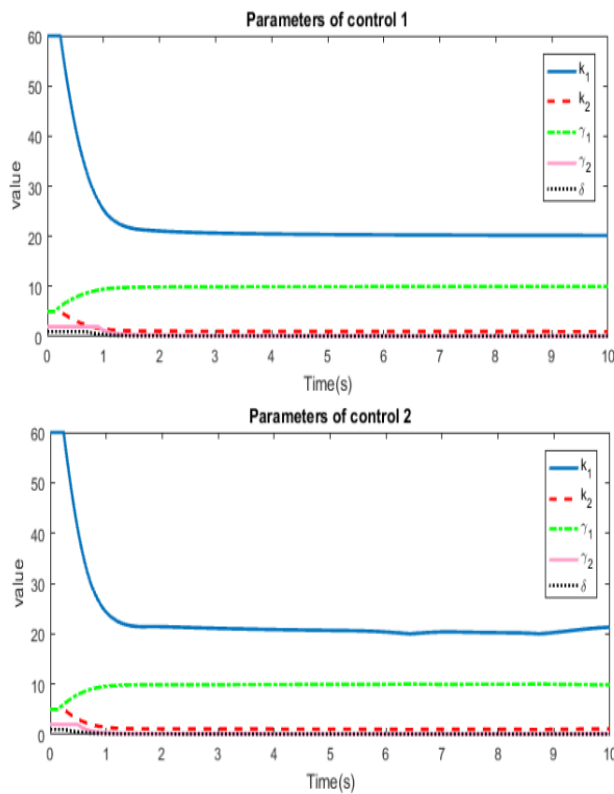


شکل (۱۵): سیگنال‌های ناشی از سطوح لغزش ایجاد شده توسط دو لینک بازوی رباتیکی



شکل (۱۶): سیگنال کنترلی تولید شده توسط دو کنترل کننده مذکور جهت اعمال به لینک‌های بازوی رباتیکی

در حضور اختلال و نیز کاهش نوسانات در سیگنال خروجی در روش کنترل مد لغزشی نهایی سریع مرتبه کسری براساس تنظیم پارامترها توسط سیستم فازی بیشتر است.



شکل (۱۷): تغییرات پارامترهای طراحی کنترل ناشی از سیستم تنظیم فازی

مراجع

- [۱] خاندانی خسرو، جوهری مجد وحید، طهماسبی مهدیه، "طراحی یک کنترلر مد لغزشی برای سامانه‌های تصادفی کسری دارای تاخیر حالت" مجله کنترل، جلد ۱۰، شماره ۲، ص ۱۳-۲۲، ۱۳۹۵.
- [۲] فاضلی اصل، سید باقر، موسی‌پور، سید سجاد. "کنترل مد لغزشی ترمینال سریع بازگشت به عقب مرتبه کسری برای ژيروسکوپ سه محوره میکروالکترومکانیکی"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۷، شماره ۵، ص ۳۸۵-۳۹۳، ۱۳۹۶.
- [۳] فراهی مهدی، کمالی مرضیه، عسکری جواد، "طراحی کنترل کننده مد لغزشی مرتبه کسری برای سیستم کوادروتور"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۷، شماره ۵، ص ۲۸۷-۲۹۴، ۱۳۹۶.
- [4] G. Bartolini, A. Ferrara, A. Levant, E. Usai, "On second order sliding mode controllers", Variable structure systems, sliding mode and nonlinear control, pp. 329-350, london: Springer, 1999.
- [5] S. Dadras and H. R. Momeni, "Fractional terminal sliding mode control design for a class of dynamical systems with uncertainty," Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, vol.17, no.1, pp.367-377, 2012.
- [6] B. Zhang, Y. Pi, Y. Luo, "Fractional order sliding-mode control based on parameters auto-tuning for velocity control of permanent magnet synchronous motor", ISA transactions, Vol. 51, No. 5, pp. 649-656, 2012.
- [7] M. Ö. Efe, "Fractional fuzzy adaptive sliding-mode control of a 2-DOF direct-drive robot arm", IEEE Transactions on

در شکل ۱۶ سیگنال تلاش کنترلی ایجاد شده توسط کنترل کننده‌های مد لغزشی ناکتین نهایی سریع مرتبه کسری و مد لغزشی ناکتین نهایی سریع تطبیقی فازی مرتبه کسری پیشنهادی جهت ردیابی ورودی مرجع در حضور اغتشاش خارجی نمایش داده شده است. واضح است که دامنه سیگنال تلاش کنترلی ناشی از هر دو کنترل کننده مد لغزشی نهایی مرتبه کسری تقریباً یکسان است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بدون صرف هزینه بیشتر به منظور تولید سیگنال تلاش کنترلی، کنترل کننده پیشنهادی توانسته است عملکرد و کارایی بهتری از خود نشان دهد، که این امر را مدیون تنظیم تطبیقی پارامترهای کنترلی توسط سیستم فازی است. شکل ۱۷ نحوی تغییر پارامترهای کنترلی، کنترل کننده مد لغزشی ناکتین نهایی سریع تطبیقی فازی مرتبه کسری را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که پس از گذشت تقریباً دو ثانیه پارامترهای کنترلی به مقدار ثابتی همگرا شده‌اند، علت این موضوع همگرایی مقدار خطا بعد از گذشت دو ثانیه به مقدار صفر است. بعبارت دیگر هنگامی که مقدار خطا صفر گردد، تغییر مقدار پارامترهای کنترلی نیز صفر خواهد شد.

از نتایج شبیه‌سازی ارایه شده در این بخش می‌توان دریافت که عملکرد و کارایی کنترل کننده مد لغزشی ناکتین نهایی سریع تطبیقی فازی مرتبه کسری پیشنهادی به علت برخورداری از سیستم فازی جهت تنظیم پارامترهای کنترلی بهتر از عملکرد کنترل کننده مد لغزشی ناکتین نهایی سریع مرتبه کسری بوده است. همچنین در بخش قبلی مشاهده گردید که عملکرد کنترل کننده مد لغزشی ناکتین نهایی سریع مرتبه کسری از دو کنترل کننده مد لغزشی نهایی سریع مرتبه کسری و کنترل کننده مد لغزشی نهایی مرتبه کسری مناسب‌تر است. از اینرو می‌توان نتیجه گرفت که کنترل کننده مد لغزشی ناکتین نهایی سریع تطبیقی فازی مرتبه کسری پیشنهادی نسبت به هر سه کنترل کننده مذکور عملکرد بهتر ارایه نموده است.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش یک کنترل کننده مد لغزشی ناکتین نهایی سریع تطبیقی فازی مرتبه کسری برای یک کلاس از سیستم‌های نامعین چند ورودی-چند خروجی به همراه عدم قطعیت طراحی گردید. همچنین تأثیر استفاده از سطح لغزش مرتبه کسری در طراحی قانون کنترل در مورد سیستم‌های نامعین غیر خطی با استفاده از روش کنترلی پیشنهادی بررسی شد و آنالیز پایداری کنترل کننده مذکور توسط رویکرد لیاپانوفی صورت گرفت. سپس عملکرد کنترل کننده مد لغزشی ناکتین نهایی سریع تطبیقی فازی مرتبه کسری پیشنهادی با پیاده‌سازی آن بر روی یک بازوی رباتیکی دو لینکی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصل از شبیه‌سازی آن با سه کنترل کننده، مد لغزشی نهایی مرتبه کسری، مد لغزشی نهایی سریع مرتبه کسری و مد لغزشی ناکتین نهایی سریع مرتبه کسری مقایسه گردید. در نهایت آنالیز نتایج شبیه‌سازی در این تحقیق نشان داد، که سرعت همگرایی ردیابی خطا به صفر و تضمین پایداری

- [22] Yan, J.J. and Liao, T.L., Discrete sliding mode control for hybrid synchronization of continuous Lorenz systems with matched/unmatched disturbances. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2017.
- [23] H.-K. Chen, "Chaos and chaos synchronization of a symmetric gyro with linear-plus-cubic damping," Journal of Sound and Vibration, vol. 255, no. 4, pp. 719-740, 2003.
- [24] G. Schweitzer, "Active magnetic bearings-chances and limitations," in Proceedings of the 6th IFToMM International Conference of Rotor Dynamics, vol. 1, pp. 1-4, 2002.
- [25] A. A. Zaher, "Nonlinear control of systems with multiple equilibria and unknown sinusoidal disturbance," Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, vol. 12, no. 8, pp.1518-1533, 2007.
- [26] Y. Feng, X. Yu, and Z. Man, "Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators," Automatica, vol. 38, no. 12, pp. 2159-2167, 2002.
- [8] H. F. Ghavidel, A. A. Kalat, "Observer-based robust composite adaptive fuzzy control by uncertainty estimation for a class of nonlinear systems", Neurocomputing, Vol. 230, No. 22, pp. 135-143, 2017.
- [9] Ji, Y., Qiu, J., "Robust stability for uncertain stochastic systems with time-varying delay via sliding mode control", applied mathematics and computation, vol. 238, pp. 70-81, 2014.
- [10] W. Yan, J. Fei, Y. Yang, S. Hou, "Adaptive global fast terminal sliding mode control of MEMS gyroscope", Proceeding of The 32nd Chinese Control Conference, Xi'an, China, July 26-28, pp. 3135-3140, 2013.
- [11] Gao, Q., Feng, G., Liu, L., Qiu, J., Wang, Y., "An ISMC approach to robust stabilization of uncertain stochastic time-delay systems, IEEE transactions on industrial electronics", vol. 61, pp. 6986-6994, 2014.
- [12] D. Nojavanzadeh, M. Badamchizadeh, "Adaptive fractional-order non-singular fast terminal sliding mode control for robot manipulators", IET Control Theory & Applications, Vol. 10, No. 13, pp. 1565-1572, 2016.
- [13] H. Delavari, R. Ghaderi, A. Ranjbar, S. Momani, "Fuzzy fractional order sliding mode controller for nonlinear systems", Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 15, No. 4, pp. 963-978, 2010.
- [14] Y. Deng, " Fractional-order fuzzy adaptive controller design for uncertain robotic manipulators" International Journal of Advanced Robotic Systems, vo.; 16. 2019.
- [15] A. Razzaghian, R.K. Moghaddam, N. Pariz, "Adaptive fuzzy fractional-order fast terminal sliding mode control for a class of uncertain nonlinear systems", International Journal of Industrial Electronics, Control and Optimization (IECO), vol. 5, pp. 77-87, 2022.
- [16] R. S. Barbosa and J. T. Machado, "Fractional control of dynamic systems." in Dynamics, Games and Science II, ed: Springer, pp. 155-159, 2011.
- [17] G. Zhao, "Fractional-order fast terminal sliding mode control for a class of dynamical systems," Mathematical Problems in Engineering, 2013.
- [18] I. Podlubny, "Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations", to methods of their solution and some of their applications vol. 198: Academic press, 1998.
- [19] A. A. Kilbas, H. M. Srivastava, and J. J. Trujillo, "Theory and Applications of Fractional Diferential Equations", Elsevier B. V., Amsterdam, The Netherlands, 2006.
- [20] D. Baleanu, "New treatise in fractional dynamics," in Complex Systems, L. C. J. Albertand J. Q. Sun, Eds., pp. 1-41, Higher Education Press, Beijing, China, 2011.
- [21] L. Yang and J. Yang, "Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems," International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 21, no. 16, pp. 1865-1879, 2011.

رزومه



فریده اله وردی تحصیلات دانشگاهی خود را در رشته مهندسی برق تا مقطع دکتری پیش برده اند. (کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک، کارشناسی ارشد مهندسی برق- کنترل و دکتری مهندسی برق- کنترل). در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد اندیمشک می‌باشد.



علی باجی در اهواز متولد شده است. مدرک فوق دیپلم خود را در رشته الکتروتکنیک-برق صنعتی از دانشگاه آزاد اسلامی دریافت کرد سپس تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در رشته مهندسی فناوری-کنترل ابزار دقیق در دانشگاه جامع علمی کاربردی استان خوزستان ادامه داد و در ادامه موفق به اخذ مدرک کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق-کنترل از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول شد.

زیر نویس‌ها

⁶ Fractional-Order Nonsingular Fast Terminal Sliding-Mode Control
⁷ Lumped Uncertainty
⁸ Chaotic Gyro

¹ Chattering
² Fractional Order Fast Terminal Sliding-Mode Control
³ Riemann-Liouville
⁴ Property Semigroup
⁵ Composition Rules

Designing a fractional order adaptive fuzzy sliding mode controller for multivariate system with uncertainty

Farideh Allahverdi¹, Ali Baji²

1-Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Andimeshk Branch, Islamic Azad University, Andimeshk, Iran, fa.allahverdi@iau.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Abstract: In this article, a fractional order fuzzy adaptive sliding mode controller is designed for multi-input multi-output uncertain systems. Due to the possibility of achieving greater accuracy and freedom in fractional order calculations than the correct order, the slip surface in the design of the control law will be based on fractional order calculations. Also, the fuzzy system is used to adjust the controller parameters. Finally, the stability analysis of the controller is done with the fractional order Lyapunov method. The performance of the proposed controller is evaluated on a two-link robotic arm, and finally, this controller is compared with three fractional-order final sliding model controllers, fractional-order fast final sliding model, and fractional-order final fast nonsingular sliding mode controllers. The simulation results by Matlab software show that the speed of error convergence to zero, guaranteeing stability and reducing output signal fluctuations in the fractional-order nonsingular fast sliding mode control method based on parameter setting by the fuzzy system is higher than the other three types of controllers.

Keywords: Fast final nonsingular sliding mode controller, fractional order calculations, uncertainty of model parameters.