



روشی کاربردی برای کنترل مسیر ربات موازی بر پایه سطح لغزش با ضرایب تنظیم شونده فازی

بابک تاران^۱، مصطفی برغندان^۲، علی اکبر پیرمحمدی^{۳*}، صالح مبین^۳

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۳۱

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۲/۲۱

کلمات کلیدی:

کنترل مد لغزشی

کنترل فازی

دینامیک ربات موازی صفحه‌ای

تنظیم برخط ضرایب کنترل

کنترل مقاوم

خلاصه: بازوهای ماهر موازی به دلایلی مانند دقت و صلبیت بالا، سرعت و شتاب زیاد و در مقابل، اینرسی پایین مورد توجه صنایع مختلف قرار دارند. کنترل این نوع سیستم‌ها به دلیل داشتن دینامیک پیچیده و غیرخطی با چالش‌هایی مواجه است. از میان روش‌های متعدد کنترل مسیر ربات‌ها، روش‌های گشتاور محاسبه شده و کنترل مد لغزشی از روش‌های معروفی هستند که پیشنهاد می‌شوند. اما در کاربردهای عملی وقتی که سرعت ربات افزایش می‌یابد، تنظیم ضرایب کنترل کننده بسیار مشکل و وابسته به شرایط کاری ربات است و ربات نمی‌تواند با ضرایب ثابت و از پیش تعیین شده و تحت هر شرایطی به درستی کار کند. نوع مسیر، سرعت ربات در طول مسیر، شرایط اولیه عملگر نهایی ربات نسبت به مسیر و حتی سرعت نمونه برداری داده‌ها، از جمله عواملی هستند که با تغییر آنها، کنترل کننده دقت خود را از دست می‌دهد و در نتیجه لزوم باز طراحی و تغییر ضرایب کنترل کننده احساس می‌گردد. در این مقاله اشکالات این دو روش برای بکارگیری عملی روی یک ربات پنج بازویی موازی بررسی شده و سپس روشی ارائه شده است که بر مبنای روش کنترل مد لغزشی عمل می‌کند و به روش فازی ضرایب و بهره‌های کنترل کننده، تنظیم می‌شوند. عملکرد این روش به دو شکل مدل‌سازی در نرم افزار متلب و پیاده‌سازی بر روی ربات موازی صفحه‌ای به صورت آزمایشگاهی بررسی و با سایر روش‌ها مقایسه شده است.

۱- مقدمه

ربات‌های موازی^۱، بازوهای ماهری هستند که از چندین زنجیره سینماتیکی مستقل از هم تشکیل شده‌اند. همه زنجیره‌های مذکور از یک سو به یک پایه ثابت و از سوی دیگر به یک پایه متحرک متصل گردیده‌اند. در مقایسه با ربات‌های سری، بازوهای ماهر موازی مزایای بالقوه‌ای در دقت، صلبیت و توانایی حمل بارهای سنگین دارند [۱]. بنابراین، کاربردهای متعددی برای ربات‌های موازی در زمینه‌های مختلف، مانند ماشین‌های ابزار با دقت بالا، شبیه‌سازهای حرکت، میکرومکانیسم‌ها، دستگاه‌های هپتیک^۲ و غیره وجود دارد [۲، ۳]. در کاربردهای مذکور، بازوهای ماهر در معرض عدم قطعیت‌های ثابت یا متغیر با زمان می‌باشند که ممکن است ناشی از مدل دینامیکی غیرخطی ناشناخته، نیروهای اصطکاک غیرخطی، عدم قطعیت‌های ناشناخته و اغتشاشات خارجی باشد. این عدم قطعیت‌ها باعث

تضعیف عملکرد سیستم کنترلی می‌شود. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که کنترل موقعیت دقیق برای بازوهای ماهر موازی، به ویژه در کارهای بلادرنگ^۳ با عدم قطعیت‌های ثابت و متغیر، کاری چالش برانگیز باشد [۴]. در گذشته، محققان بر روی چگونگی بهبود عملکرد کنترل مسیر آن دسته از ربات‌های موازی متمرکز شده‌اند که به تکنیک‌های کنترلی پیشرفته‌تری نسبت به ربات‌های سریال نیاز دارند. لذا روش‌های مختلفی برای کنترل ربات‌های موازی پیشنهاد شده است که در ادامه بررسی می‌شود.

به دلیل مقاومت بالای کنترل مد لغزشی^۴ در برابر عدم قطعیت‌ها (ساختار یافته و بدون ساختار)، توانایی کاهش اغتشاشات خارجی و سهولت اجرا؛ این روش، توجه زیادی را در بین روش‌های کنترل سیستم‌های غیرخطی، به ویژه برای کنترل بازوهای ماهر رباتیک موازی یا سریال به خود جلب کرده است [۵]. با این حال، این روش دارای کاستی‌هایی می‌باشد که عمده آنها به دلیل استفاده از بهره‌های کنترلی ثابت در بخش سوئیچینگ و همچنین

1 Parallel robots

2 Haptic devices

3 Real-time

4 Sliding Mode Control (SMC)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: pirmohamadi@znu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



عنوان مثال، در پژوهش [۱۰] یک سیستم فازی جهت جبران کننده انرژی کنترلی، در کنار کنترل کننده اصلی مد لغزشی به کار رفته است. در مقاله مذکور، یک کنترل کننده مبتنی بر سیستم فازی به عنوان بخش جبران کننده برای کنترل یک بازوی ماهر رباتیک به منظور اطمینان از مقاومت در برابر عدم قطعیت‌ها و ردیابی دقیق، طراحی شده است و در ادامه برای تخمین عدم قطعیت‌های ناشناخته از کنترل کننده فازی استفاده گردیده است و نهایتاً کنترل کننده مذکور بر روی ربات دو درجه آزادی اسکارا^۳ پیاده سازی شده و اثربخشی روش کنترلی پیشنهادی تایید شده است. در پژوهشی دیگر [۲۶] یک کنترل کننده مد لغزشی فازی^۴ برای کنترل یک ربات زیرسطحی که در معرض اثرات غیرخطی شدید جریان سیال می‌باشد؛ به کار برده شده است. در این کار از الگوریتم ژنتیک برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده استفاده شده است و برتری آن نسبت به کنترل کننده تناسبی مشتقی انتگرالی، نشان داده شده است. همچنین در [۵] یک رویکرد ترکیبی کنترل کننده فازی-مد لغزشی برای کنترل تعقیب مسیر یک وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین^۵ پیشنهاد شده است. تجزیه و تحلیل عملکرد روش پیشنهادی نشان می‌دهد که کوادروتور^۶ با موفقیت مسیر مورد نظر را دنبال می‌کند. به عنوان یک مثال جدید از کاربرد اصلاح فازی با کنترل کننده اصلی مد لغزشی، می‌توان به مقاله [۹] اشاره کرد. در این مقاله، تحلیل و ارزیابی تجربی ربات موازی سریع چهار بازو با کاربرد برداشتن و گذاشتن^۷ ارائه شده است و کنترل مد لغزشی فازی به عنوان ایده کنترلی اصلی با هدف به حداقل رساندن خطای موقعیت عملگر نهایی در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌های عددی گزارش شده همراه با اعتبارسنجی تجربی، کارایی رویکرد پیشنهادی را در کنترل سیستم‌های رباتیک سریع موازی با کاربرد برداشتن و گذاشتن تأیید می‌کند. در پژوهش [۲۷]، یک رویکرد کنترل مد لغزش فازی با هدف کنترل نوسانات و چترینگ برای عملیات ماشین‌کاری با تنظیم نرخ بارگذاری طراحی گردیده است. بدین منظور، یک کنترل کننده ترکیبی شامل یک برآوردگر فازی برای تنظیم ضرایب کنترل کننده با توجه به شرایط سیستم همراه با یک کنترل کننده مد لغزشی برای اطمینان از همگرایی و پایداری کلی سیستم ارائه شده است. مورد [۲۸] را می‌توان به عنوان یکی از نمونه‌های اخیر از کاربرد سیستم‌های فازی در ارائه بهره‌های تنظیم شده کنترل کننده مد لغزشی در کاربردهای رباتیک نام برد که در آن یک رویکرد کنترل مد لغزش فازی بر اساس قانون

شیب سطح لغزش می‌باشد [۶، ۷]. در این روش کنترل، با افزایش بهره کنترل کننده، مقاومت سیستم بالا می‌رود ولی افزایش بهره با محدودیت مواجه است زیرا باعث تشدید پدیده نامطلوب چترینگ و همچنین اشباع عملگرها می‌گردد. از طرف دیگر، کاهش بهره‌های کنترل کننده، عملکرد و مقاومت کنترل کننده را کاهش و خطای ردیابی را افزایش می‌دهد. به همین دلیل، تنظیم مناسب ضرایب کنترل کننده مد لغزشی به طور گسترده توسط جامعه کنترل در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۸، ۹]. در این راستا، تکنیک‌های مختلفی با هدف تنظیم بهره‌های کنترل کننده مد لغزشی با استفاده از رویکردهای برخط یا برون خط^۱ برای ایجاد مقاومت مورد نظر، در مقالات [۱۰، ۱۱] پیشنهاد شده‌اند. اگرچه رویکردهای مبتنی بر روش‌های بالادرنگ به عنوان بسط و گسترش کنترل کننده مد لغزشی رایج، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند اما طراحی و اجرای این نوع روش‌ها در کاربردهای عملی معمولاً موضوعی با پیچیدگی خاص خود بوده است [۱۲-۱۴]. این مساله در کاربردهایی مانند کنترل سیستم‌های رباتیک که سیستمی چند ورودی و چند خروجی با دینامیک پیچیده غیرخطی هستند؛ بیشتر دیده می‌شود چراکه برای پیاده سازی آن‌ها سخت افزاری قوی با سرعت محاسباتی بالا (به منظور جلوگیری از وقفه در عملکرد ربات) مورد نیاز است [۱۵، ۱۶]. از این رو تنظیم تطبیقی بهره‌های کنترلی در کنترل کننده مد لغزشی برای افزایش مقاومت سیستم بدون نیاز به محاسبات زمان‌بر و پیچیده، با هدف جلوگیری از وقفه در عملکرد سیستم، هنوز یکی از چالش‌های طراحی اصلی در کاربردهای مختلف رباتیک است [۱۷-۲۰].

در مطالعات مختلف برای دستیابی به این هدف، رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی در نظر گرفته شده‌اند. برای نمونه، در طراحی کنترل کننده‌ها برای دستیابی به اهداف کنترلی، از سیستم‌های فازی^۲، به عنوان بخشی از خانواده سیستم‌های هوشمند، استفاده شده است. این سیستم‌ها به شکل‌های مستقیم یا به عنوان بخش جبرانی و کمکی در کنار سیستم‌های کنترل اصلی ایفای نقش کرده‌اند [۲۱-۲۳]. بنابر این سیستم‌های فازی را می‌توان برای بهبود بیشتر عملکرد کنترل کننده مد لغزشی به یکی از دو روش زیر مورد استفاده قرار داد. در روش اول سیستم فازی به عنوان کنترل کننده اصلی یا بخشی از یک کنترل کننده ترکیبی، در نظر گرفته می‌شود و با توجه به عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات خارجی، مستقیماً بخشی از انرژی مورد نیاز سیگنال کنترل را تأمین می‌کند [۲۴، ۲۵]. در روش دوم سیستم فازی برای تنظیم بهره‌های کنترل کننده یا به عنوان تخمین‌گر به کار برده می‌شود. به

3 SCARA
4 Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)
5 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
6 Quadrotor
7 Pick and Place (PnP)

1 Online or Offline
2 Fuzzy systems

۲-۲-۱- سینماتیک مستقیم

با فرض معلوم بودن مقادیر θ_2 و θ_3 به عنوان ورودی‌های ربات، موقعیت عملگر نهایی ربات (x_c, y_c) و زوایای بازوهای دیگر ربات از معادلات سینماتیک مستقیم با استفاده از معادلات (۱) تا (۹) قابل محاسبه است [۲۹].

$$x_A = l_2 \cos \theta_2, \quad y_A = l_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

$$x_B = l_1 + l_5 \cos \theta_5, \quad y_B = l_5 \sin \theta_5 \quad (2)$$

$$h = \sqrt{(y_B - y_A)^2 + (x_B - x_A)^2} \quad (3)$$

$$\delta_1 = \pm \arccos\left(\frac{h}{2l_3}\right) \quad (4)$$

$$\psi = \arctan 2(y_B - y_A, x_B - x_A) \quad (5)$$

$$\theta_3 = \delta_1 + \psi \quad (6)$$

$$\theta_4 = \pi - (\theta_3 - 2\psi) \quad (7)$$

$$x_c = x_A + l_3 \cos(\theta_3) \quad (8)$$

$$y_c = y_A + l_3 \sin(\theta_3) \quad (9)$$

توضیح اینکه از نظر ریاضی به دلیل غیر خطی بودن معادلات تعداد پاسخ‌ها یکتا نخواهد بود. یکی از روش‌های انتخاب پاسخ مناسب نزدیک بودن پاسخ به پاسخ مرحله قبلی است طوری که پاسخ هر دو مرحله در یک طرف نقطه منفرد^۲ قرار داشته باشد.

۲-۲-۲- سینماتیک معکوس

با استفاده از معادلات (۱۰) تا (۱۳) مقادیر θ_2 و θ_3 از موقعیت عملگر نهایی ربات قابل محاسبه است [۲۹].

رسیدن به سطح لغزش، با نرخ متغیر برای یک ربات فضایی سه لینکی بررسی شده است.

هدف از این مقاله، طراحی کنترل کننده‌ای برای یک ربات موازی پنج میله‌ای^۱ جهت کنترل مسیر است. طوری که عملاً بتواند عملگر نهایی ربات را روی مسیره‌های مختلف با خطای قابل قبولی حرکت دهد. برای این منظور ابتدا معادلات سینماتیک و دینامیک ربات موازی آورده شده است و سپس با بررسی الگوریتم‌های مختلف کنترل، مشکلات عملی آنها در کنترل ربات مذکور بیان شده است. در ادامه، روش جدیدی بر مبنای مد لغزش ارائه شده که بهره‌های آن به صورت خودکار و برخط، با روش فازی تنظیم می‌شود. نهایتاً مدل‌سازی و بررسی نتایج با دو روش شبیه سازی در نرم افزار متلب و همچنین پیاده سازی بر روی یک ربات صفحه‌ای به صورت آزمایشگاهی انجام شده و عملکرد روش پیشنهادی، با روش‌های دیگر مورد مقایسه قرار داده شده است.

۲- مدلسازی

برای پیاده سازی روش کنترل ارائه شده از یک ربات صفحه‌ای موازی استفاده شده است. از آنجا که روش‌های کنترل بیان شده بر اساس مدل سیستم کار می‌کنند، ابتدا لازم است مدل ربات معرفی شده و معادلات سینماتیکی و دینامیکی آن بیان شود.

۲-۱- مشخصات ربات

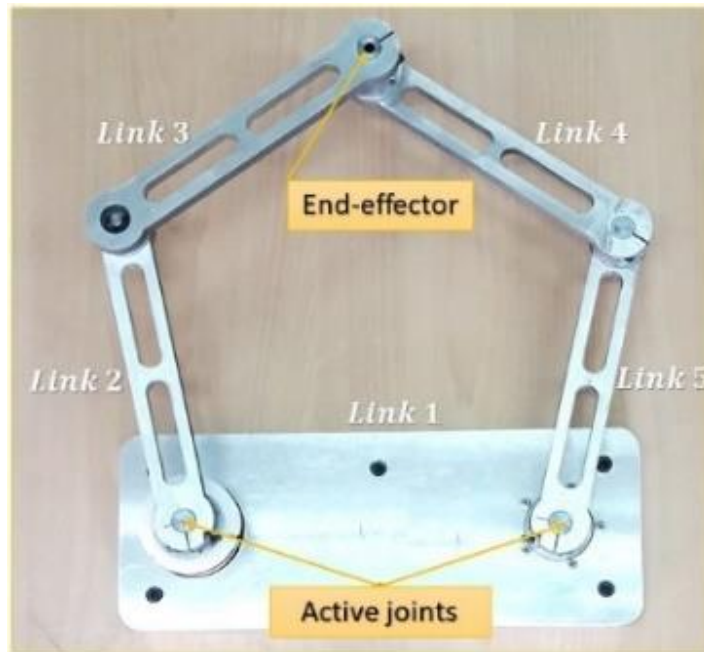
تصویر ربات موازی که در این مقاله مورد تحلیل گرفته، در شکل ۱ مشاهده می‌شود. شکل ۲ نیز پارامترهای ربات را نشان می‌دهد. طول بازوها با l_i ، موقعیت مطلق مفاصل با θ_i و فاصله هر مفصل تا مرکز جرم بازو مطابق شکل ۲، با l_{gi} نمایش داده شده است. جرم بازوها با m_i و لنگرهای اینرسی نسبت به مرکز جرم بازو با J_i و نسبت به مفصل ابتدای بازو با J_{O_i} بیان شده‌اند. ربات دارای دو موتور است که گشتاور هریک به ترتیب با T_p و T_h مشخص شده است. همچنین مقادیر عددی مشخصات ربات در جدول ۱ آمده است.

۲-۲- سینماتیک ربات

در الگوریتم به کار رفته، معادلات سینماتیک مستقیم و معکوس ربات مورد نیاز است. لذا در این بخش هر دو دسته از معادلات ذکر می‌شود. این معادلات بر مبنای تصویر رسم شده در شکل ۲ نوشته شده‌اند.

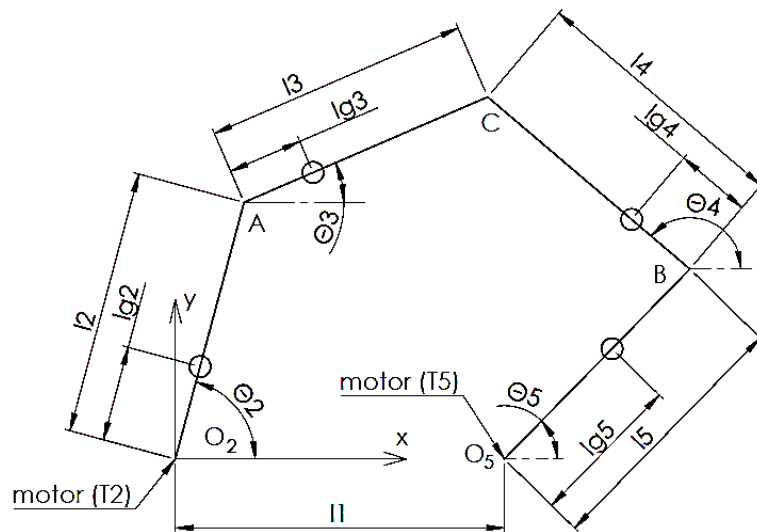
2 singularity point

1 Five-bar parallel robot



شکل ۱. ربات پنج میله‌ای موازی و موقعیت موتورها و شماره بازوها

Fig. 1. Five-bar parallel robot, position of motors and number of arms.



شکل ۲. دستگاه مختصات و پارامترهای استفاده شده در معادلات

Fig. 2. Coordinate system and parametr used in equations.

جدول ۱. مشخصات و مقادیر عددی پارامترهای ربات به کار گرفته شده برای مدلسازی

Table 1. Specifications and numerical values of robot parameters used for modeling

۰/۴۹۵ kg	m_r	۳۱۰ mm	l_1
۰/۴۴۹ kg	m_f	۲۵۰ mm	l_r
$۱۱/۷ \times ۱۰^{-۳}$ kg.m ^۲	J_{or}	۲۵۰ mm	l_r
$۴/۴۹ \times ۱۰^{-۳}$ kg.m ^۲	J_r	۲۵۰ mm	l_f
$۵/۵۱ \times ۱۰^{-۳}$ kg.m ^۲	J_f	۲۵۰ mm	l_d
$۱۲/۰ \times ۱۰^{-۳}$ kg.m ^۲	J_{od}	۱۳۴ mm	lg_r
		۱۲۶ mm	lg_f
400 W AC Servo Motor (ECMA-C20604RS)			نوع موتور
Delta Standard AC Servo Drive (ASDA-B2 Series)			درایور موتور

که L لاگرانژین، η مختصه عمومیت یافته (در این مساله معادل θ) و W کار انجام شده توسط بار خارجی است. در این مساله بار خارجی، گشتاورهای دو موتور در مفاصل ۲ و ۵ است. لاگرانژین برابر است با:

$$L = T - U \quad (۱۵)$$

T انرژی جنبشی و U انرژی پتانسیل است. در این مقاله ربات افقی فرض شده پس تغییراتی در انرژی پتانسیل وجود نخواهد داشت. لذا کل انرژی سیستم معادل است با:

$$T = \left(\frac{1}{2}I_{o2}\dot{\theta}_2^2\right) + \left(\frac{1}{2}I_3\dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2}m_3v_3^2\right) + \left(\frac{1}{2}I_4\dot{\theta}_4^2 + \frac{1}{2}m_4v_4^2\right) + \left(\frac{1}{2}I_{o5}\dot{\theta}_5^2\right), \quad U = 0 \quad (۱۶)$$

v_i سرعت مرکز جرم بازوی i ام است و بقیه پارامترها در جدول ۱ معرفی شده‌اند.

$$\vec{v}_3 = \frac{d}{dt} [l_2 \cos \theta_2 + l_{g3} \cos \theta_3 \quad l_2 \sin \theta_2 + l_{g3} \sin \theta_3] \quad (۱۷)$$

$$\vec{v}_4 = \frac{d}{dt} [l_5 \cos \theta_5 + l_{g4} \cos \theta_4 \quad l_5 \sin \theta_5 + l_{g4} \sin \theta_4] \quad (۱۸)$$

$$k_1 = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}, \quad (۱۰)$$

$$k_2 = \sqrt{(x_c - l_1)^2 + y_c^2}$$

$$\gamma_1 = \pm \arccos \left(\frac{l_2^2 + k_1^2 - l_3^2}{2l_2k_1} \right), \quad (۱۱)$$

$$\gamma_2 = \pm \arccos \left(\frac{l_5^2 + k_2^2 - l_4^2}{2l_5k_2} \right)$$

$$\xi_1 = \arctan 2(y_c, x_c), \quad (۱۲)$$

$$\xi_2 = \arctan 2(y_c, x_c - l_1)$$

$$\theta_2 = \xi_1 + \gamma_1, \quad \theta_5 = \xi_2 - \gamma_2 \quad (۱۳)$$

۲-۳- دینامیک ربات

در این مقاله از روش‌های کنترلی استفاده شده است که بر پایه مدل دینامیکی سیستم عمل می‌کنند، پس لازم است که معادلات دینامیکی مدل به دست آمده و حل شوند. در اینجا این معادلات به کمک روش لاگرانژ استخراج می‌شوند.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}} - \frac{\partial L}{\partial \eta} = \delta W \quad (۱۴)$$

$$\begin{aligned}
 & I_3 \dot{x}_6 + l_{g3}^2 m_3 \dot{x}_6 + l_3 \lambda_1 \sin x_2 + \\
 & l_2 l_{g3} m_3 x_5^2 \cos x_1 \sin x_2 + \\
 & l_2 l_{g3} m_3 \dot{x}_5 \cos x_1 \cos x_2 + \\
 & l_2 l_{g3} m_3 \dot{x}_5 \sin x_1 \sin x_2 = \\
 & \cos x_2 (l_2 l_{g3} m_3 \sin x_1 \cdot x_5^2 + l_3 \lambda_2)
 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned}
 & I_4 \dot{x}_7 + l_{g4}^2 m_4 \dot{x}_7 + l_4 \lambda_2 \cos x_3 + \\
 & l_5 l_{g4} m_4 x_8^2 \cos x_4 \sin x_3 + \\
 & l_5 l_{g4} m_4 \dot{x}_8 \cos x_3 \cos x_4 + \\
 & l_5 l_{g4} m_4 \dot{x}_8 \sin x_3 \sin x_4 = \\
 & l_5 l_{g4} m_4 \cos x_3 \sin x_4 \cdot x_8^2 + l_4 \lambda_1 \sin x_3
 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned}
 & l_5 l_{g4} m_4 \cos x_4 \sin x_3 x_7^2 + T_5 + \\
 & l_5 \lambda_1 \sin x_4 = I_{o5} \dot{x}_8 + l_5^2 m_4 \dot{x}_8 + \\
 & l_5 \lambda_2 \cos x_4 + l_5 l_{g4} m_4 x_7^2 \cos x_3 \sin x_4 + \\
 & l_5 l_{g4} m_4 \dot{x}_7 \cos x_3 \cos x_4 + \\
 & l_5 l_{g4} m_4 \dot{x}_7 \sin x_3 \sin x_4
 \end{aligned} \quad (26)$$

از آنجا که در معادلات (۱۹) و (۲۰) مقادیر α_1 و α_2 صفر هستند با دو بار مشتق‌گیری از آنها نسبت به زمان و برابر صفر قرار دادن آنها، معادلات (۲۷) و (۲۸) نتیجه می‌شوند.

$$\begin{aligned}
 & -l_2 x_5^2 \cos x_1 - l_3 x_6^2 \cos x_2 + \\
 & l_4 x_7^2 \cos x_3 + l_5 x_8^2 \cos x_4 - l_2 x_5 \sin x_1 - \\
 & l_3 x_6 \sin x_2 + l_4 x_7 \sin x_3 + l_5 x_8 \sin x_4 = 0
 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
 & -l_2 x_5^2 \sin x_1 - l_3 x_6^2 \sin x_2 + l_4 x_7^2 \sin x_3 + \\
 & l_5 x_8^2 \sin x_4 + l_2 x_5 \cos x_1 + l_3 x_6 \cos x_2 - \\
 & l_4 x_7 \cos x_3 - l_5 x_8 \cos x_4 = 0
 \end{aligned} \quad (28)$$

از حذف λ_1 و λ_2 از معادلات (۲۳) تا (۲۶) و مرتب کردن آنها با در نظر گرفتن دو معادله (۲۷) و (۲۸)، دستگاه معادلات دیفرانسیل بیانگر دینامیک ربات بر حسب متغیرهای حالت، به شرح زیر به دست می‌آید.

ربات شکل ۲ یک بازوی ماهر موازی است پس قید موازی بودن ربات باید به معادلات دینامیک افزوده شود این قیود به شکل معادلات (۱۹) و (۲۰) نوشته شده و در شکل کامل شده لاگرانژ قرار می‌گیرد.

$$\alpha_1 = l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3 - l_1 - l_5 \cos \theta_5 - l_4 \cos \theta_4 \quad (19)$$

$$\alpha_2 = l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3 - l_5 \sin \theta_5 - l_4 \sin \theta_4 \quad (20)$$

برای در نظر گرفتن معادلات قیدی در معادلات دینامیکی ربات لازم است از ضرایب لاگرانژ در معادله (۱۴) استفاده شود. این معادله برای ۴ بازو به صورت معادله (۲۱) در می‌آید.

$$\begin{aligned}
 & \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \\
 & \delta W_i + \lambda_1 \frac{\partial \alpha_1}{\partial \theta_i} + \lambda_2 \frac{\partial \alpha_2}{\partial \theta_i} \quad i = 2, 3, 4, 5
 \end{aligned} \quad (21)$$

λ_1 و λ_2 ضرایب لاگرانژند که بعد مشتق‌گیری از معادلات محاسبه خواهند شد. برای ادامه کار، متغیرهای حالت به صورت معادله (۲۲) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned}
 \vec{x} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6 \quad x_7 \quad x_8]^T = \\
 [\theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4 \quad \theta_5 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3 \quad \dot{\theta}_4 \quad \dot{\theta}_5]^T
 \end{aligned} \quad (22)$$

با محاسبه معادله (۲۱) و قرار دادن متغیرهای حالت به جای زوایا و سرعت‌ها در معادلات به دست آمده، معادلات دینامیکی حاصل به شکل معادلات (۲۳) تا (۲۶) در خواهند آمد.

$$\begin{aligned}
 & l_2 l_{g3} m_3 \cos x_1 \sin x_2 \cdot x_6^2 + \\
 & T_2 + l_2 \lambda_2 \cos x_1 = I_{o2} \dot{x}_5 + l_2^2 m_3 \dot{x}_5 + \\
 & l_2 \lambda_1 \sin x_1 + l_2 l_{g3} m_3 x_6^2 \cos x_2 \sin x_1 + \\
 & l_2 l_{g3} m_3 \dot{x}_6 \cos x_1 \cos x_2 + \\
 & l_2 l_{g3} m_3 \dot{x}_6 \sin x_1 \sin x_2
 \end{aligned} \quad (23)$$

$$e_3 = -l_2 x_5^2 \sin(x_1) - l_3 x_6^2 \sin(x_2) + l_4 x_7^2 \sin(x_3) + l_5 x_8^2 \sin(x_4) \quad (36)$$

$$a_4 = -l_2 l_5 m_3 l_{g3} \sin(x_3 - x_4) \times \cos(x_1 - x_2) \csc(x_2 - x_3) / l_3 \quad (37)$$

$$b_4 = -\sin(x_3 - x_4) \times \csc(x_2 - x_3) l_5 (m_3 l_{g3}^2 + J_3) / l_3 \quad (38)$$

$$c_4 = -l_5 (m_4 l_{g4} (l_{g4} \sin(x_2 - x_4) \times \csc(x_2 - x_3) - l_4 \cos(x_3 - x_4))) + J_4 \sin(x_2 - x_4) \csc(x_2 - x_3) / l_4 \quad (39)$$

$$d_4 = (m_4 l_5^2 (2l_4 - l_{g4} (\sin(x_2 + x_3 - 2x_4) \times \csc(x_2 - x_3) + 1)) / 2 + l_4 J_{o5}) / l_4 \quad (40)$$

$$g_4 = \sin(x_3 - x_4) \csc(x_2 - x_3) l_5 (l_2 l_4 m_3 x_5^2 l_{g3} \sin(x_1 - x_2) - l_3 l_{g4} m_4 (l_4 x_7^2 \sin(x_2 - x_3) + l_5 x_8^2 \sin(x_2 - x_4))) / l_3 l_4 \quad (41)$$

نهایتاً معادلات فضای حالت سیستم به شکل معادله (۴۲) نوشته می‌شود:

$$\dot{\vec{x}} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ h_2(\vec{x}) & g_2(\vec{x}) \\ h_3(\vec{x}) & g_3(\vec{x}) \\ h_4(\vec{x}) & g_4(\vec{x}) \\ h_5(\vec{x}) & g_5(\vec{x}) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} T_2 \\ T_5 \end{Bmatrix} \quad (42)$$

مقادیر $f_i, g_i, h_i (i=2,3,4,5)$ با داشتن بردار حالت، به صورت برخط به هنگام اجرای برنامه از حل چهار معادله و چهار مجهول دستگاه معادله

$$\begin{cases} a_1 \dot{x}_5 + b_1 \dot{x}_6 + c_1 \dot{x}_7 + d_1 \dot{x}_8 - T_2 + g_1 = 0 \\ -l_2 x_5^2 \sin x_1 - l_3 x_6^2 \sin x_2 + l_4 x_7^2 \sin x_3 + l_5 x_8^2 \sin x_4 + e_2 = 0 \\ l_2 x_5^2 \cos x_1 + l_3 x_6^2 \cos x_2 - l_4 x_7^2 \cos x_3 - l_5 x_8^2 \cos x_4 + e_3 = 0 \\ a_4 \dot{x}_5 + b_4 \dot{x}_6 + c_4 \dot{x}_7 + d_4 \dot{x}_8 - T_5 + g_4 = 0 \end{cases} \quad (29)$$

ضرایب معادله (۲۹)، توابعی از متغیرهای حالت هستند که به شرح معادلات (۳۰) تا (۴۱) قابل محاسبه می‌باشند.

$$a_1 = J_{o2} + m_3 l_2^2 (l_3 - 3l_{g3} \sin(x_1 - x_3) \cos(x_1 - x_2) \csc(x_2 - x_3)) / l_3 \quad (30)$$

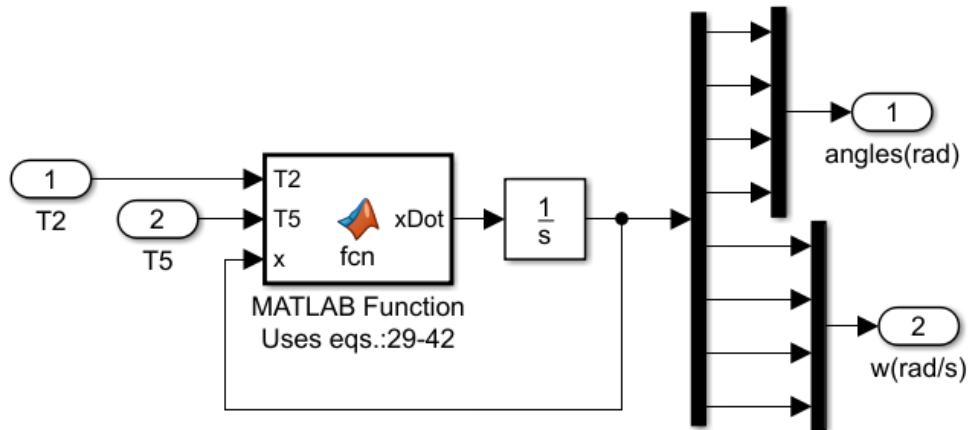
$$b_1 = -(l_2 (m_3 l_{g3} (l_{g3} \sin(x_1 - x_3) \times \csc(x_2 - x_3) - l_3 \cos(x_1 - x_2))) + J_3 \sin(x_1 - x_3) \csc(x_2 - x_3)) / l_3 \quad (31)$$

$$c_1 = -(\sin(x_1 - x_2) \csc(x_2 - x_3) \times l_2 (m_4 l_{g4}^2 + J_4)) / l_4 \quad (32)$$

$$d_1 = -(l_2 l_5 m_4 l_{g4} \sin(x_1 - x_2) \times \cos(x_3 - x_4) \csc(x_2 - x_3)) / l_4 \quad (33)$$

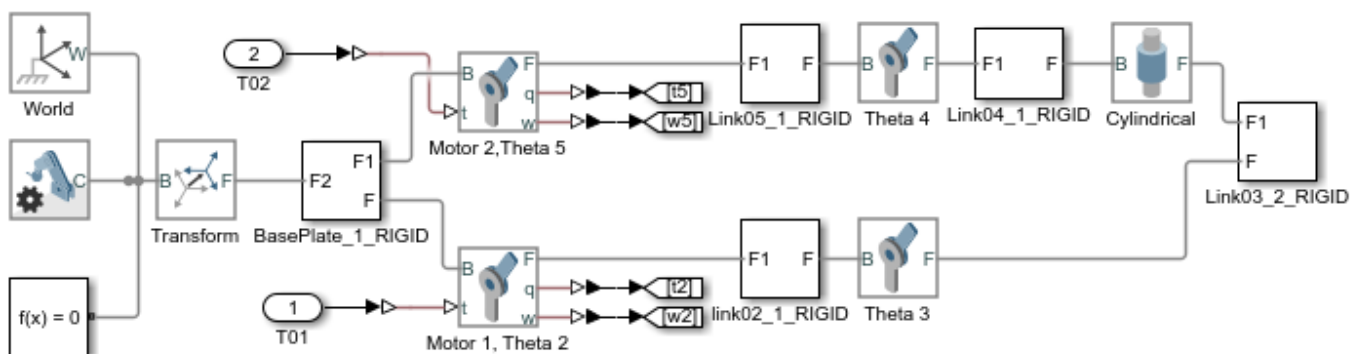
$$g_1 = \sin(x_1 - x_2) \csc(x_2 - x_3) l_2 \times (l_2 l_4 m_3 x_5^2 l_{g3} \sin(x_1 - x_3) + l_3 (l_4 m_3 x_6^2 l_{g3} \sin(x_2 - x_3) - l_5 m_4 x_8^2 l_{g4} \sin(x_3 - x_4))) / l_3 l_4 \quad (34)$$

$$e_2 = -l_2 x_5^2 \cos(x_1) - l_3 x_6^2 \cos(x_2) + l_4 x_7^2 \cos(x_3) + l_5 x_8^2 \cos(x_4) \quad (35)$$



شکل ۳. مدل ربات با معادلات (۲۹) تا (۴۲)

Fig. 3. Robot model using equations 29 to 42



شکل ۴. مدل ربات با بخش مکانیک سیمولینک

Fig. 4. Robot model using Simscape of Simulink

مربوط به موتور اول^۴ و موتور دوم^۵ و همچنین افزودن دو خروجی موقعیت و سرعت به هریک از دو بلوک مذکور، کامل شده است. خروجی این مدل با حل معادلات فوق‌الذکر تطبیق داده شده است. شکل ۶ دقت و درستی معادلات دینامیکی استخراج شده برای سیستم را نشان می‌دهد.

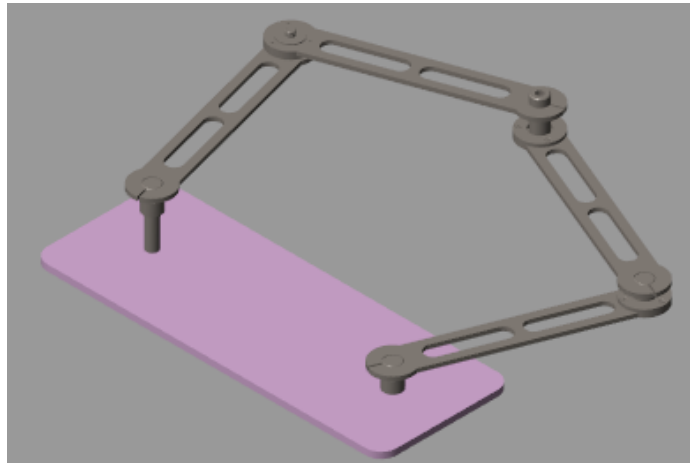
۳- کنترل ربات

در این بخش از مقاله روش‌های کنترل گشتاور محاسبه شده^۶ و روش

(۲۹) محاسبه می‌شوند. به کمک تابع^۱ موجود در نمودار نشان‌داده شده در شکل ۳، این معادلات در الگوریتم‌های کنترل بکار گرفته خواهند شد؛ لذا برای بررسی درستی آنها از بخش شبیه‌ساز مکانیک نرم افزار سیمولینک متلب^۲ استفاده شده است. به این روش که مدل ربات در نرم افزار سالدورک همانند شکل ۵ مدل‌سازی شده و سپس به محیط متلب وارد^۳ شده و به شکل ۴ درآمده است. البته این مدل با اضافه کردن ورودی گشتاور به دو بلوک

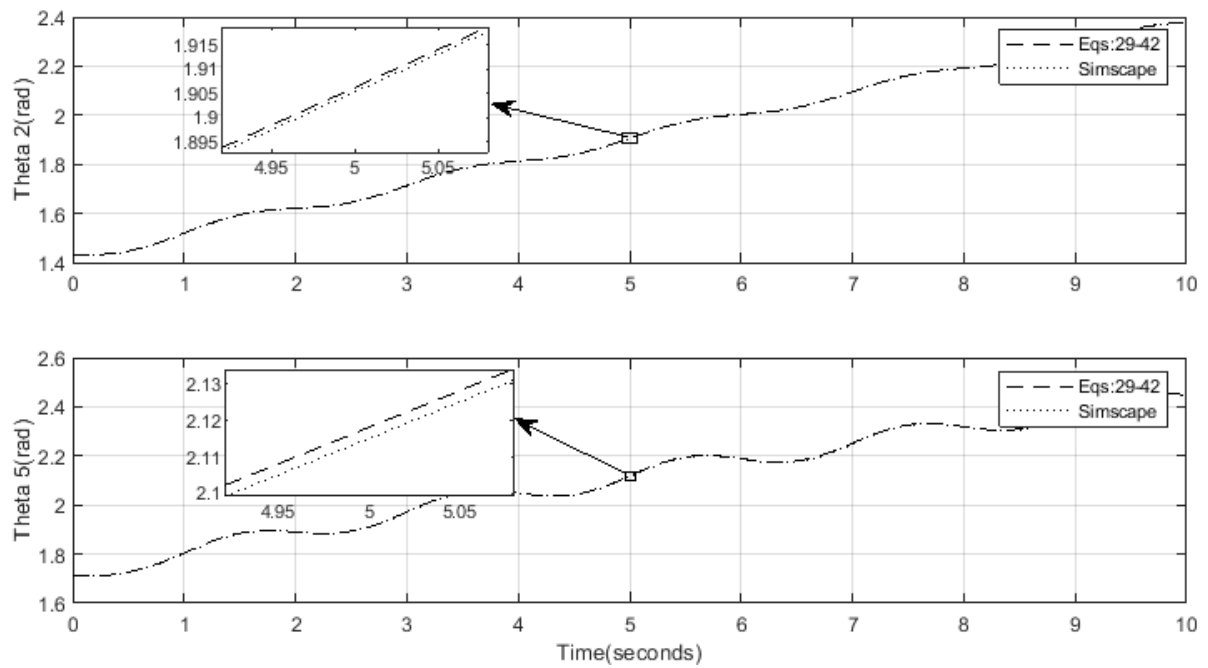
- 4 Motor 1, Theta 2
- 5 Motor 2, Theta 5
- 6 Computed torque control

- 1 MATLAB Function
- 2 MATLAB>Simulink>Simscape
- 3 Import



شکل ۵. مدل طراحی شده در سالید و وارد شده به متلب

Fig. 5. Solidworks model imported into Matlab



شکل ۶. مقایسه نتایج معادلات استخراج شده با مدل سیمولینک

Fig. 6. Comparing the results of the obtained equations with the Simulink model.

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_2 + 2\lambda_2 \dot{\theta}_2 + \lambda_2^2 \tilde{\theta}_2 = 0 \\ \ddot{\theta}_5 + 2\lambda_5 \dot{\theta}_5 + \lambda_5^2 \tilde{\theta}_5 = 0 \end{cases} \quad (46)$$

شکل ۷ نمودار کنترل ربات از روش گشتاور محاسبه شده است که در سیمولینک به کار رفته است. شماره معادلات به کار رفته در هر بخش، ذیل آن بخش نوشته شده است. کنترل در فضای مفصلی انجام شده است به این شکل که ابتدا مسیر خواسته شده، از طریق سینماتیک معکوس به موقعیت، سرعت و شتاب دو مفصل فعال^۱ تبدیل شده و به سیستم کنترل داده می شود. در بخش کنترل نیز بر اساس این اطلاعات و نیز پسخورد گرفته شده از سیستم، گشتاور لازم موتورها محاسبه شده و به راه انداز^۲ موتورها ارسال می شود.

تبادل اطلاعات سیمولینک و سیستم الکترونیکی دستگاه - شامل دریافت مقادیر حسگرها و ارسال مقدار گشتاورها - با فاصله زمانی ۱۰^{-۳} میلی ثانیه انجام می شود.

نمودار تهیه شده جهت ارتباط کامپیوتر با سیستم ربات در شکل ۸ مشاهده می شود. این ارتباط با درگاه سریال^۳ کامپیوتر ایجاد شده است.

۳-۲- روش کنترل مد لغزشی

یکی از روش های کاربردی کنترل سیستم های غیرخطی که با وجود نامعینی های سیستم به خوبی عمل می کند روش مد لغزشی است. این روش هم بر مبنای مدل سیستم کار می کند ولی همواره خروج سیستم از مسیر داده شده را در نظر گرفته و سیگنال کنترل را بر اساس این خطا اصلاح می کند. این پروژه بر روی یک سیستم دو درجه آزادی پیاده سازی شده لذا دو سطح لغزش به شکل معادله (۴۷) برای هر یک از مفاصل تعریف می شود.

$$s_i = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_i \right) e_i \quad i = 2, 5 \quad (47)$$

که در آن λ ثابت کنترل و e خطا به شکل معادله (۴۸) است.

کنترل مد لغزشی [۳۰] به اختصار شرح داده شده و کاستی هر کدام در کنترل عملی ربات مورد نظر مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت پیشنهادی برای برطرف شدن این مشکلات مطرح خواهد شد.

۳-۱- روش گشتاور محاسبه شده

از آنجا که سیستم دو درجه آزادی است پس وضعیت حرکتی ربات فقط به دو زاویه ورودی بستگی دارد پس فقط کافی است مسیر دو زاویه ورودی ربات کنترل شود. دو معادله پنجم و هشتم از دستگاه معادلات (۴۲) را می توان به شکل معادله (۴۳) نوشت:

$$\begin{cases} \dot{x}_5 \\ \dot{x}_8 \end{cases} = \begin{cases} \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_5 \end{cases} = \begin{cases} f_2(\bar{x}) \\ f_5(\bar{x}) \end{cases} + \begin{bmatrix} h_2(\bar{x}) & g_2(\bar{x}) \\ h_5(\bar{x}) & g_5(\bar{x}) \end{bmatrix} \begin{cases} T_2 \\ T_5 \end{cases} \quad (43)$$

با تعمیم روش گشتاور محاسبه شده به این سیستم، قوانین کنترل به شکل معادله (۴۴) در می آید.

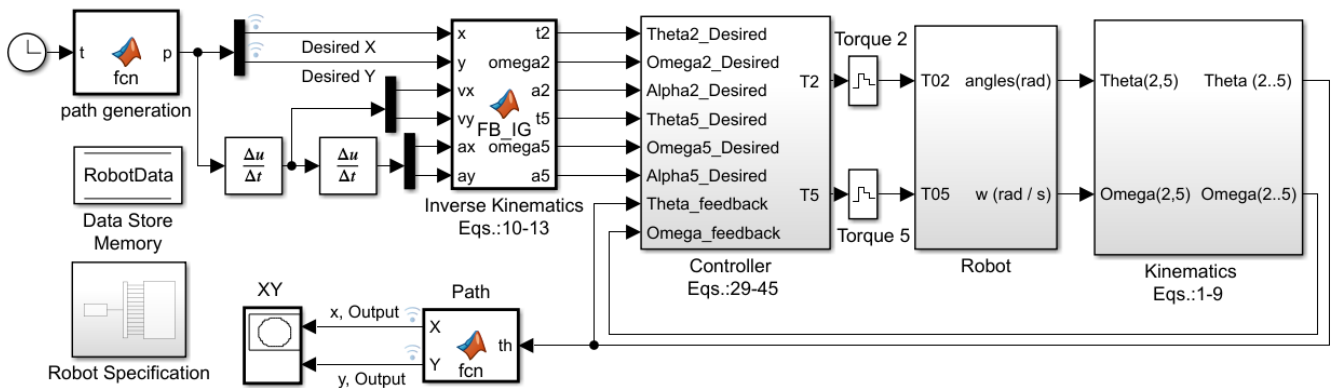
$$\begin{cases} T_2 \\ T_5 \end{cases} = \begin{bmatrix} h_2(\bar{x}) & g_2(\bar{x}) \\ h_5(\bar{x}) & g_5(\bar{x}) \end{bmatrix}^T \left(- \begin{cases} f_2(\bar{x}) \\ f_5(\bar{x}) \end{cases} + \begin{cases} n_2 \\ n_5 \end{cases} \right) \quad (44)$$

که در آن

$$\begin{cases} n_2 = \ddot{\theta}_{2d} - 2\lambda_2 \dot{\theta}_2 - \lambda_2^2 \tilde{\theta}_2 \\ n_5 = \ddot{\theta}_{5d} - 2\lambda_5 \dot{\theta}_5 - \lambda_5^2 \tilde{\theta}_5 \end{cases} \quad (45)$$

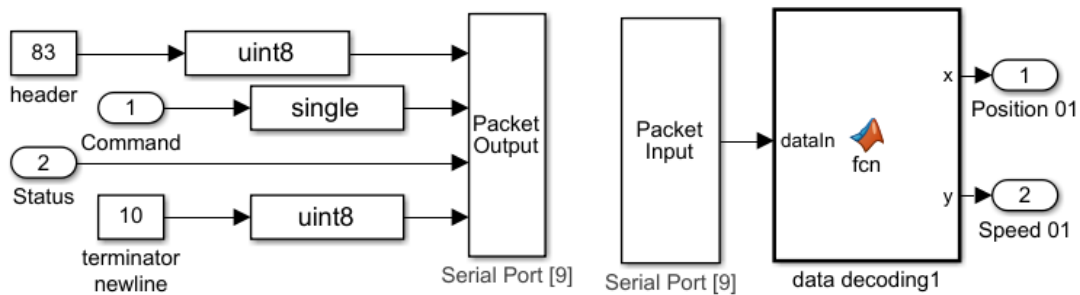
$\tilde{\theta}_i = \theta_i - \theta_{id}$ خطا در موقعیت زاویه ای بازوی i ام از موقعیت مطلوب و θ_{id} زاویه مطلوب و مورد نظر بازوی i ام است. λ_p و λ_d هم ثابت های کنترل هستند. با قانون کنترل (۴۴)، معادلات (۴۳) به شکل معادلات مستقل خطی (۴۶) بر حسب خطا در می آید که نشانگر پایداری مجانبی سیستم با میرایی بحرانی خطا به سمت صفر است.

- 1 Active joints
- 2 Motor drivers
- 3 Sample Time
- 4 Serial port



شکل ۷. نمودار کنترل ربات به روش گشتاور محاسبه شده

Fig. 7. Robot control diagram using computed torque method



شکل ۸. نحوه ارتباط کامپیوتر با ربات

Fig. 8. The method of communication between the robot and the computer.

$$\begin{cases} \hat{T}_2 \\ \hat{T}_5 \end{cases} = \begin{bmatrix} h_2(\bar{x}) & g_2(\bar{x}) \\ h_5(\bar{x}) & g_5(\bar{x}) \end{bmatrix}^{-1} \quad (50)$$

$$\begin{pmatrix} \ddot{\theta}_{d_2} \\ \ddot{\theta}_{d_5} \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda_2 & 0 \\ 0 & \lambda_5 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_{d_2} \\ \dot{\theta}_5 - \dot{\theta}_{d_5} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} f_2(\bar{x}) \\ f_5(\bar{x}) \end{pmatrix}$$

$$e_i = \theta_i - \theta_{d_i} \quad (48)$$

زیرنویس d هم بیانگر مقدار مطلوب و ورودی کنترلر است.

بر اساس روش کنترل مد لغزشی باید S و مشتق اول آن برابر صفر باشد.

پس دو معادله (۴۹) برای سیستم مورد نظر به دست خواهد آمد.

به جهت برقراری شرط لغزش بخش دوم قانون کنترل اضافه شده و

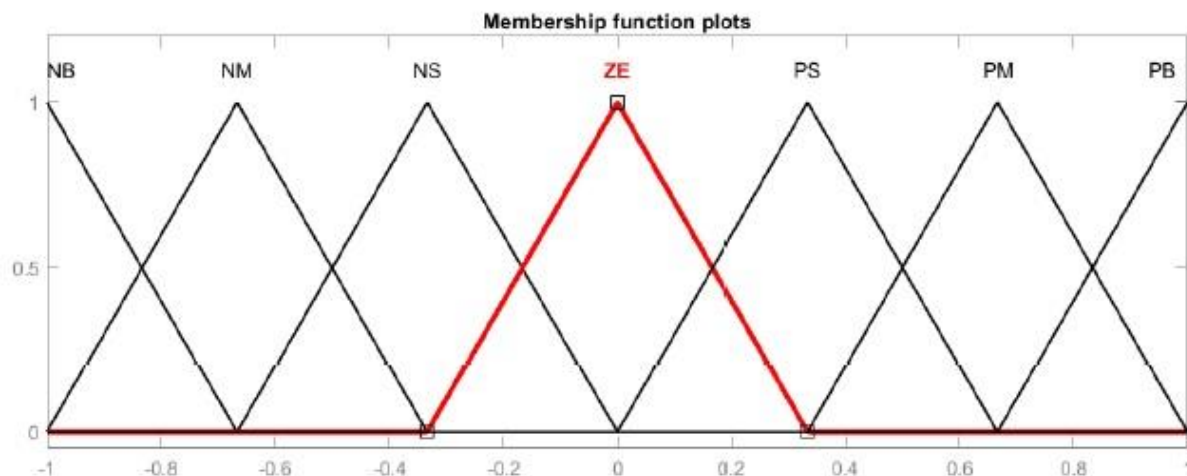
نهایتاً گشتاور موتورها به شکل معادله (۵۱) به دست می‌آید.

$$\ddot{\theta}_i = \ddot{\theta}_{d_i} - \lambda_i \dot{e}_i, \quad i = 2, 5 \quad (49)$$

$$\begin{cases} T_2 \\ T_5 \end{cases} = \begin{cases} \hat{T}_2 \\ \hat{T}_5 \end{cases} - \begin{bmatrix} k_2 & 0 \\ 0 & k_5 \end{bmatrix} \begin{cases} \tanh\left(\frac{s_1}{\Phi_1}\right) \\ \tanh\left(\frac{s_2}{\Phi_2}\right) \end{cases} \quad (51)$$

با قرار دادن مقادیر e_i از معادله (۴۸) و $\dot{\theta}_i$ از معادله (۴۳) در معادله (۴۹)،

بخش اول قوانین کنترل به شرح معادله (۵۰) به دست می‌آید.



شکل ۹. نمودار تابع عضویت متغیرها و خروجی فازی

Fig. 9. Membership function diagram of fuzzy variables and fuzzy outputs.

خودکار و به روش فازی به دست آید. چنانکه گفته شد این قسمت از سیگنال به مقدار فاصله حالت سیستم از سطح لغزش و نیز به سرعت تغییر این فاصله بستگی دارد. بنابر این پارامترهای فازی s و مشتق آن در نظر گرفته می شود. هر سه متغیر s, \dot{s}, T_f در بازه $[-1, 1]$ نرمالایز شده و به صورت منفی بزرگ (NB)، منفی متوسط (NM)، منفی کوچک (NS)، صفر (ZE)، مثبت کوچک (PS)، مثبت متوسط (PM) و مثبت بزرگ (PB) دسته بندی شده اند. نمودار تابع عضویت هر سه متغیر یکسان و به شکل ۹ خواهد بود. با کمی کار با سیستم کنترل مد لغزشی بخش قبل و مشاهده رفتار سیستم و همچنین با استفاده از منابعی نظیر [۳۱، ۳۲] قوانین فازی به شکل جدول ۲ نوشته می شود.

با استفاده از توابع نرم افزار متلب، نمودار کنترل کننده به شکل ۱۰ طراحی می شود. این نمودار در داخل جعبه کنترل کننده در شکل ۷ قرار داده می شود. به این ترتیب نیازی به تنظیم دستی ضرایب کنترل نیست و این کار به صورت خودکار انجام می شود. ضمناً T_f هر موتور به صورت مستقل از دیگری به دست می آید.

۴- شبیه سازی

جهت شبیه سازی و بررسی صحت مطالب و همچنین بررسی عملکرد سیستم های کنترل، به دو شکل مدل سازی متلب و اعمال بر ربات موجود در آزمایشگاه دانشگاه عمل شده است. به این ترتیب که یک مسیر دایره ای به

در معادله (۵۱) ضرایب k_i بیانگر وزن دو بخش کنترلر بوده و مقدار Φ_i برای حذف چترینگ استفاده می شود و سیستم را مجاز می سازد که در صورت لزوم به اندازه شرط مرزی Φ_i در حوالی صفحه $s=0$ قرار داشته باشد.

ثابت های λ_i ، k_i و Φ_i ثابت هایی هستند که بر اساس نوع سیستم و عملکرد مورد انتظار از سیستم، تعیین می شوند. تنها شرط تعیین این پارامترها شرط لغزش به شکل معادله (۵۲) می باشد [۳۰] که البته از آن معادله، جواب یکتا و یا جواب هایی به تعداد محدود به دست نخواهد آمد و مقدار هر یک، پاسخ سیستم را تحت الشعاع قرار خواهد داد.

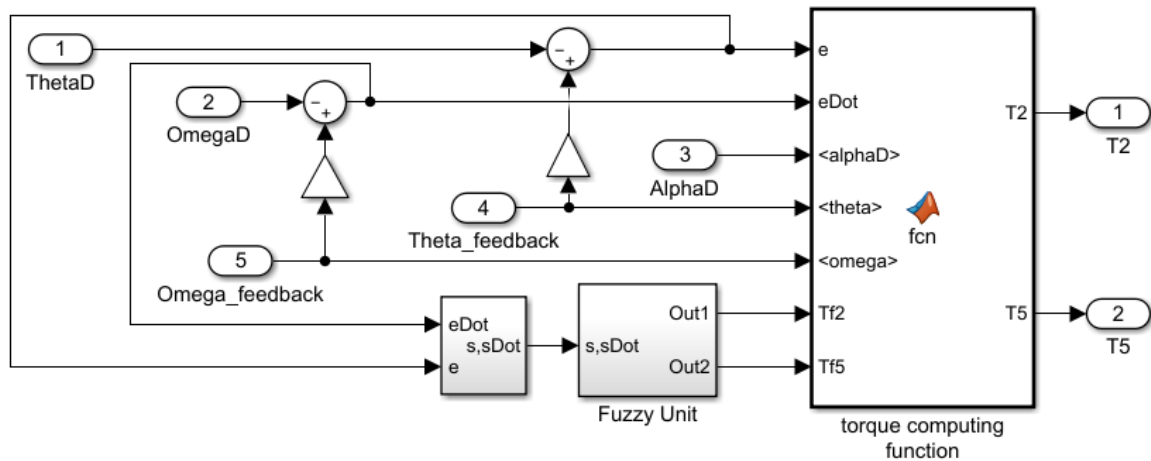
$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \quad (52)$$

۳-۳ روش کنترل مد لغزشی تنظیم شونده به روش فازی با توجه به معادله (۵۱) ملاحظه می شود که در روش سطح لغزش، سیگنال کنترل از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول (\hat{T}_i) وابسته به دینامیک سیستم است و بخش دوم بستگی به سطح لغزش دارد. در این بخش به کمک روش فازی سعی می شود قسمت دوم سیگنال کنترل (T_f) - که در بخش قبل به کمک ثابت های کنترل محاسبه می شدند- به صورت

جدول ۲. قوانین فازی برای محاسبه T_f

Table 2. Fuzzy rules for calculating T_f

T_f	s						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	ZE	ZE	ZE	ZE
NM	PB	PB	PB	ZE	ZE	ZE	NS
NS	PB	PB	PM	ZE	ZE	NS	NM
ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PS	PM	PS	ZE	ZE	NM	NB	NB
PM	PS	ZE	ZE	ZE	NB	NB	NB
PB	ZE	ZE	ZE	ZE	NB	NB	NB



شکل ۱۰. نمودار استفاده شده در سیمولینک برای تولید سیگنال کنترل روش مد لغزشی تنظیم شونده به روش فازی

Fig. 10. The diagram used in Simulink to generate the control signal of the adjustable sliding mode method by the fuzzy method.

حساب رادیان برای تغییر شرایط اولیه ربات در نظر گرفته شده است. دست

$$t = 0 \text{ در موقعیت حرکت در}$$

و $\phi = 0$ یعنی در $x = 0.155 \text{ m}$ و $y = 0.107 \text{ m}$ قرار داده می شود.

پس با تغییر ϕ ، دست ربات از نقطه شروع مسیر فاصله می گیرد.

۴-۱ نتایج شبیه سازی روش گشتاور محاسبه شده

ورودی سیستم و پاسخ آن در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. سرعت

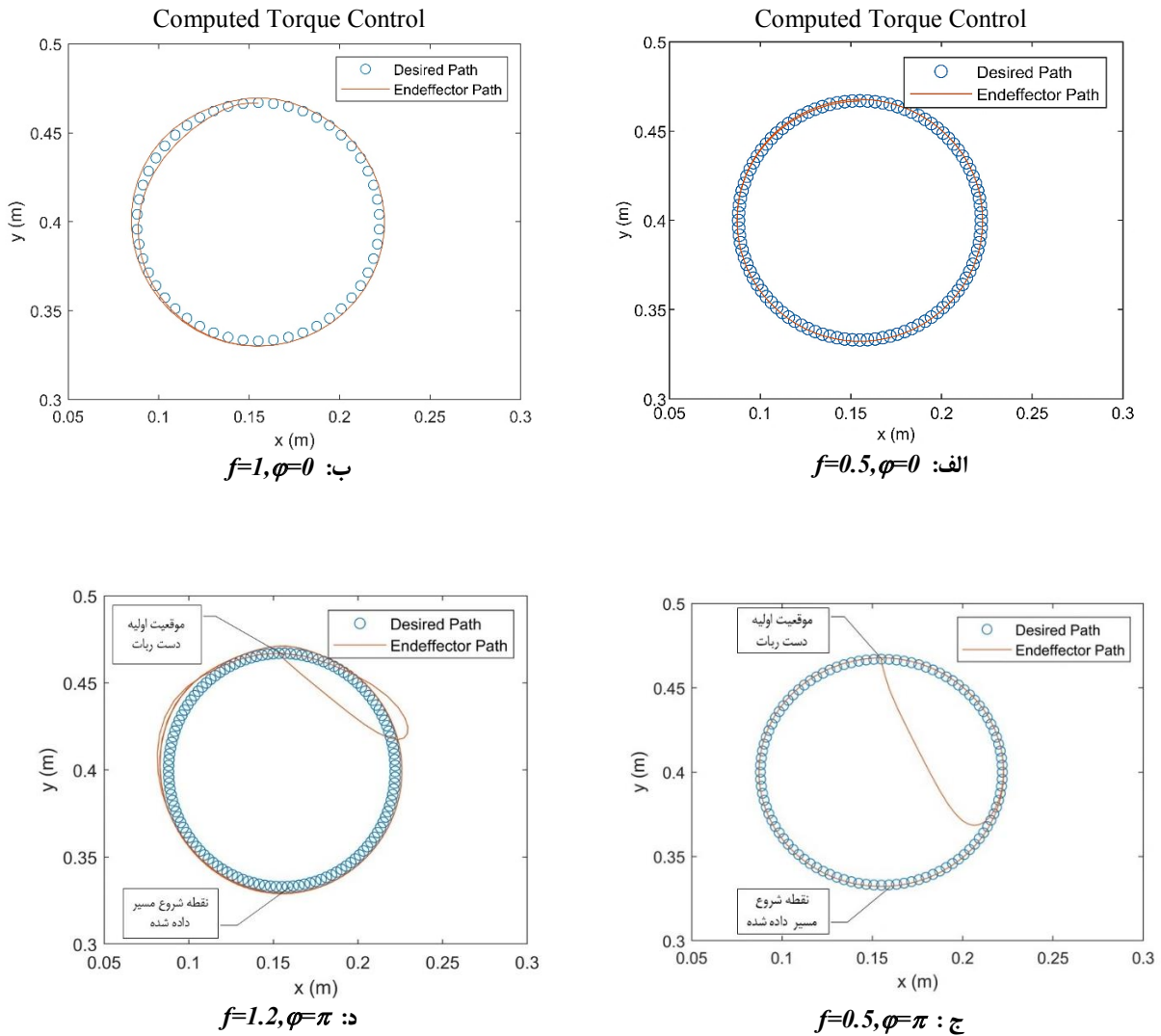
حرکت روی دایره و همچنین شرایط اولیه سیستم در هر شکل متفاوت است.

این شرایط ذیل هر شکل آورده شده است. چنانکه انتظار می رفت، وقتی

شعاع ۶۷ میلی متر به صورت معادلات (۵۳) به عنوان ورودی در نظر گرفته می شود.

$$\begin{cases} x = 0.155 - 0.067 \sin(2\pi ft + \phi) \\ y = 0.04 + 0.067 \cos(2\pi ft + \phi) \end{cases} \quad (53)$$

اعداد برحسب متر و t بیانگر زمان برحسب ثانیه است. فرکانس حرکت دست ربات روی مسیر دایره برحسب دور بر ثانیه می باشد. اختلاف فاز ϕ بر



شکل ۱۱. مقایسه مسیر دست ربات با مسیر داده شده به ازای مقادیر مختلف برای f, φ

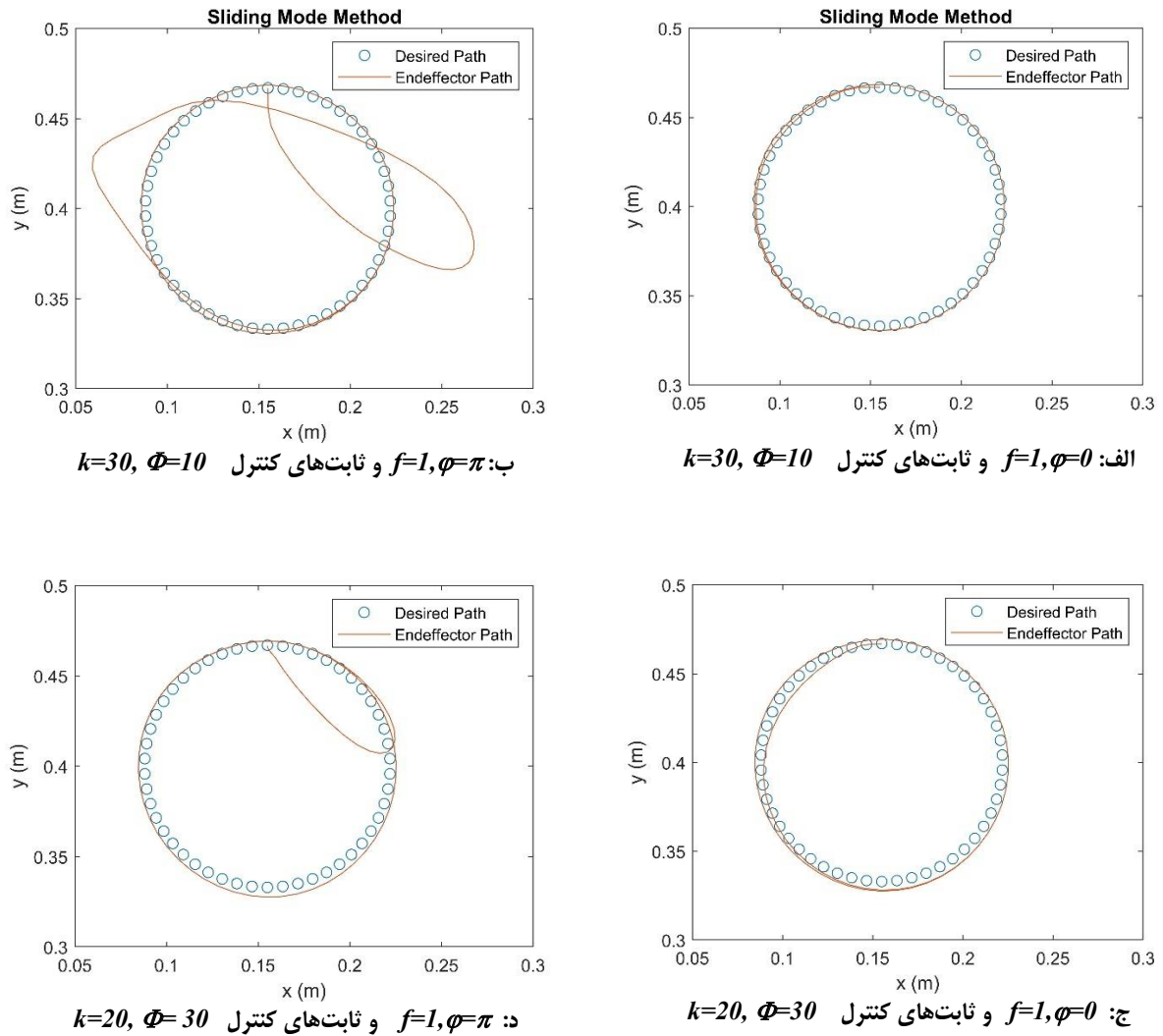
Fig. 11. Comparison of the end effector path and the desired path with different values for f, φ .

و شرایط اولیه هم بر مسیر منطبق نیست خطای ایجاد شده قابل صرفنظر نمی‌باشد (شکل ۱۱-د).

۴-۲- نتایج شبیه سازی روش مد لغزش

برای پیاده سازی روش کنترل مد لغزش از نمودار کنترلی شکل ۷ استفاده می‌شود. تنها تفاوت آن جابجاری معادلات (۵۰) و (۵۱) بجای معادلات (۴۴) و (۴۵) می‌باشد. جهت بررسی عملکرد این روش کنترلی همان ورودی معادله (۵۳) به سیستم داده شده و خروجی آن بررسی می‌شود.

پارامترهای سیستم مشخص است و شرایط اولیه ربات منطبق بر مسیر است؛ کنترل کننده به خوبی عمل کرده و مسیر با دقت قابل قبولی طی می‌شود (شکل ۱۱-الف). همانطور که در قسمت ب از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود؛ وقتی سرعت حرکت ربات افزایش می‌یابد ربات نمی‌تواند بدون خطا مسیر داده شده را طی کند و از آن کمی فاصله می‌گیرد. شکل ۱۱-ج حالتی را نشان می‌دهد که سرعت ربات پایین است ولی موقعیت اولیه ربات با ابتدای مسیر داده شده، فاصله دارد. در این حالت ربات پس از مدتی به مسیر داده شده می‌رسد و آن را دنبال می‌کند. در حالتی که سرعت ربات بالاتر می‌رود



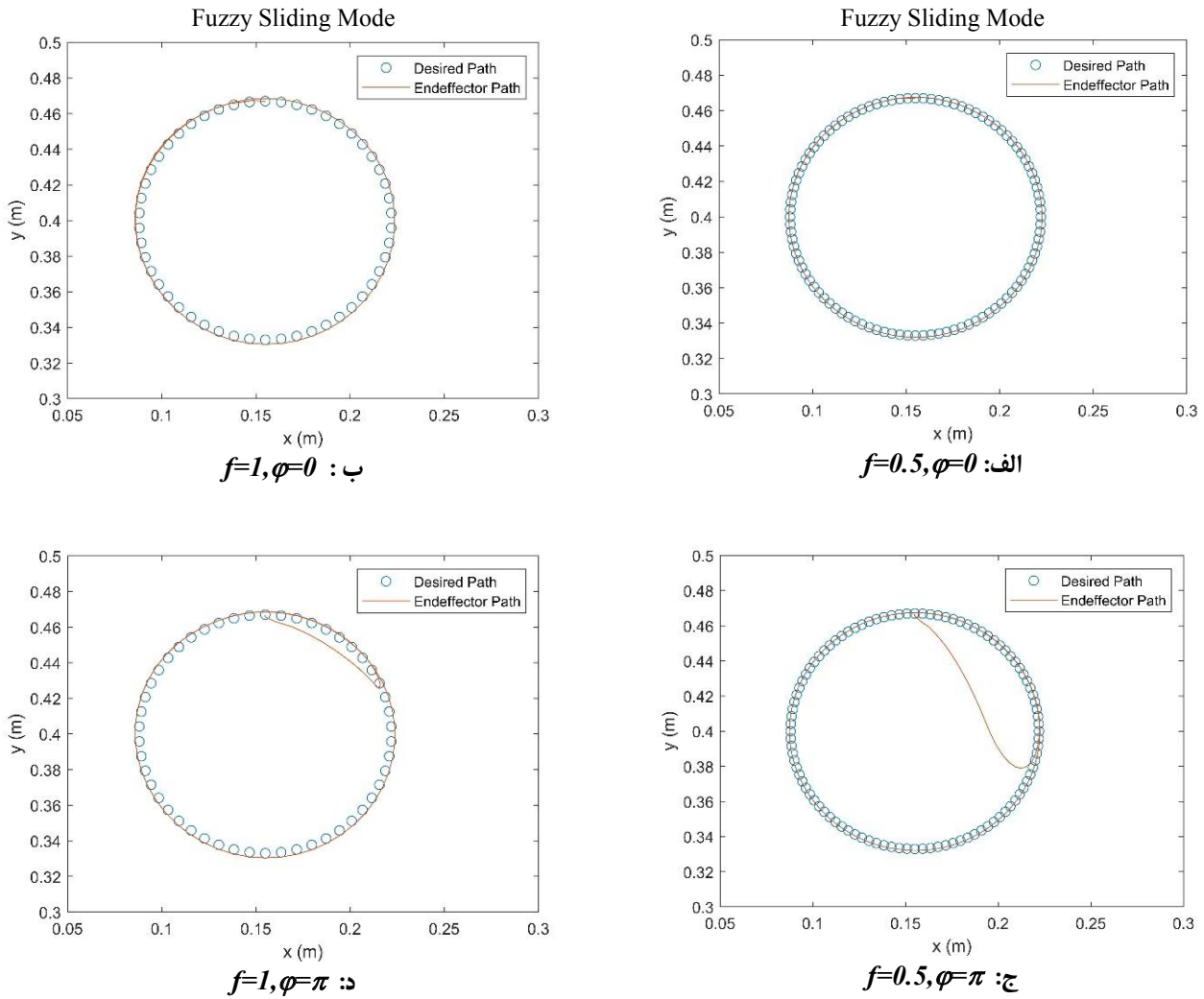
شکل ۱۲. مقایسه مسیر دست ربات با مسیر داده شده به ازای مقادیر مختلف برای k ، φ و Φ

Fig. 12. Comparison of the end effector path and the desired path with different values for f , φ , k and Φ .

کنترل است. از آنجا که سیستم غیرخطی است؛ نوع ورودی بر عملکرد سیستم بسیار موثر است. در بخش های الف و ب در شکل ۱۲، خروجی سیستم کنترل با ثابت های یکسان به ورودی های مختلف نشان داده شده است. ملاحظه می شود وقتی که عملگر نهایی ربات در لحظه شروع حرکت روی مسیر نیست؛ عملکرد سیستم بسیار نامناسب است. وقتی ثابت های کنترل تغییر می کنند عملکرد سیستم به ورودی شکل ۱۲-ب بسیار بهبود یافته و به شکل ۱۲-د، در می آید؛ ولی دیده می شود که رفتار سیستم به ورودی شکل ۱۲-الف کیفیت خود را به شکل ۱۲-ج از دست می دهد. لذا

چنانکه گفته شد در این سیستم باید سه ثابت کنترل تنظیم شود. عملکرد کنترل کننده مد لغزشی را می توان در شکل ۱۲ مشاهده کرد.

چنانکه در شکل های فوق مشاهده می شود؛ در زمانی که شرایط اولیه بر مسیر منطبق است و تمامی پارامترها مشخص هستند روش سطح لغزش مزیت زیادی بر روش گشتاور محاسبه شده، ندارد ولی با مقایسه نمودارهای الف و د از شکل ۱۲، مشاهده می شود که وقتی عملگر نهایی ربات از مسیر فاصله دارد روش سطح لغزش در رساندن دست ربات به مسیر بسیار خوب عمل می کند. تنها اشکال این روش که بسیار مهم است؛ تعیین ثابت های



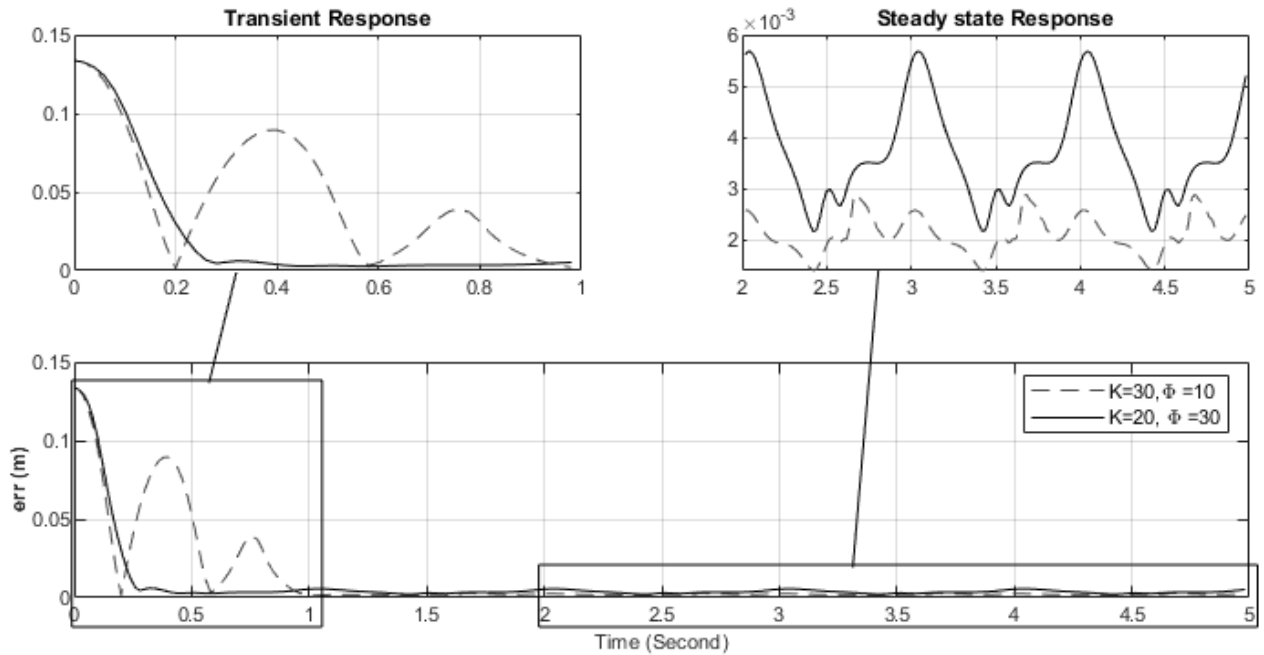
شکل ۱۳. مقایسه مسیر دست ربات با مسیر داده شده به ازای مقادیر مختلف f و φ

Fig. 13. Comparison of the end effector path and the desired path with different values for f and φ .

به آن اعمال می‌شود. نمودارهای شکل ۱۳، پاسخ سیستم و توانایی سیستم کنترل را به ورودی با شرایط مختلف نشان می‌دهد. در این روش به تعیین دستی پارامترهای کنترل نیازی نیست و سیستم به طور خودکار با توجه به مقدار دوری متغیرهای حالت از سطح لغزش و سرعت تغییر آنها، گشتاور مربوط به بخش رساندن متغیرهای حالت به سطح لغزش^۱ را تنظیم می‌کند. نتایج حاصل، نشانگر بهبود عملکرد سیستم کنترل در شرایط متفاوت می‌باشد.

برای هر ورودی خاص باید ثابت‌های کنترل مجدداً تنظیم شوند که این امر برای یک سیستم واقعی به صورت دستی قابل انجام نیست. در بخش بعدی روشی ارائه می‌شود که سیگنال کنترل به صورت همزمان با کار سیستم، به شکل مناسبی تغییر کند و وابسته به ثابت‌های کنترل نباشد.

۳-۴ نتایج شبیه سازی روش مد لغزش تنظیم شونده با روش فازی برای بررسی عملکرد سیستم طراحی شده، مجدداً ورودی معادله (۵۳)



شکل ۱۴. مقایسه روش مد لغزش با دو تنظیم مختلف

Fig. 14. Comparison of the sliding mode method with two different tunes.

در حالت ماندگار^۱ خطای کمتری دارد ولی پاسخ سیستم در حالت گذرا^۲ اصلاً مناسب نیست. حال اگر پارامترها به صورت $k = 20$ و $\Phi = 30$ تنظیم شوند، رفتار سیستم در حالت گذرا بسیار بهبود می‌یابد ولی در ناحیه ماندگار خطای سیستم افزایش پیدا می‌کند. به همین دلیل است که لزوم تغییر پارامترهای سیستم به هنگام کار سیستم، ضرورت پیدا می‌کند.

برای مقایسه سه روش گشتاور محاسبه شده، مد لغزش و مد لغزش فازی وروردی‌های مختلف به سیستم داده شده است. این ورودی‌ها مطابق معادله (۵۳) است و با تغییر f سرعت حرکت روی مسیر و با تغییر ϕ شرط اولیه قرارگیری عملگر نهایی روی مسیر تغییر داده می‌شود. چنانکه از نمودار شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ مشاهده می‌شود؛ عملکرد روش مد لغزش فازی در شرایط مختلف بسیار بهتر از دو روش دیگر است.

شکل ۱۵ و شکل ۱۶ حالتی را نشان می‌دهد که عملگر نهایی روی مسیر و در حالت سکون قرار دارد و تفاوت آنها سرعت حرکت روی مسیر است که با مقدار f تعیین شده است. شکل ۱۷ وضعیتی را نشان می‌دهد که موقعیت

۴-۴- مقایسه روش‌ها

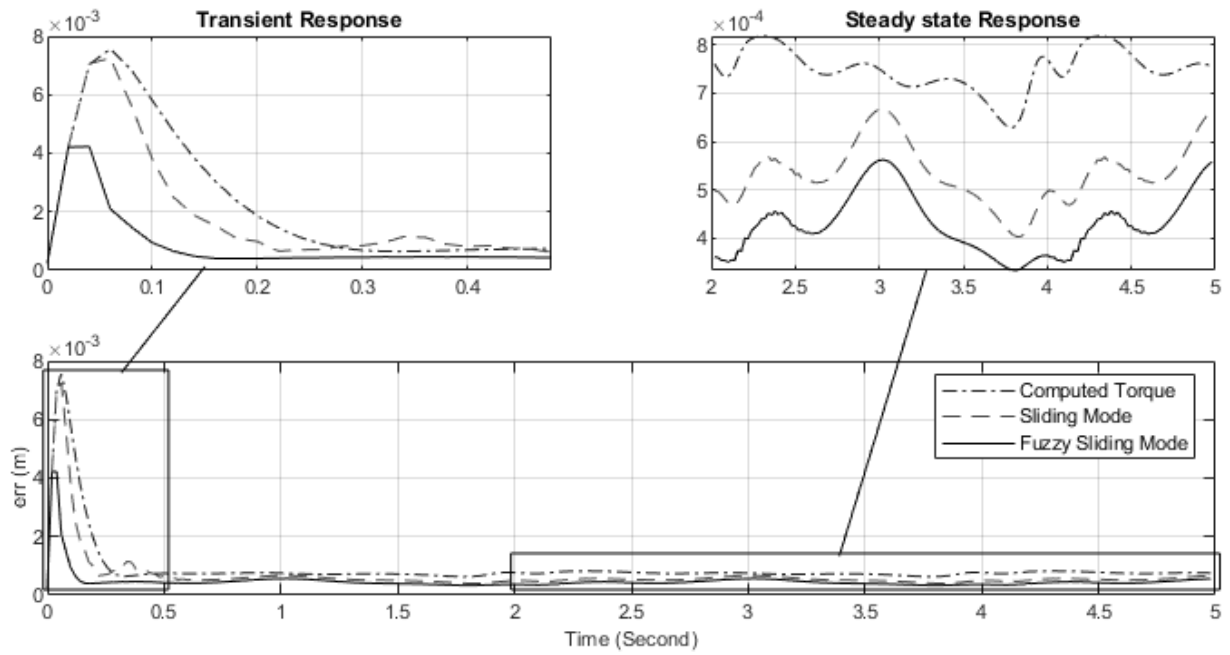
برای مقایسه دقیق روش‌های معرفی شده، معیار خطای مسیر به کار برده می‌شود؛ به این شکل که در هر لحظه، فاصله دست ربات تا موقعیت مطلوب، اندازه‌گیری شده و در نموداری برحسب زمان رسم می‌شود. مقدار این خطا از معادله (۵۴) محاسبه می‌شود.

$$err = \sqrt{(x - x_d)^2 + (y - y_d)^2} \quad (54)$$

(x, y) موقعیت فعلی عملگر نهایی و (x_d, y_d) موقعیت نقطه مطلوب روی مسیر داده شده، می‌باشد. err هم خطای موقعیت یا فاصله موقعیت فعلی دست ربات تا مسیر مطلوب است.

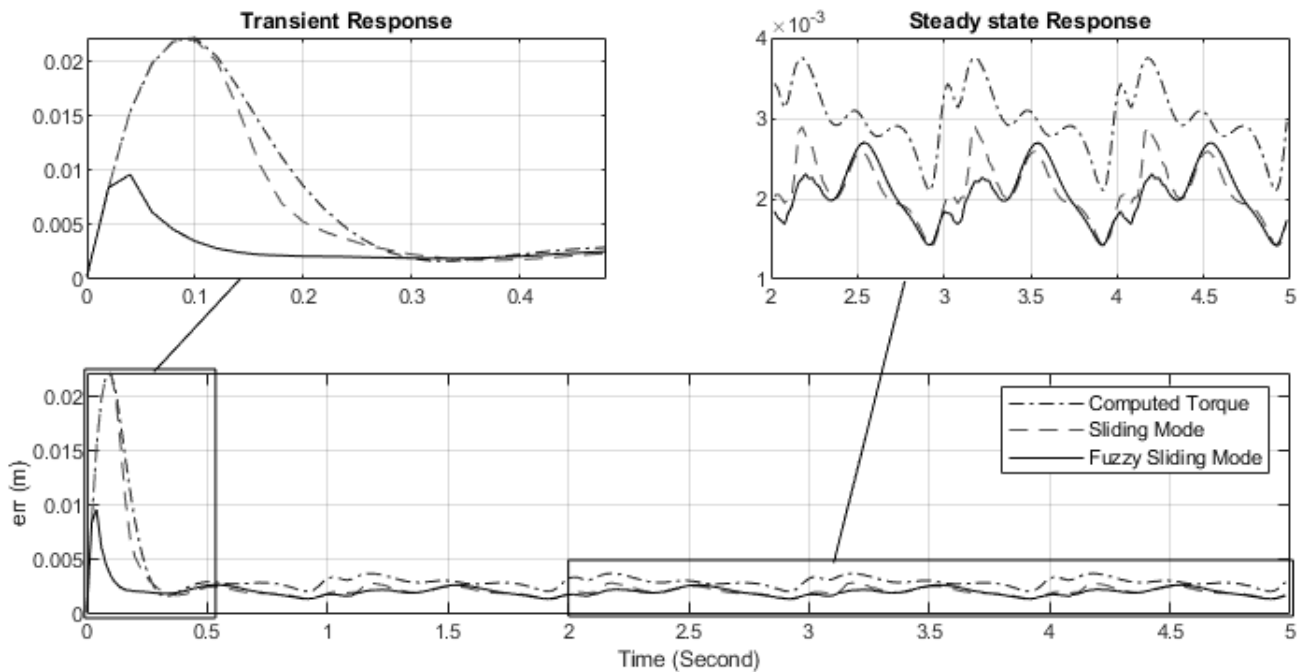
در شکل ۱۴ خطای کنترل کننده مد لغزش با دو تنظیم مختلف و ورودی معادله (۵۳) به ازای $f = 1$ و $\phi = \pi$ رسم شده است. چنانکه مشاهده می‌شود؛ وقتی پارامترهای کنترل با اعداد $k = 30$ و $\Phi = 10$ تنظیم شده‌است، پاسخ

- 1 Steady State
- 2 Transient



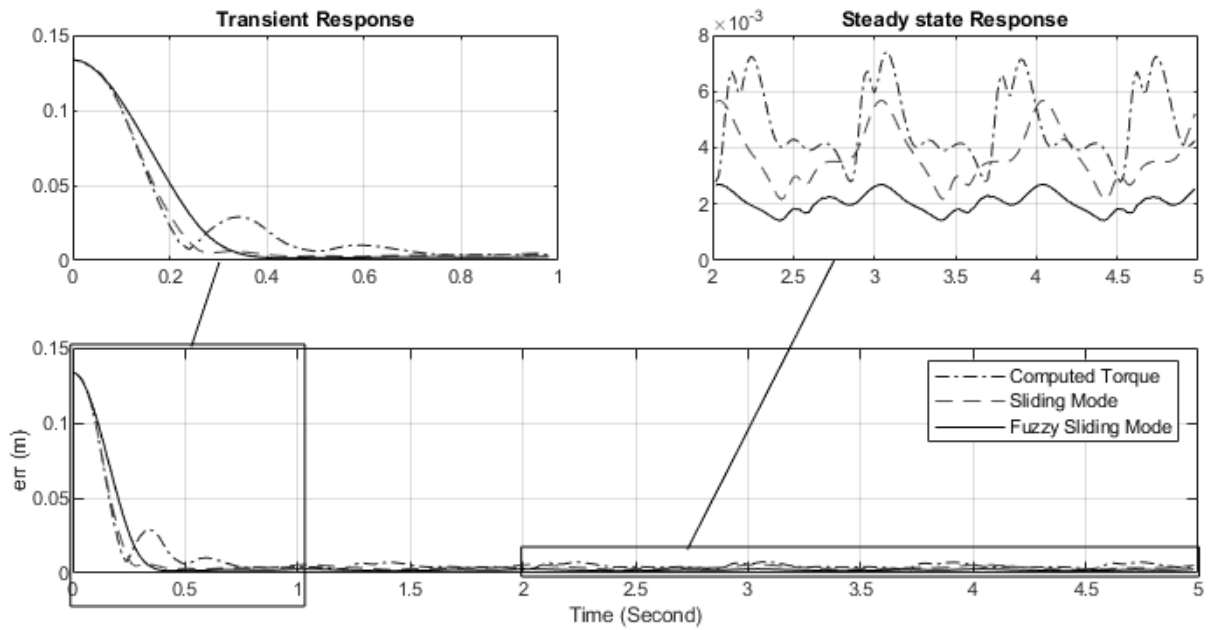
شکل ۱۵. مقایسه سه روش گشتاور محاسبه شده، مدل‌گزشت و مدل‌گزشت تنظیم شونده به ازای $f=0.5$, $\varphi=0$

Fig. 15. Comparison of computed torque, sliding mode and fuzzy sliding mode methods for $f=0.5$, $\varphi=0$



شکل ۱۶. مقایسه سه روش گشتاور محاسبه شده، مدل‌گزشت و مدل‌گزشت تنظیم شونده به ازای $f=1$, $\varphi=0$

Fig. 16. Comparison of computed torque, sliding mode and fuzzy sliding mode methods for $f=1$, $\varphi=0$



شکل ۱۷. مقایسه سه روش گشتاور محاسبه شده، مدلغزش و مدلغزش تنظیم شونده به ازای $f=1$, $\varphi = \pi$

Fig. 17. Comparison of computed torque, sliding mode and fuzzy sliding mode methods for $f=1$, $\varphi = \pi$

روش‌های مورد بحث، بر روی یک ربات موازی صفحه‌ای پیاده سازی شده است. ساختمان ربات در شکل ۱۸-الف مشاهده می‌شود. بازوهای ربات از آلایژ آلومینیم ۱۰۶۰ ساخته شده است. ابعاد، جرم و سایر مشخصات ربات در جدول ۱ ذکر شده است. محرک‌های ربات دو سروموتوری است که با درایورهای دلتا راه اندازی می‌شوند. جهت اتصال سروموتورها با رایانه، رابط الکترونیکی ساخته شده که از طریق درگاه سریال جامع وظیفه تبادل اطلاعات بین درایورها و رایانه را برعهده دارد. درایورها و رابط الکترونیکی در شکل ۱۸-ب نشان داده شده است.

در این بخش از مقاله، نتایج پیاده سازی سه روش گشتاور محاسبه شده، مدلغزش و مدلغزش فازی بر روی ربات مورد بررسی قرار گرفته است. برتری روش مدلغزش فازی به دلیل غلبه بر اصطکاک خشک، نامعینی‌های مکانیکی و الکترونیکی سیستم در نتایج عملی به وضوح دیده می‌شود.

گشتاور محاسبه شده: چنانچه انتظار می‌رفت؛ روش گشتاور محاسبه شده، در صورت وجود نامعینی‌ها و شرایط اولیه مختلف نسبت به دو روش دیگر کارایی ضعیف‌تری دارد. شکل ۱۹ خروجی ربات موازی صفحه‌ای

اولیه دست ربات با مسیر داده شده، فاصله دارد. بنابر این خطای محاسبه شده در شروع حرکت صفر نیست و ربات باید این خطا را جبران کرده و عملگر نهایی را به مسیر برساند. چنانکه ملاحظه می‌شود، این خطا به شکل مناسب و در زمان کوتاهی با روش مدلغزش فازی انجام می‌شود.

خلاصه بحث انجام شده در خصوص مقایسه روش‌های مذکور در جدول (۳) آورده شده است. برای مقایسه، از دو کمیت بیشترین فاصله دست ربات تا مسیر مورد نظر و میانگین خطا در مدت زمان حرکت ربات استفاده شده است. هر دو کمیت به صورت اعدادی مثبت محاسبه شده‌اند. با نظر به جدول (۳) مشاهده می‌شود که روش مدلغزش از روش گشتاور محاسبه شده، بهتر عمل می‌کند ولی عملکرد مدلغزش وابسته به ثابت‌های کنترل است. در جدول، دو نوع تنظیم برای مدلغزش آورده شده است که اولی به ازای دو ورودی اول خوب عمل می‌کند در صورتی که تنظیم دوم برای ورودی سوم بهتر است. مدلغزش فازی که ضرایب کنترل آن به صورت خودکار تنظیم می‌شود؛ در تمامی شرایط رفتار مناسب و بهتری دارد.

۵- بررسی روش‌های کنترل بر روی مدل آزمایشگاهی

جهت بررسی نتایج مقاله و کارایی عملی الگوریتم‌های بیان شده،

جدول ۳. مقایسه روش‌های مختلف کنترل به ازای ورودی‌های مختلف

Table 3. Comparison of different control methods for different inputs

$f=1\%, \varphi=\pi$		$f=1\%, \varphi=0$		$f=0.5\%, \varphi=0$		مشخصات ورودی	روش کنترل
بیشترین خطا ^۱	متوسط خطا	بیشترین خطا	متوسط خطا	بیشترین خطا	متوسط خطا	معیار مقایسه	
۱۳۳/۷	۹/۴	۲۲/۲	۳/۵	۷/۶	۰/۹	گشتاور محاسبه شده	
۱۳۳/۷	۱۱/۱	۲۲/۰	۲/۶	۷/۳	۰/۷	مد لغزش ($\Phi=10, k=30$)	
۱۳۳/۷	۷/۸	۲۲/۳	۴/۲	۷/۶	۱/۱	مد لغزش ($\Phi=30, k=20$)	
۱۳۳/۷	۶/۹	۹/۶	۲/۱	۴/۲	۰/۵	مد لغزش فازی	
معادله (۵۴)							خطا

^۱ چون در شروع حرکت، عملگر نهایی ربات خارج از مسیر است و فاصله زیادی تا مسیر دارد پس بیشترین خطا، به هنگام شروع حرکت محاسبه می‌شود؛ بنابراین ستون آخر جدول با روش‌های مختلف کنترل، تغییری نمی‌کند.



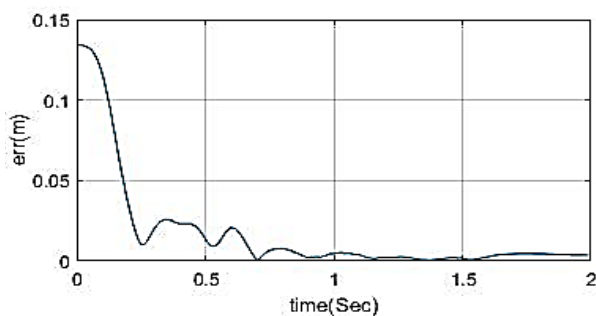
(ب)
(b)



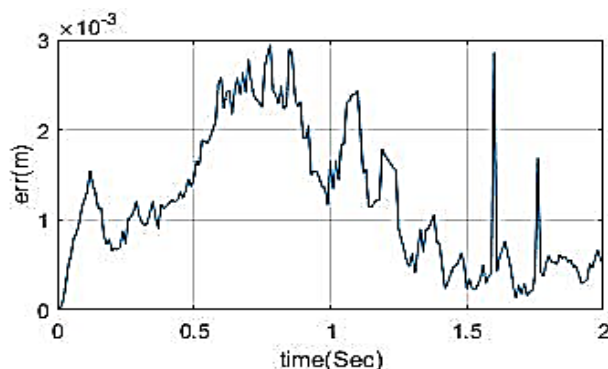
(الف)
(a)

شکل ۱۸. ربات پنج میله‌ای موازی که نتایج مقاله روی آن مورد بررسی قرار گرفته است. الف) ساختار مکانیکی ربات، ب) تجهیزات برقی جهت راه‌اندازی ربات و اتصال آن به رایانه

Fig. 18. The five-bar parallel robot on which the results of the article have been analyzed. a) Mechanical structure of the robot, b) Electrical equipments of the robot



(ب)
(b)



(الف)
(a)

شکل ۱۹. انحراف از مسیر دست ربات در به کارگیری روش کنترل گشتاور محاسبه شده، الف) دست ربات در شروع حرکت منطبق بر مسیر است. ب) در شروع حرکت، دست ربات ۱۳ سانتی متر از مسیر فاصله دارد.

Fig. 19. Deviation from the desired path of the end effector using the computed torque method. a) The initial position of the end effector corresponds to the path. b) The initial position of the robot hand is 13 cm away from the desired path.

روش مدلغزش فازی: با اعمال روش بیان شده در این مقاله در کنترل ربات، پارامترهای کنترل به هنگام حرکت ربات به صورت خودکار با قواعد فازی داده شده، طوری تنظیم می‌شوند که پاسخ سیستم پاسخ مطلوبی باشد. بنابراین تنظیم دستی بهره‌های کنترل لزومی ندارد. شکل ۲۱ پاسخ بسیار مناسب سیستم به ورودی‌ها و شرایط اولیه مختلف را نشان می‌دهد که با تنظیم خودکار بهره‌های سیستم کنترل به دست آمده‌اند.

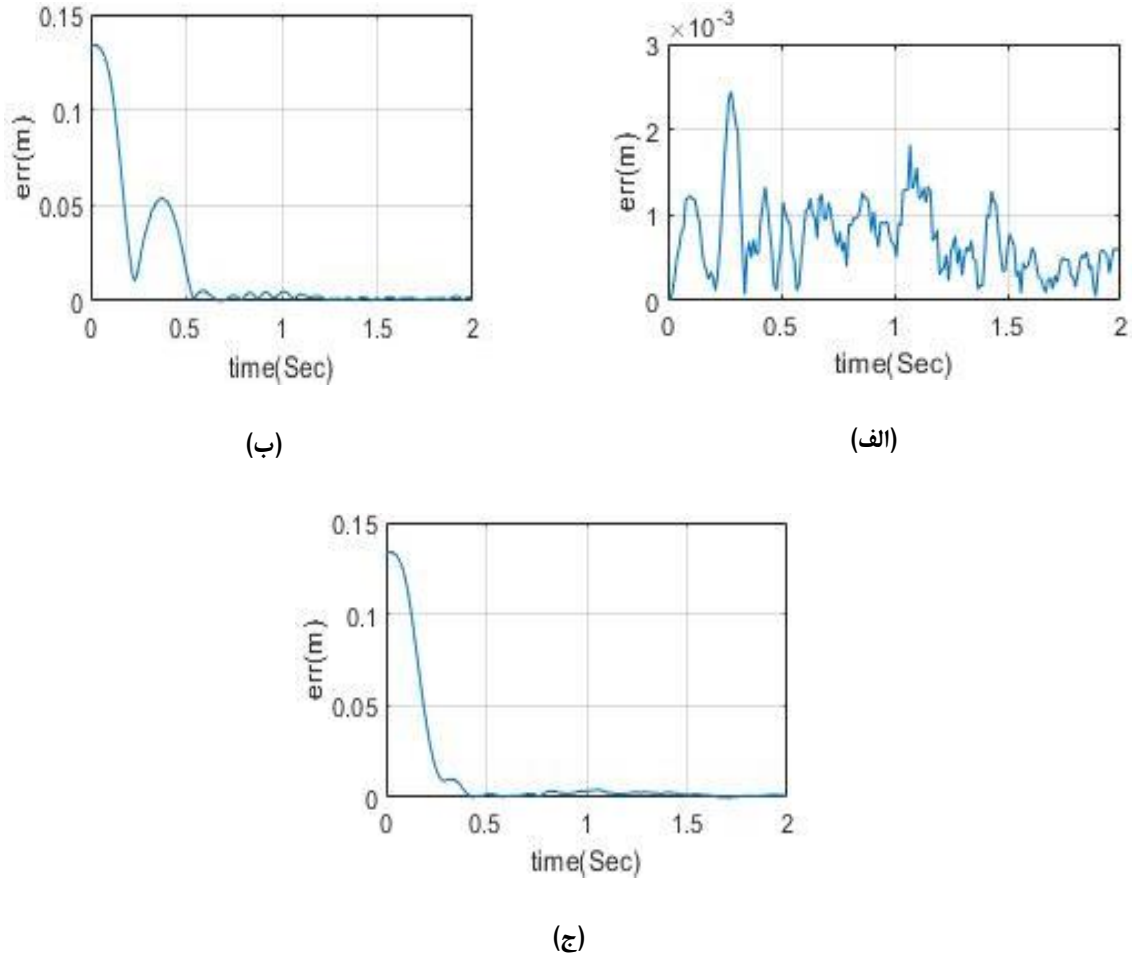
۶- نتیجه گیری

در کارهای عملی رفتار سیستم‌های کنترل با مطالب بیان شده در منابع تئوری کمی متفاوت هستند. پروژه‌های کاربردی و عملی به شدت متأثر از پدیده‌هایی مانند اصطکاک، اشباع محرک‌ها، سرعت داده‌برداری و ارسال فرامین کنترل هستند؛ طوریکه روش‌های کنترل ارائه شده بعضاً بدون اصلاح، کارایی خود را از دست می‌دهند. از طرفی به دلیل غیر خطی بودن معادلات حاکم بر ربات‌های موازی، عملکرد کنترلرهای به کار رفته در آنها به شدت تحت تاثیر شکل ورودی قرار می‌گیرند.

در بررسی‌های انجام گرفته در این پروژه ملاحظه گردید که در حالت عدم وجود نامعینی و نیز قرار گرفتن شرایط اولیه ربات روی مسیر، روش

در شرایط مختلف است. شکل ۱۹-الف بیانگر وضعیتی است که در آن به هنگام شروع حرکت، دست ربات روی مسیر تعیین شده قرار دارد و سرعت آن نیز صفر است یعنی حالت اولیه سیستم منطبق بر حالت مطلوب می‌باشد. رفتار ربات قابل قبول و خوب است ولی مطابق شکل ۱۹-ب وقتی که دست ربات حدود ۱۳ سانتی‌متر دورتر از مسیر مطلوب قرار می‌گیرد، ربات نمی‌تواند خطای مسیر را تا یک ثانیه جبران کند و این پاسخ قابل قبولی نیست.

روش مدلغزش: این روش، برای کنترل مسیر ربات بسیار مناسب است. چنان‌که در شکل ۲۰-الف نشان داده شده است، می‌توان پارامترهای سیستم کنترل را به نحوی تنظیم کرد که برای شرایط خاص، ربات رفتار بسیار مناسبی داشته باشد. همانطور که مشاهده می‌شود خطای تعقیب کمتر از حالت گشتاور محاسبه شده، می‌باشد ولی مشکل بیان شده در بخش ۴ در اینجا به خوبی دیده می‌شود یعنی اگر شرایط اولیه ربات یا ورودی مسیر عوض شود، ممکن است پاسخ سیستم، مناسب نباشد. این موضوع در شکل ۲۰-ب دیده می‌شود. خطای تعقیب در این وضعیت حتی از روش گشتاور محاسبه شده نیز بیشتر شده‌است. البته با تنظیم مجدد بهره‌ها پاسخ به شکل بسیار مناسبی تغییر کرده و به شکل ۲۰-ج در می‌آید ولی نیاز به تنظیم بهره‌ها به ازای شرایط مختلف از معایب این روش است.

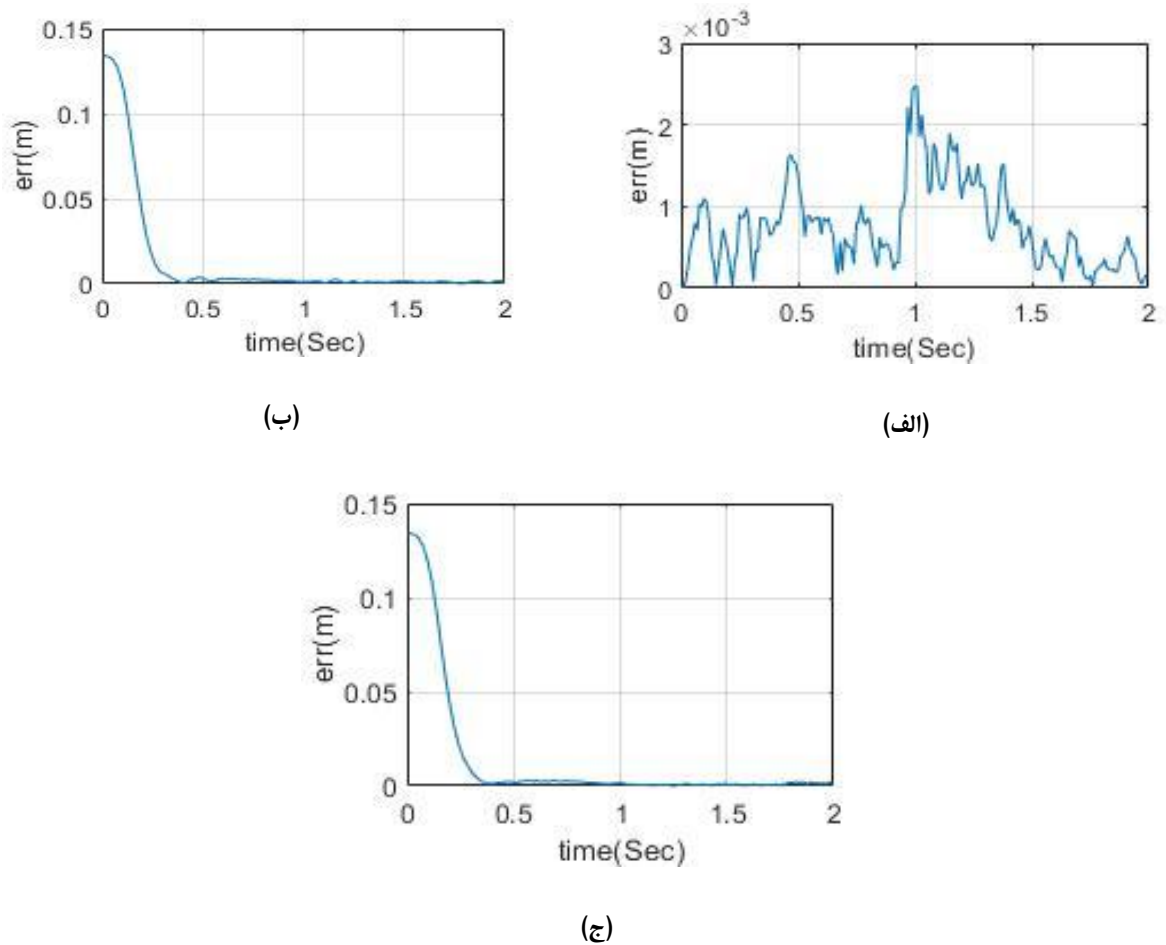


شکل ۲۰. انحراف از مسیر دست ربات در روش کنترل مد لغزش. الف) شرایط اولیه روی سطح لغزش قرار دارد؛ ب) در لحظه شروع، دست از مسیر فاصله دارد و بهره‌های سیستم کنترل مقادیر الف هستند و ج) شرایط اولیه منطبق با حالت ب است و با تنظیم مجدد بهره‌های سیستم کنترل، پاسخ سیستم بهبود می‌یابد.

Fig. 20. Deviation from the path of the end effector in the sliding mode method; a) The initial conditions are on the sliding surface; b) At the moment of the start, the hand is far from the path and the gains of the control system are the same as the values of (a) and c) The initial condition corresponds to state b, and by resetting the gains of the control system, the response of the system is improved.

ازای یک سری از ثابت‌های کنترل، سیستم به ورودی خاص در شرایط اولیه مشخصی به درستی پاسخ دهد ولی با تغییر شرایط اولیه و یا نوع ورودی لازم باشد که ثابت‌ها باز طراحی شوند. بنابراین در این مقاله روشی ارائه شد که تنظیمات کنترل کننده به صورت خودکار با استفاده از قواعد فازی به شکل مناسبی انجام شود طوری که شرایط اولیه و نیز ورودی‌های مختلف عملکرد کنترل کننده را مختل ننماید.

کنترل گشتاور محاسبه شده روشی مناسب برای کنترل ربات است. ولی اگر شرایط اولیه روی مسیر نباشد یا عملگرنهایی ربات بنا به دلایلی از مسیر خارج شود؛ روش گشتاور محاسبه شده روش قابل قبولی نیست. لذا باید از روش‌های دیگری مانند سطح لغزش استفاده کرد ولی ثابت‌های این کنترلر را نمی‌توان طوری تنظیم کرد که به ازای تمامی شرایط اولیه و تمامی ورودی‌ها به خوبی کار کند. چنانکه توضیح داده شد ممکن است به



شکل ۲۱. انحراف از مسیر دست ربات در به کارگیری روش مدل‌گزینش فازی؛ الف) موقعیت و سرعت اولیه دست ربات منطبق با مقادیر مطلوب است؛ ب) دست ربات ۱۳ سانتی متر از مسیر فاصله دارد ولی سرعت دست و سرعت مطلوب یکسان و صفر است؛ ج) دست ربات از مسیر فاصله دارد و سرعت شروع طی مسیر هم غیر صفر داده شده است و با شرایط اولیه ربات متفاوت است.

Fig. 21. Deviation from the path of the robot in applying the fuzzy sliding model method; a) The initial position and speed of the robot's hand are in accordance with the desired values; b) The robot's hand is 13 cm away from the path, but the speed of the hand and the desired speed are the same and zero; c) The initial position and speed of the path are different from the initial conditions of the robot.

parallel manipulators, IEEE Transactions on Robotics, 22(1) (2006) 202-207.

[3] H. Cheng, Y.-K. Yiu, Z. Li, Dynamics and control of redundantly actuated parallel manipulators, IEEE/ASME Transactions on mechatronics, 8(4) (2003) 483-491.

[4] A. Shintemirov, A. Niyetkaliyev, M. Rubagotti, Numerical optimal control of a spherical parallel manipulator based

منابع

[1] D. Kim, W. Chung, Analytic singularity equation and analysis of six-DOF parallel manipulators using local structurization method, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 15(4) (1999) 612-622.

[2] Y. Su, D. Sun, L. Ren, J.K. Mills, Integration of saturated PI synchronous control and PD feedback for control of

- mode control of 6 DOF parallel manipulator with electromechanical actuators in cartesian space coordinates, *Communications on Advanced Computational Science with Applications*, 2015(1) (2015) 1-21.
- [16] Y. Aoun, A. Medjghou, B. Maaoui, N. Slimane, Improved Sliding Mode Controller Using Backstepping and Fuzzy Logic for a Quadrotor Aircraft, in: *International Symposium on Mechatronics and Renewable Energies* El-Oued, University of Eloued, Algeria, 2018.
- [17] A. Razzaghian, R.K. Moghaddam, Fuzzy sliding mode control of 5 DOF upper-limb exoskeleton robot, in: *2015 international congress on technology, communication and knowledge (ICTCK)*, IEEE, 2015, pp. 25-32.
- [18] M.S. Qureshi, P. Swarnkar, S. Gupta, A supervisory on-line tuned fuzzy logic based sliding mode control for robotics: An application to surgical robots, *Robotics and Autonomous Systems*, 109 (2018) 68-85.
- [19] Q. Liu, D. Liu, W. Meng, Z. Zhou, Q. Ai, Fuzzy sliding mode control of a multi-DOF parallel robot in rehabilitation environment, *International Journal of Humanoid Robotics*, 11(01) (2014) 1450004.
- [20] Q.H. Ngo, N.P. Nguyen, C.N. Nguyen, T.H. Tran, Q.P. Ha, Fuzzy sliding mode control of an offshore container crane, *Ocean Engineering*, 140 (2017) 125-134.
- [21] M.R. Soltanpour, M.H. Khooban, A particle swarm optimization approach for fuzzy sliding mode control for tracking the robot manipulator, *Nonlinear Dynamics*, 74(1) (2013) 467-478.
- [22] B. Taran, A. Pirmohammadi, Designing an optimal fuzzy sliding mode control for a two-link robot, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(1) (2020) 1-12.
- [23] Z. Xie, T. Sun, T. Kwan, X. Wu, Motion control of a space manipulator using fuzzy sliding mode control with reinforcement learning, *Acta Astronautica*, 176 (2020) 156-172.
- [24] X. Wu, P. Jin, T. Zou, Z. Qi, H. Xiao, P. Lou, Backstepping trajectory tracking based on fuzzy sliding mode control for differential mobile robots, *Journal of Intelligent & on unique kinematic solutions*, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(1) (2015) 98-109.
- [5] H. Liu, T. Zhang, Fuzzy sliding mode control of robotic manipulators with kinematic and dynamic uncertainties, *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 134(6) (2012) 061007.
- [6] J. Xu, Q. Wang, Q. Lin, Parallel robot with fuzzy neural network sliding mode control, *Advances in Mechanical Engineering*, 10(10) (2018) 1687814018801261.
- [7] X. Yin, L. Pan, S. Cai, Robust adaptive fuzzy sliding mode trajectory tracking control for serial robotic manipulators, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 72 (2021) 101884.
- [8] N. Yagiz, Y. Hacioglu, Robust control of a spatial robot using fuzzy sliding modes, *Mathematical and Computer Modelling*, 49(1-2) (2009) 114-127.
- [9] G. Wu, X. Zhang, L. Zhu, Z. Lin, J. Liu, Fuzzy sliding mode variable structure control of a high-speed parallel PnP robot, *Mechanism and Machine Theory*, 162 (2021) 104349.
- [10] B. Maalej, H. Medhaffar, A. Chemori, N. Derbel, A Fuzzy Sliding Mode Controller for Reducing Torques Applied to a Rehabilitation Robot, in: *2020 17th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, IEEE, 2020, pp. 740-746.
- [11] K. Zheng, Y. Hu, B. Wu, Intelligent fuzzy sliding mode control for complex robot system with disturbances, *European Journal of Control*, 51 (2020) 95-109.
- [12] J. Wang, A.B. Rad, P. Chan, Indirect adaptive fuzzy sliding mode control: Part I: fuzzy switching, *Fuzzy sets and Systems*, 122(1) (2001) 21-30.
- [13] P. Chan, A.B. Rad, J. Wang, Indirect adaptive fuzzy sliding mode control: Part II: Parameter projection and supervisory control, *Fuzzy Sets and Systems*, 122(1) (2001) 31-43.
- [14] H. Navvabi, A.H.D. Markazi, Position control of Stewart manipulator using a new extended adaptive fuzzy sliding mode controller and observer (E-AFSMCO), *Journal of the Franklin Institute*, 355(5) (2018) 2583-2609.
- [15] A. Filabi, M. Yaghoobi, Fuzzy adaptive sliding

- 105-107 (2012) 2213-2216.
- [29] Y.L. Haoyu Shen, Hongtao Wu, Chunlong Hu and Shuai Wang, Forward and Inverse Kinematics for a Novel Double Scara Robot, in: 2nd International Symposium on Resource Exploration and Environmental Science, IOP Conf. Ser., Canada, 2018.
- [30] J.J. Slotine, W. Li, Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall International, Inc, 1991.
- [31] M. Roopaei, M.Z. Jahromi, Chattering-free fuzzy sliding mode control in MIMO uncertain systems, Nonlinear Analysis, 71 (2009) 8.
- [32] F. Yorgancıoğlu, H. Kömürçügil, Single-input fuzzy-like moving sliding surface approach to the sliding mode control, Electr Eng, 90 (2008) 9.
- Robotic Systems, 96(1) (2019) 109-121.
- [25] M. Vijay, D. Jena, PSO based neuro fuzzy sliding mode control for a robot manipulator, Journal of Electrical Systems and Information Technology, 4(1) (2017) 243-256.
- [26] C.S. Chin, W.P. Lin, Robust genetic algorithm and fuzzy inference mechanism embedded in a sliding-mode controller for an uncertain underwater robot, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 23(2) (2018) 655-666.
- [27] S.y. Chen, T. Zhang, Y.b. Zou, Fuzzy-sliding mode force control research on robotic machining, Journal of Robotics, 2017 (2017) 8.
- [28] S.B. Hu, M.X. Lu, Backstepping Fuzzy sliding mode control for a three-links spatial robot based on variable rate reaching law, Applied Mechanics and Materials,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Taran, M Barghandan, A. A. Pirmohamadi, S. Mobayen, A Practical Method for Controlling the Parallel Robot Path Based on the Sliding Mode Method with Fuzzy Adjustable Coefficients, Amirkabir J. Mech Eng., 55(2) (2023) 257-282.

DOI: 10.22060/mej.2023.21694.7491



