

## کنترل غیرخطی ربات puma توسط روش مد لغزشی فرایچشی به همراه رویکر اغتشاش با قابلیت تحمل پذیری عیب به منظور کاربرد در جراحی

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، ایران، shadi.shahmari2020@gmail.com  
استادیار، گروه مهندسی مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، allahverdizadeh@tabrizu.ac.ir  
استادیار، گروه مهندسی مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، b.dadashzadeh@tabrizu.ac.ir

شادی شاه ماری خیابانی

اکبر اللهوردی زاده\*

بهنام داداش زاده

### چکیده

در کنترل ربات‌های جراحی دقت ردیابی بسیار بالا، سیگنال‌های کنترلی بدون لرزش، مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت‌های پارامتری و غیر پارامتری، قابلیت تحمل‌پذیری عیب و عدم نیاز به حسگرهای اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای حاضر اهمیت است. در مقاله حاضر روش کنترلی ارائه شده به دنبال حل هم‌زمان چالش‌های یاد شده است. به منظور افزایش دقت ردیابی و سرعت همگرایی خطا و همچنین کاهش پدیده لرزش از ترکیب روش‌های مد لغزشی مرتبه دوم و مد لغزشی فرایچشی استفاده شده است. همچنین برای تخمین عدم قطعیت‌های سیستم و حالت‌های مربوط به سرعت زاویه‌ای ربات از یک رویکر اغتشاش توسعه یافته با همگرایی زمان محدود مبتنی بر مد لغزشی مرتبه بالا استفاده شده است که موجب می‌شود علاوه بر دقت تخمین سرعت زاویه‌ای مفاصل ربات و عدم قطعیت دینامیک سیستم، دامنه لرزش سیگنال‌های کنترلی نیز به صورت چشمگیر کاهش یابد. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی ارائه می‌شود و به منظور ارزیابی کیفیت عملکرد آن، نتایج با پژوهش‌های معتبر مرتبط قبلی مورد مقایسه قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب و بهتر روش پیشنهادی در حل چالش‌های یاد شده است.

واژه‌های کلیدی: ربات جراحی، رویکر اغتشاش، الگوریتم فرایچشی، کنترل مد لغزشی، لرزش، پایداری زمان محدود.

## Nonlinear control of the PUMA robot using the super-twisting sliding mode method and disturbance observer with fault tolerance capability for application in surgery

Sh. Shahmari Khiyabani  
A. Allahverdizadeh  
B. Dadashzadeh

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### Abstract

In the control of surgical robots, very high tracking accuracy, chattering-free control signals, robustness to parametric and non-parametric uncertainties, fault-tolerant capability, and no need for angular velocity measurement sensors are very important. In this article, the proposed control method seeks to solve the mentioned challenges at the same time. In order to increase the tracking accuracy and error convergence speed, as well as to reduce the chattering phenomenon, a combination of second-order sliding mode and super-twisting sliding mode methods has been used. Also, to estimate the uncertainties of the system and angular velocities of the robot, a finite-time convergent disturbance observer based on the high-order sliding mode has been used, which causes accurately estimating the angular velocities of the robot joints and the uncertainty of the system dynamics, as well as decreasing the chattering domain of control signals to also have a significant reduction. The simulation results of the proposed method are presented, and in order to evaluate its performance, the results are compared with previous valid research, which shows a better performance of the proposed method in solving the mentioned challenges.

**Keywords:** Surgical Robot, Disturbance Observer, Super Twisting, Sliding Mode Control, Chattering, Finite Time Stability.

در این سوراخ‌ها برای انجام جراحی است [۳]. ربات جراحی ایده‌آل باید به‌اندازه کافی هوشمند باشد و به‌جای اینکه صرفاً یک چاقوی جراحی در دست پزشک باشد؛ یک بازوی هوشمند توسعه‌یافته نیز باشد و عملکرد و قابلیت کنترل انعطاف‌پذیری از خود نشان دهد. برای دستیابی به این هدف، سیستم‌های ربات باید درک خاصی از هدف جراحی و اطلاعات لازم در مورد جراحی از جمله محیط جراحی، برنامه‌ریزی و فرآیندهای کلیدی داشته باشند. انتظار می‌رود سیستم‌های موردنظر عملیات پزشک را در حین جراحی شناسایی کنند؛ دقت برش و بخیه را بهبود بخشند و کل جراحی را هدایت و برنامه‌ریزی کنند [۴].

### ۱- مقدمه

توانمندی ربات‌ها در انجام کارهای مختلف و توسعه دانش رباتیک در دهه‌های اخیر موجب تولید طیف وسیعی از ربات‌ها با سطح هوشمندی متفاوت برای استفاده در صنایع مختلف از جمله حوزه مهندسی پزشکی شده است. استفاده از ربات‌ها برای جراحی نسبت به روش‌های جراحی باز از مزایای فراوانی برخوردار است [۱]. از جمله مزایای جراحی به کمک ربات‌ها می‌توان به آسیب کمتر بافت‌های سالم بیمار، افزایش دقت جراحی، کاهش دوره نقاهت بیمار پس از فرایند جراحی و مهم‌تر از همه امکان‌پذیر شدن جراحی از راه دور اشاره کرد [۲]. جراحی به کمک ربات با استفاده از این دستگاه‌ها شامل باز کردن یک یا چند سوراخ در بدن بیمار و قرار دادن بازو یا بازوهای عمل‌کننده

\* نویسنده‌گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: allahverdizadeh@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۲۰/۰۶/۱۳

طراحی و توسعه ربات‌های جراحی با چالش‌های مختلفی روبرو است که از جمله آن‌ها می‌توان طراحی مکانیکی ربات‌ها و عملگرهای نهایی، طراحی و ساخت حسگرهای مختلف برای اندازه‌گیری موقعیت، سرعت و نیروها، طراحی مکانیزم‌های مختلف برای انجام حرکات متنوع توسط ربات، تحلیل سینماتیک و دینامیک ربات برای انجام شبیه‌سازی‌های قبل از ساخت و ارزیابی عملکرد ربات، طراحی و ساخت محرکه‌های کارآمد و درنهایت کنترل ربات‌های جراحی اشاره نمود [۵]. برخی از پژوهش‌های مروری به بررسی مفصل تاریخچه پیدایش این ربات‌ها، روند توسعه، چالش‌های پیش رو و آخرین دستاوردهای به‌دست‌آمده پرداخته‌اند [۶].

در مقالات مختلف به مرور تحقیقات صورت گرفته در خصوص استفاده از ربات‌ها برای جراحی لاپاراسکوپی پرداخته شده است که نحوه عملکرد ربات‌های جراحی را توصیف کرده است [۷]. کینوگاسا و همکاران کاربرد ربات‌های جراحی را در زمینه جراحی‌های کم‌تهاجمی سرطان‌های روده بررسی نموده و مزیت آن‌ها را بیان کرده‌اند که به‌وسیله این ربات‌ها جراحی با دقت بیشتری انجام می‌گیرد [۸].

زمار و همکاران روند توسعه سیستم جراحی رباتیک "داوینچی" را در ۱۰ سال اخیر مورد بررسی قرار داده‌اند و اهمیت این ربات‌ها را در آن زمان اثبات کرده‌اند [۹]. در سال‌های بعد با پیشرفت علم رباتیک، یک کنترل‌کننده هوشمند مبتنی بر روش مد لغزشی با استفاده از منطق فازی برای ربات‌های جراح طراحی شده است که پژوهش یادشده یکی از پژوهش‌های بنیادین در زمینه استفاده از کنترل‌کننده‌های غیرخطی هوشمند در ربات‌های جراحی است. به‌منظور اجتناب از محاسبات پیچیده از مد لغزشی ساده (مرسوم) استفاده شده است [۱۰]. در فرایند طراحی مد لغزشی مرسوم با توجه به حضور تابع علامت (Sign) در معادلات مربوط به ورودی‌های کنترلی، پدیده لرزش یا همان وزوز که شامل نوسان‌های بسیار شدید در سیگنال‌های کنترلی هست ظاهر می‌شود که پژوهش‌های مختلف از رویکردهایی مانند ترکیب روش‌های مد لغزشی و رویکرد اغتشاش برای کنترل یک سیستم رباتیک جراحی از راه دور استفاده نموده‌اند [۱۱]. توجه ویژه به مقاوم بودن سیستم کنترلی در برابر حضور عدم قطعیت‌های دینامیکی و اغتشاشات خارجی سبب شده است تا پژوهشگران به طراحی رویکردهای اغتشاش مختلف به‌منظور تخمین اثر اغتشاشات و حذف اثر آن‌ها بر عملکرد سیستم کنترلی بپردازند [۱۲]. در پژوهش‌های انجام‌شده از روش منطق فازی و ترکیب آن با شبکه‌های عصبی برای تنظیم بهره‌های کنترلی و همچنین تخمین دینامیک نامعلوم سیستم و حذف پدیده لرزش استفاده می‌شود که نشان داده با استفاده از منطق فازی لرزش کاهش می‌یابد ولی باعث طولانی شدن محاسبات می‌شود [۱۳ و ۱۴]. برخی پژوهش‌ها نمونه‌هایی از پیاده‌سازی عملی سیستم‌های کنترلی مبتنی بر منطق فازی بر روی سیستم‌های رباتیک جراحی هستند که نشان‌دهنده کاهش لرزش و تخمین دینامیک سیستم می‌باشد [۱۵]. همچنین در زمینه روش‌های تشخیص عیب و طراحی روش‌های کنترلی تحمل‌پذیر عیب در زمینه ربات‌های صنعتی پژوهش‌هایی صورت گرفته است که در این مقالات به رفع مشکلات ناگهانی سیستم همانند خرابی یا وقوع عیب پرداخته شده است [۱۶]. پیلتان و همکاران به بررسی انواع روش‌های تشخیص و تخمین عیب و کنترل‌کننده‌های تحمل‌پذیر عیب در ربات‌ها پرداخته‌اند که علاوه بر تشخیص این امکان را داشته باشد

که در صورت وقوع عیب آن را رفع کند [۱۷]. کنترل‌کننده‌های تحمل‌پذیر عیب فعال که در آن از رویکردهای مختلف برای شناسایی رخ دادن عیب و تخمین میزان تأثیرگذاری آن بر عملکرد سیستم کنترلی استفاده می‌شود؛ از عملکرد بسیار مطلوبی نسب به سایر روش‌ها مانند کنترل‌کننده‌های تحمل‌پذیر عیب غیرفعال برخوردار می‌باشند [۱۸]. ریاژ و همکاران به بررسی انواع مختلف کنترل‌کننده‌های تحمل‌پذیر عیب مبتنی بر روش مد لغزشی پرداخته‌اند که بدون استفاده از شبکه‌های فازی و عصبی بکار برده شده‌اند [۱۹ و ۲۰].

حذف پدیده لرزش در سیگنال‌های کنترلی بدون استفاده از روش‌هایی مانند کنترل فازی، شبکه‌های عصبی و روش‌های جایگزینی تابع علامت و یا روش‌های مبتنی بر لایه مرزی سطح لغزش از جمله نوآوری‌های پژوهش حاضر نسبت به پژوهش‌های قبلی می‌باشد زیرا در اکثر پژوهش‌های گذشته از روش‌های کنترلی مختلف مانند شبکه‌های عصبی یا کنترل‌کننده‌های فازی استفاده شده است [۱۳ و ۱۴]. ایده اصلی مورد استفاده در این زمینه کاربرد روش مد لغزشی مرتبه دوم و ترکیب با روش کنترلی مد لغزشی مبتنی بر الگوریتم فرایپچش است که بدون نیاز به استفاده از رویکردهای دیگر قادر به حذف پدیده لرزش و افزایش دقت و سرعت ردیابی هستند که در پژوهش‌های گذشته از این روش استفاده نشده است. به طور مثال فقط از روش مد لغزشی مرتبه دوم استفاده شده است. مورد دیگر استفاده از روش پس‌خورد خروجی به جای روش‌های مبتنی بر فیدبک حالت با استفاده از رویکردهای حالت مبتنی بر روش مد لغزشی مرتبه بالا است که باعث می‌شود به‌جای استفاده از حسگرهای گران‌قیمت اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای مفاصل ربات که به دلیل نویز و عدم دقت در کالیبره شدن ممکن است دارای خطای اندازه‌گیری نیز باشند؛ متغیرهای حالت مربوط به سرعت دورانی مفاصل را به صورت دقیق تخمین زد و در ساختار سیستم کنترلی مورد استفاده قرار داد. علاوه بر این استفاده از این رویکردها این قابلیت را دارد که از طریق یک رویکرد بتوان تابع اغتشاشات و عدم قطعیت‌های دینامیکی سیستم را تخمین زد و از پیچیدگی ساختار کنترلی به دلیل استفاده از رویکردهای متفاوت جلوگیری کرد. همچنین از روش‌های کنترل غیرخطی مبتنی بر مد لغزشی مرتبه دوم و ترکیب آن با روش مد لغزشی فرایپچشی به منظور افزایش دقت و سرعت ردیابی، کاهش مصرف انرژی و دستیابی به زمان پایداری محدود استفاده شده است. رویکردهای مد لغزشی مرتبه بالا برای شناسایی رخ دادن عیب و تخمین میزان اثرگذاری آن و تعریف ورودی‌های کنترلی جبران ساز به منظور طراحی ساختار کنترلی تحمل‌پذیر عیب بکار گرفته شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در پژوهش‌های گذشته از مدل‌های سه درجه آزادی و شش درجه آزادی ربات معروف PUMA-560 برای شبیه‌سازی سیستم کنترلی ربات‌های جراح استفاده شده است [۲۱ و ۲۲]. در واقع می‌توان گفت این ربات مبنای توسعه ربات‌های جراحی بوده و نمونه‌های اولیه ربات‌های جراحی و همچنین بسیاری از ربات‌های جراحی جدید بر بستر همین ربات توسعه پیدا کرده‌اند [۵-۱]. به همین جهت در

در معادله فوق پارامتر  $\varphi_i$  یک مقدار مثبت بوده که نشان‌دهنده نرخ گسترش (تکامل) عیب<sup>۱</sup> محرکه است. مقادیر کوچک  $\varphi_i$  مشخص‌کننده یک عیب با نرخ گسترش پایین یا یک عیب اولیه در محرکه‌های سیستم است، درحالی‌که مقادیر بزرگ آن موجب می‌گردد تابع  $\beta$  به تابع پله میل نماید و تخمینی از تابع پله باشد که می‌تواند نشان‌دهنده اتفاق افتادن ناگهانی یک عیب در محرکه‌های سیستم باشد. در شرایطی که  $\varphi_i \rightarrow \infty$  تابع  $\beta$  به تابع پله تبدیل می‌گردد و این موضوع به معنی این است که عیب اولیه محرکه‌های سیستم به صورت یک عیب ناگهانی در سیستم ظاهر می‌گردد. به منظور ساده‌سازی فرایند طراحی و تحلیل کنترل‌کننده و کاهش حجم محاسبات معادله (۶) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)(\tau - H(q, \dot{q})) + \Delta(q, \dot{q}, t) + \beta(t - T_f)\phi(q, \dot{q}, \tau) \quad (8)$$

که در آن  $H(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)$  است و  $\Delta(q, \dot{q}, t) = M^{-1}(q)(-F(\dot{q}) - \tau_d)$  بیانگر تابع عدم قطعیت‌های دینامیکی مجموع سیستم ربات می‌باشد. طراحی سیستم کنترلی نیازمند انجام برخی از مفروضات است که در فرایند طراحی کنترل‌کننده و اثبات پایداری آن نیاز است که در ادامه بیان می‌گردد:

**فرض ۱:** تابع عدم قطعیت‌های دینامیک ربات دارای مقداری محدود است. به عبارت دیگر عدم قطعیت‌های سیستم دارای یک حد بالا است که می‌توان به صورت زیر آن را بیان نمود:

$$\|M^{-1}(q)(F(\dot{q}) + \tau_d)\| = \Delta(q, \dot{q}, t) \leq \bar{\Delta} \quad (9)$$

که در آن  $\bar{\Delta}$  یک مقدار مثبت معلوم است.

**فرض ۲:** تابع عیوب محرکه‌های سیستم دارای مقداری محدود (دارای یک حد بالا) است که به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\|\phi(q, \dot{q}, t)\| < \bar{\phi} \quad (10)$$

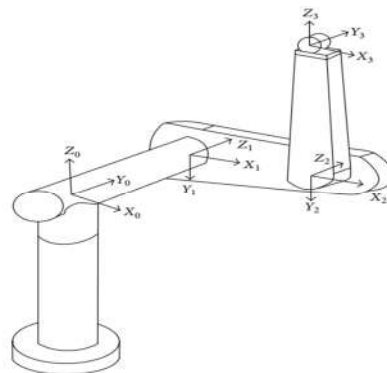
### ۱-۲- طراحی رویتگر (تشخیص و تخمین عیوب)

با توجه به اهمیت دقت و سرعت همگرایی در ربات‌های جراحی، در پژوهش حاضر به منظور دستیابی به حداکثر دقت و سرعت از رویتگر حالت مد لغزشی مرتبه سوم به منظور تخمین عدم قطعیت‌های دینامیکی، تخمین اغتشاشات خارجی و تخمین سیگنال‌های مرتبط با عیوب محرکه استفاده خواهد شد که نمونه‌هایی از این رویتگر در پژوهش‌های قبلی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۳]. از سیگنال‌های تخمین زده شده برای عیوب محرکه در مراحل بعدی برای شناسایی عیب و همچنین طراحی ورودی‌های کنترلی جبران ساز جهت طراحی کنترل‌کننده‌های تحمل‌پذیر عیب استفاده خواهد شد. به منظور طراحی رویتگر مدنظر ابتدا تغییر متغیری به صورت  $x_1 = q$  و  $x_2 = \dot{q}$  در نظر می‌گیریم. حال دینامیک ربات را به صورت رابطه (۱۱) نوشته و معادله رویتگر حالت مد لغزشی مرتبه سوم مبتنی بر الگوریتم فرایند پیش برای دینامیک ربات در نظر گرفته شده را به صورت معادله (۱۲) می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(x_1, x_2, \tau) + \Delta(x_1, x_2, t) + \beta(t - T_f)\phi(x_1, x_2, \tau) \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن  $f(x_1, x_2, \tau) = M^{-1}(q)[\tau - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q)]$  است.

پژوهش حاضر نیز از مدل دینامیکی سه درجه آزادی این ربات برای نمایش نتایج شبیه‌سازی روش کنترلی پیشنهادی به‌عنوان نمونه مطالعاتی استفاده شده است (شکل ۱).



شکل ۱- طرحواره‌ای از ربات PUMA-560

دینامیک ربات را می‌توان در حالت کلی به صورت زیر بیان نمود:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_d(q, \dot{q}) = \tau \quad (1)$$

در معادله فوق  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  بیانگر شتاب زاویه‌ای، سرعت‌های زاویه‌ای و زوایای مفاصل ربات،  $M(q)$  ماتریس اثرات اینرسی،  $C(q, \dot{q})$  ماتریس اثرات شتاب‌های مرکزگرا و کوریولیس،  $G(q)$  ماتریس اثرات گرانشی و  $\tau_d(q, \dot{q})$  ماتریس نیروهای اغتشاشی وارد بر سیستم است. با توجه به اینکه ماتریس‌های موجود در معادله (۱) شامل جرم، طول بازوهای ربات و ممان اینرسی بازوها است و این پارامترها دارای عدم قطعیت هستند با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های سیستم می‌توان معادله فوق را به صورت زیر بازنویسی نمود [۲۱]:

$$\begin{aligned} (M(q) + \Delta M(q))\ddot{q} + (C(q, \dot{q}) + \Delta C(q, \dot{q}))\dot{q} \\ + (G(q) + \Delta G(q)) + \tau_d(q, \dot{q}) = \tau \rightarrow \\ M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - \tau_d(q, \dot{q}) \\ - (\Delta M(q)\ddot{q} + \Delta C(q, \dot{q})\dot{q} + \Delta G(q)) \end{aligned} \quad (2)$$

در معادله بالا  $\Delta M(q)$ ،  $\Delta C(q, \dot{q})$  و  $\Delta G(q)$  عدم قطعیت در ماتریس‌های دینامیک سیستم است. در معادله فوق تابع مجموع عدم قطعیت‌های سیستم را می‌توان به صورت زیر مدل‌سازی نمود.

$$d(t) = -\tau_d - (\Delta M(q)\ddot{q} + \Delta C(q, \dot{q})\dot{q} + \Delta G(q)) \quad (3)$$

در این صورت معادله (۲) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + d(t) \quad (4)$$

برای طراحی سیستم کنترلی ابتدا معادله (۴) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\ddot{q} = -M^{-1}(q)C(q, \dot{q})\dot{q} - M^{-1}(q)G(q) - M^{-1}(q)d(t) + M^{-1}(q)\tau \quad (5)$$

با در نظر گرفتن اثرات عیوب محرکه‌های ربات و همچنین اصطکاک مفاصل، معادله فوق به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود [۲۱]:

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)(\tau - C(q, \dot{q})\dot{q} - F(\dot{q}) - G(q) - \tau_d) + \beta(t - T_f)\phi(q, \dot{q}, \tau) \quad (6)$$

که در آن،  $F(\dot{q})$  بیانگر نیروهای اصطکاکی و  $\phi(q, \dot{q}, \tau)$  بردار اثرات عیب ناشی از عیوب محرکه و  $\beta(t - T_f)$  بیانگر پروفیل عیوب محرکه و  $T_f$  زمان رخ دادن عیب می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\beta_i(t - T_f) = \begin{cases} 0 & \text{if } t < T_f \\ 1 - e^{-\varphi_i(t - T_f)} & \text{if } t \geq T_f \end{cases} \quad (7)$$

<sup>1</sup> Fault Evolution Rate

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \hat{x}_2 + \alpha_2 \|x_1 - \hat{x}_1\|^{2/3} \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \hat{x}_2 &= f(x_1, \hat{x}_2, \tau) + \alpha_1 \|\hat{x}_1 - \hat{x}_2\|^{1/2} \text{sign}(\hat{x}_1 - \hat{x}_2) + \hat{z}_{eq} \quad (12) \\ \dot{\hat{z}}_{eq} &= \alpha_0 \text{sign}(\hat{x}_1 - \hat{x}_2) \end{aligned}$$

که در آن پارامترهای  $\alpha_i$  بهره‌های روینگر می‌باشند و باید توسط طراح سیستم کنترلی انتخاب گردد (۲۴ و ۲۵ و ۲۶). با جایگذاری معادله (۱۱) در معادله (۱۲) معادله مربوط به خطای تخمین حالت‌های سیستم به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_1 &= \tilde{x}_2 - \alpha_2 \|x_1 - \hat{x}_1\|^{2/3} \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\tilde{x}}_2 &= d(x_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_2) + \Delta(x_1, x_2, t) + \phi(x_1, x_2, \tau) \\ &\quad - \alpha_1 \|\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2\|^{1/2} \text{sign}(\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2) - \tilde{z}_{eq} \quad (13) \\ \dot{\tilde{z}}_{eq} &= \alpha_0 \text{sign}(\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2) \end{aligned}$$

که در آن  $\tilde{x}_i = x_i - \hat{x}_i$  تخمین خطای حالت و  $d(x_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_2) = f(x_1, x_2, \tau) - f(x_1, \hat{x}_2, \tau)$  اگر یک تابع جدید به صورت  $F(x_1, x_2, \tau) = d(x_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_2) + \Delta(x_1, x_2, t) + \phi(x_1, x_2, \tau)$  تعریف نماییم که بیانگر مجموع عدم قطعیت‌ها، اغتشاشات خارجی و عیوب سیستم است با توجه به فرض (۱) و (۲) که در بخش قبل صورت گرفت؛ آنگاه می‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$F(x_1, x_2, \tilde{x}_2, \tau) < f^+ \quad (14)$$

انتخاب بهره‌های روینگر ( $\alpha_i$ ) با توجه به تأثیری که در دقت و سرعت همگرایی روینگر دارد موضوع مهمی است و روش‌های متنوعی در پژوهش‌های گذشته بدین منظور ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از منطق فازی اشاره کرد که موجب می‌شود ساختار روینگر به صورت تطبیقی طراحی گردد [۵]. از میان روش‌های موجود روش ساده‌تری برای انتخاب بهره‌های روینگر وجود دارد که به‌طور مفصل در پژوهش‌های قبلی بحث شده است [۷]. روش مدنظر بیان می‌کند که اگر بهره‌های روینگر به صورت  $\alpha_1 = 1.1f^+$ ،  $\alpha_0 = 1.5(f^+)^{1/2}$  و  $\alpha_2 = 1.9(f^+)^{1/3}$  انتخاب گردد، پایداری و همگرایی روینگر را تضمین می‌نماید که در پژوهش حاضر نیز از این روش برای تنظیم بهره‌های کنترلی استفاده می‌گردد. پس از همگرایی روینگر، خطاهای تخمین به سمت صفر میل نموده و حالت‌های تخمین زده شده به مقادیر واقعی حالت‌ها همگرا خواهند شد و تساوی زیر برقرار می‌شود:

$$\begin{aligned} \Delta(x_1, x_2, t) + \phi(x_1, x_2, \tau) \\ - \alpha_1 \|\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2\|^{1/2} \text{sign}(\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2) - \tilde{z}_{eq} = 0 \quad (15) \end{aligned}$$

زمانی که روینگر همگرا می‌گردد، بخش سوم معادله (۱۵) به صفر میل خواهد نمود و با توجه به این موضوع می‌توان تابع تخمین مجموع عدم قطعیت‌ها و اثرات عیوب محرکه‌ها را به صورت زیر نوشت:

$$\hat{z}_{eq} = \Delta(x_1, x_2, t) + \phi(x_1, x_2, \tau) \quad (16)$$

لازم به ذکر است در معادلات (۱۵) و (۱۶) عبارت  $\hat{z}_{eq}$  یک تابع پیوسته بوده و بنابراین نیازی به استفاده از یک فیلتر پایین گذر برای به دست آوردن خروجی معادل آن جهت رفع مشکل ناپیوستگی نیست که این موضوع با توجه به اینکه استفاده از فیلترها موجب ایجاد تأخیر و کاهش دقت در عملکرد سیستم می‌شود از مزیت‌های روینگر حالت مد لغزشی مرتبه سوم مبتنی بر الگوریتم فرایبچش است. این موضوع برای طراحی کنترل‌کننده‌های تحمل‌پذیر عیب فعال با توجه به نیاز به تخمین دقیق عیوب محرکه در این نوع از کنترل‌کننده‌های تحمل‌پذیر عیب، بسیار مهم و ضروری است.

در مرحله قبل روینگر حالت مد لغزشی مرتبه سوم برای تشخیص عیوب محرکه‌ها در حضور عدم قطعیت‌ها بکار گرفته شد. با توجه به معادله (۱۰) در زمان‌های قبل از رخ دادن عیب در محرکه‌ها ( $t < T_f$ ) رابطه  $\phi(q, \dot{q}, \tau) = 0$  برقرار بوده و سیستم بدون حضور عیوب محرکه در شرایط کارکرد عادی خود قرار دارد. در این شرایط با توجه به رابطه (۱۶) می‌توان گفت رابطه  $\hat{z}_{eq} = \Delta(x_1, x_2, t)$  برقرار بوده و با توجه به فرض (۲) می‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$\hat{z}_{eq} = \Delta(x_1, \tilde{x}_2, t) \leq \bar{\Delta} = \bar{z}_{th} \quad (17)$$

در رابطه فوق حد آستانه<sup>۱</sup> به نحوی انتخاب می‌شود که تابع باقیمانده<sup>۲</sup> که برای تشخیص عیب محرکه مورد استفاده قرار می‌گیرد، به خوبی بتواند شرایط کارکرد عادی سیستم و شرایط کاری با وجود عیوب محرکه را تشخیص دهد. با توجه به اینکه تابع باقیمانده  $\hat{z}_{eq}$  همواره از  $\bar{z}_{th}$  در شرایط کارکرد عادی کوچک‌تر است، بنابراین  $\bar{z}_{th}$  به عنوان حد آستانه برای تشخیص رخ دادن عیب انتخاب می‌گردد. در شرایطی که عیوب محرکه‌ها رخ می‌دهند و تأثیر خود را در عملکرد سیستم نمایان می‌سازند می‌توان گفت که رابطه  $\hat{z}_{eq} = \Delta(x_1, x_2, t) + \phi(q, \dot{q}, \tau) > \bar{z}_{th}$  برقرار بوده و حضور عیوب محرکه در سیستم کنترلی اعلام می‌گردد.

## ۲-۲- طراحی کنترل کننده

در بخش حاضر دو نوع کنترل‌کننده مقاوم در برابر حضور عدم قطعیت‌ها، اغتشاشات و عیوب محرکه‌ها با استفاده از روش کنترلی مد لغزشی طراحی می‌گردد. هدف هر دو استراتژی کنترلی تحمل‌پذیر عیب فعال<sup>۳</sup> و منفعل (غیرفعال)<sup>۴</sup> دستیابی به عملکرد قابل قبول و پایداری سیستم برای هر دو حالت سیستم عادی و سیستم دچار عیب می‌باشد. بدین منظور ابتدا یک کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب منفعل که فرایند طراحی آن وابسته به اطلاعات به دست آمده از تشخیص عیب با استفاده از به‌کارگیری روینگرها نیست، با استفاده از ترکیب روش مد لغزشی مرسوم (کلاسیک یا مرتبه اول) و مقادیر تخمین زده شده برای حالت‌های سیستم، طراحی خواهد شد و مزایا و معایب آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ادامه کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب فعال با استفاده از مد لغزشی مرسوم و اطلاعات مربوط به تشخیص و تخمین عیب به دست آمده از روینگر طراحی شده ارائه خواهد شد. در نهایت در مراحل بعدی به منظور برطرف نمودن عیب اصلی روش‌های ارائه شده در مراحل قبلی که عبارت است از حضور پدیده لرزش در سیگنال‌های کنترلی به دست آمده که ناشی از وجود تابع علامت در ساختار توابع کنترلی طراحی شده است، کنترل‌کننده‌های تحمل‌پذیر عیب فعال و منفعل جدیدی با استفاده از رویکرد مد لغزشی مرتبه دوم فرایبچیشی به دلیل قابلیت آن در حذف پدیده لرزش بدون نیاز به استفاده از روش‌های هوشمند مانند منطق فازی و شبکه‌های عصبی و همچنین زمان محدود بودن پایداری آن که موجب همگرایی سریع سیستم کنترلی می‌گردد و نیز دقت بالای آن، طراحی خواهد شد. ساختار کلی

<sup>1</sup> Threshold

<sup>2</sup> Residual

<sup>3</sup> Active Fault-Tolerant Control

<sup>4</sup> Passive Fault-Tolerant Control

$$u = u_{eq} + u_u + u_f \quad (22)$$

که در آن  $u_{eq}$  ورودی کنترلی معادل است که با حل معادله (۲۱) به دست می‌آید و عبارت است از:

$$u_{eq} = M(x_1)(\ddot{x}_d - \lambda(\dot{x}_2 - \dot{x}_d) - g(x_1, \dot{x}_2)) \quad (23)$$

در معادله فوق  $\dot{x}_2$  مقدار تخمین زده شده برای  $x_2$  یا همان مقدار تخمین زده شده سرعت‌های زاویه‌ای مفاصل ربات است که از طریق رویکرد حالت مد لغزشی مرتبه سوم مبتنی بر الگوریتم فرایبچش در مرحله قبلی به دست می‌آید و بنابراین سیستم کنترلی طراحی شده نیازی به اطلاعات سرعت‌های زاویه‌ای مفاصل ربات که به صورت مستقیم از طریق حسگرها اندازه‌گیری شوند؛ ندارد. همچنین در معادله (۲۲) عبارت  $u_u$  تلاش کنترلی برای جبران اثرات عدم قطعیت‌های موجود در سیستم است که به صورت زیر تعریف می‌گردد تا سیستم کنترلی در برابر اثرات حضور عدم قطعیت‌ها مقاوم و پایدار باشد:

$$u_u = -M(x_1)\rho_u \text{sign}(s) \quad (24)$$

در عبارت فوق  $\rho_u$  یک پارامتر ثابت مثبت است و با توجه به حد بالای عدم قطعیت‌ها به صورت  $\rho_u \geq \bar{\Delta}$  انتخاب می‌گردد. در معادله (۲۲)  $u_f$  یک تلاش کنترلی برای جبران اثرات عیوب محرکه‌های سیستم است و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$u_f = -M(x_1)\rho_f \text{sign}(s) \quad (25)$$

در این رابطه  $\rho_f$  یک ثابت مثبت است که با توجه به حد بالای تابع عیوب محرکه‌ها و به صورت  $\rho_f \geq \bar{\Phi}$  انتخاب می‌گردد. به منظور ساده‌سازی معادله (۲۲) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$u = u_{eq} + u_{uf} \quad (26)$$

که در رابطه فوق  $u_{eq}$  همان ورودی کنترلی معادل تعریف شده در معادله (۲۳) بوده و  $u_{uf}$  تلاش کنترلی مجموع برای جبران اثرات عدم قطعیت‌ها و عیوب محرکه‌ها می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$u_{uf} = u_u + u_f = -M(x_1)\rho_{uf} \text{sign}(s) \quad (27)$$

در رابطه فوق  $\rho_{uf}$  با توجه حد بالای مجموع عدم قطعیت‌ها و عیوب محرکه‌ها به صورت  $\rho_{uf} = \rho_u + \rho_f \geq \bar{\Delta} + \bar{\Phi}$  انتخاب می‌گردد.

### ۲-۲-۲- طراحی کنترل کننده تحمل پذیر عیب فعال با استفاده

#### از مد لغزشی مرتبه اول و رویکرد

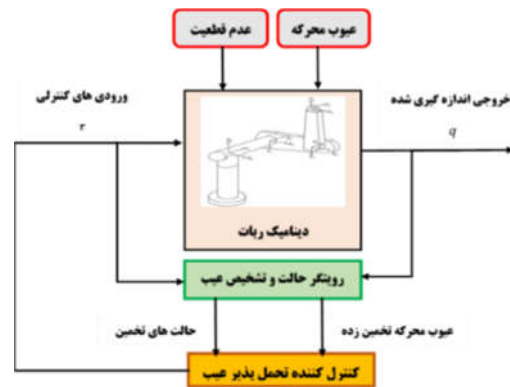
در این بخش کنترل کننده تحمل پذیر عیب فعال ارائه می‌شود که در آن از خروجی‌های رویکرد حالت مد لغزشی مرتبه سوم مبتنی بر الگوریتم فرایبچش که در بخش ۲-۲-۱ طراحی شد، برای تشخیص و تخمین عیوب محرکه استفاده خواهد شد. برای انجام این کار ابتدا با توجه به ساختار کنترلی ارائه شده در شکل ۲ تلاش کنترلی (قانون کنترلی) مشابه با فرایبچش انجام شده در بخش قبل به صورت زیر انتخاب می‌گردد:

$$u = u_{eq} + u_c + u_s \quad (28)$$

در رابطه فوق  $u_{eq}$  همان ورودی کنترلی معادل تعریف شده در معادله (۲۳) است که برای سیستم در شرایط کارکرد عادی بدون حضور عدم قطعیت‌ها و عیوب محرکه محاسبه شده است.  $u_c$  تلاش کنترلی موردنیاز برای جبران اثرات حضور عدم قطعیت‌ها و عیوب محرکه‌ها است و به صورت زیر تعریف می‌گردد [۳۲]:

$$u_c = -M(x_1)\ddot{e}_{eq} \quad (29)$$

سیستم کنترلی پیشنهادی در پژوهش حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- ساختار سیستم کنترلی پیشنهادی

### ۲-۲-۱- طراحی کنترل کننده تحمل پذیر عیب منفعل (بدون

#### رویتگر) با استفاده از مد لغزشی مرتبه اول

هدف از طراحی کنترل کننده تحمل پذیر عیب منفعل استفاده از یک ساختار کنترلی ثابت برای تطبیق با تمامی خطاهای مورد انتظار سیستم است. با توجه به معادله (۱۱) دینامیک ربات زمانی که عیوب محرکه اتفاق می‌افتد به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= M^{-1}(x_1)u + g(x_1, x_2) + \Delta(x_1, x_2, t) \\ &\quad + \phi(x_1, x_2, u) \end{aligned} \quad (18)$$

در معادله فوق  $u = \tau$  بیانگر ورودی‌های کنترلی بوده و  $g(x_1, x_2) = M^{-1}(x_1)(-C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q))$  فرایند طراحی کنترل کننده مد لغزشی شامل دو مرحله اصلی است. مرحله اول طراحی شامل تشکیل یک سطح لغزش مطلوب است که به نحوی انتخاب می‌گردد که وقتی سطح لغزش به سمت صفر میل می‌نماید؛ هدف کنترلی مطلوب به دست آید. مرحله دوم طراحی نیز عبارت است از طراحی و انتخاب یک قانون کنترلی که حالت‌های سیستم را در یک زمان محدود به سطح لغزش برساند. بر این اساس در مرحله اول طراحی ابتدا خطای ردیابی سیستم و یک سطح لغزش به صورت زیر تعریف می‌گردد [۲۸]:

$$e = x_1 - x_d \quad (19)$$

و همچنین سطح لغزش هم برابر است با:

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (20)$$

که در آن  $\lambda$  یک پارامتر ثابت اکیداً مثبت است. با توجه به معادلات مشخص است که اگر حالت‌های سیستم بر روی سطح لغزش قرار گیرند، هدف کنترل ردیابی به صورت  $e \rightarrow 0$  قابل دستیابی است. برای مرحله دوم برای اینکه مطمئن شویم حالت‌های سیستم در حضور عدم قطعیت‌ها، اغتشاشات خارجی و عیوب محرکه بر روی سطح لغزش قرار می‌گیرد، مشتق تابع سطح لغزش را برابر صفر قرار می‌دهیم ( $\dot{s} = 0$ ) تا ورودی کنترلی موردنیاز برای رسیدن به این هدف را به دست بیاوریم. با انجام این فرایند به عبارت زیر می‌رسیم:

$$\dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} = M^{-1}(x_1)\dot{u} + g(x_1, x_2) + \Delta(x_1, x_2, t) + \phi(x_1, x_2, u) - \ddot{x}_d + \lambda(\dot{x}_2 - \dot{x}_d) = 0 \quad (21)$$

قانون کنترلی به صورت زیر طراحی می‌گردد:

در عبارت فوق  $\bar{z}_{eq}$  همان طور که در بخش طراحی رویتگر مورد بحث قرار گرفت؛ مقدار تخمین زده شده برای مجموع عدم قطعیت‌ها و عیوب محرکه سیستم است. در واقع در مقایسه با کنترل کننده تحمل پذیر عیب منفعل که در آن از مقادیر پیش فرض عدم قطعیت‌ها و عیوب محرکه‌ها برای طراحی سیستم کنترلی استفاده می‌شد در کنترل کننده تحمل پذیر عیب فعال ابتدا از طریق رویتگر مقادیر عدم قطعیت‌ها و همچنین رخ دادن عیب و مقادیر تأثیر عیوب محرکه از طریق رویتگر طراحی شده تخمین زده شده و از اطلاعات آن برای طراحی سیستم کنترلی استفاده می‌گردد. این موضوع باعث می‌شود تا سیستم کنترلی فعال به صورت برخط توانایی حذف اثرات عدم قطعیت و جبران رخ دادن عیوب محرکه‌ها را داشته باشد. با توجه به اینکه رویتگرهای مورد استفاده دارای مقداری خطای تخمین می‌باشند یک ورودی جبران ساز دیگر به منظور مقابله با اثرات خطای تخمین نیاز هست تا تعریف گردد که در معادله (۲۸) این تلاش کنترلی جبران ساز با عبارت  $u_s$  مشخص شده است و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$u_s = -M(x_1) \text{vsign}(s) \quad (30)$$

در عبارت فوق  $v$  ضریب (بهره) سطح لغزش می‌باشد که مقدار مثبت بوده و توسط طراح انتخاب می‌گردد. حال مشتق تابع سطح لغزش را با توجه به ورودی کنترلی تعریف شده در معادله (۲۸) به دست می‌آوریم:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{e} + \lambda \dot{e} = M^{-1}(x_1)(u_{eq} + u_c + u_s) + g(x_1, x_2) \\ &+ \Delta(x_1, x_2, t) + \phi(x_1, x_2, u) - \ddot{x}_d + \lambda(\dot{x}_2 - \dot{x}_d) \\ &= M^{-1}(x_1)(u_s) - \bar{z}_{eq} + \Delta(x_1, x_2, t) + \phi(x_1, x_2, u) \\ &= M^{-1}(x_1)(u_s) - (\bar{\Delta}(x_1, x_2, t) + \bar{\Phi}(x_1, x_2, u)) \\ &+ \Delta(x_1, x_2, t) + \phi(x_1, x_2, u) \\ &= -\text{vsign}(s) + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (31)$$

در معادله فوق  $\bar{\Delta}(x_1, x_2, t)$  و  $\bar{\Phi}(x_1, x_2, u)$  مقادیر تخمین زده شده عیوب محرکه‌ها و عدم قطعیت‌های سیستم توسط رویتگر حالت طراحی شده بوده و  $\varepsilon_1 = \Delta(x_1, x_2, t) - \bar{\Delta}(x_1, x_2, t)$  و  $\varepsilon_2 = \phi(x_1, x_2, u) - \bar{\Phi}(x_1, x_2, u)$  هستند که بیانگر خطای تخمین عدم قطعیت‌ها و خطای تخمین عیوب محرکه می‌باشند.

با توجه به اینکه رویتگر مد لغزشی مرتبه سوم یک رویتگر مقاوم است می‌توان گفت که خطاهای تخمین حاصل شده داری مقادیری محدود می‌باشند و به صورت  $\varepsilon_1 \leq \bar{\varepsilon}_1$  و  $\varepsilon_2 \leq \bar{\varepsilon}_2$  قابل بیان هستند. به منظور اطمینان از همگرایی سطح لغزش به سمت صفر در معادله (۳۰) (۷) باید به گونه‌ای انتخاب گردد که شرط  $\|\bar{\varepsilon}_1 + \bar{\varepsilon}_2\| \geq v$  برقرار باشد.

به منظور مقایسه با کنترل کننده منفعل طراحی شده در بخش قبلی با توجه به اینکه واضح است حد بالای خطای تخمین عدم قطعیت‌ها و عیوب محرکه‌ها از حد بالای خود عدم قطعیت‌ها و عیوب محرکه‌ها کمتر می‌باشد و به صورت  $\bar{\Delta} \ll \bar{\Phi}$  و  $\bar{\varepsilon}_1 \ll \bar{\varepsilon}_2$  قابل بیان است، برای ضریب بهره سطح لغزش مورد استفاده در کنترل کننده تحمل پذیر عیب فعال طراحی شده در بخش حاضر که در معادله (۳۰) موجود است؛ می‌توان مقدار بسیار پایین تری نسبت به ضریب سطح لغزش مورد استفاده برای کنترل کننده منفعل طراحی شده در بخش قبلی که در معادله (۲۷) بیان شد؛ انتخاب کرد. با توجه به اینکه ضریب سطح لغزش در تابع علامت سطح لغزش ( $\text{sign}(s)$ ) ضرب می‌گردد و حضور تابع علامت سطح لغزش در ورودی کنترلی دلیل اصلی به وجود آمدن پدیده لرزش در سیگنال‌های کنترلی است؛ بنابراین هرچقدر ضریب سطح لغزش بتواند مقادیر کمتری داشته باشد به همان میزان از تأثیر

تابع علامت در سیگنال کنترلی کاسته شده و در نتیجه میزان لرزش در سیگنال‌های کنترلی نیز کاهش پیدا خواهد کرد. با توجه به اینکه سیگنال‌های کنترلی طراحی شده در پیاده‌سازی عملی باید توسط محرکه‌های سیستم تولید گردند؛ وجود پدیده لرزش باعث آسیب به محرکه‌های سیستم و کاهش دقت عملکرد خواهد شد؛ بنابراین نتیجه می‌گیریم که استفاده از رویتگرها برای طراحی کنترل کننده‌های تحمل پذیر عیب علاوه بر حذف نیاز به حسگرهای گران قیمت برای تخمین سرعت‌های زاویه‌ای، موجب کاهش پدیده لرزش و در نتیجه افزایش طول عمر محرکه‌های سیستم خواهد شد.

## ۲-۲-۲- کنترل کننده تحمل پذیر عیب فعال با استفاده از مد

### لغزشی مرتبه دوم فرایبچشی و رویتگر

الگوریتم فرایبچش یکی از روش‌های قدرتمند برای حذف پدیده لرزش است که در پژوهش‌های متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. مزیت مد لغزشی مبتنی بر الگوریتم فرایبچش نسبت به روش‌های مد لغزشی نهایی عدم نیاز با استفاده از توابع جایگزین پیوسته برای تابع علامت بوده و بنابراین مشکل عدم پایداری سیستم را ندارد [۳۰]. در بخش حاضر به منظور رفع معایب روش کنترلی طراحی شده در بخش قبلی که عبارت بودند از عدم پایداری زمان محدود سیستم کنترلی و وجود پدیده لرزش و همچنین دستیابی به دقت و سرعت ردیابی بالاتر یک قانون کنترلی جدید با استفاده از مد لغزشی مرتبه دوم و ترکیب آن با الگوریتم فرایبچش و با استفاده از رویتگر مد لغزشی مرتبه سوم طراحی شده در بخش‌های قبل ارائه خواهد شد. به منظور طراحی کنترل کننده جدید پیشنهادی با در نظر گرفتن معادله (۳۱) و همچنین با توجه به معادلات توابع ورودی‌های کنترلی  $u_{eq}$  در معادله (۲۳) و  $u_c$  در معادله (۲۴) معادله مشتق تابع سطح لغزش ( $\dot{s}$ ) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\dot{s} = M^{-1}(x_1)u_s + \phi(t, x_1, x_2) \quad (32)$$

که در آن  $u_s$  تابع ورودی‌های کنترلی می‌باشد که می‌خواهیم در این مرحله با استفاده از مد لغزشی مرتبه دوم فرایبچشی به جای استفاده از مد لغزشی مرتبه اول استفاده شده در مرحله قبل طراحی کنیم. در معادله فوق حد بالای عدم قطعیت تابع  $\phi(t, x_1, x_2)$  را می‌توان به این صورت  $\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_1 + \bar{\varepsilon}_2 \leq \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \phi(t, x_1, x_2)$  مدل سازی نمود. طراحی ورودی‌های کنترلی بر اساس الگوریتم فرایبچش را به صورت زیر می‌توان انجام داد [۳۱]:

$$\begin{aligned} u_s &= -M(x_1)u_{STW-SOSM} \\ u_{STW-SOSM} &= k_1 \|s\|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s) - z_2 \\ z_2 &= -k_2 \text{sign}(s) \end{aligned} \quad (33)$$

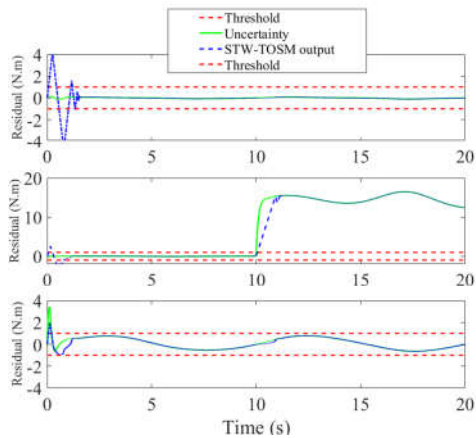
با توجه به معادلات (۳۲) و (۳۳) به دلیل اینکه تابع علامت در الگوریتم فرایبچش در فرایند انتگرال گیری قرار می‌گیرد بنابراین اثرات ناپیوستگی آن که موجب بروز پدیده لرزش می‌شود در ورودی‌های کنترلی ظاهر نمی‌گردند [۲۸ و ۳۱]. در اینجا به منظور پرهیز از طولانی شدن مباحث، پایداری روش کنترلی و شرایط لازم برای پایداری به صورت کلی بیان می‌گردد. در بحث پایداری روش کنترلی پیشنهادی با توجه به معادلات (۳۲) و (۳۳) شکل حلقه بسته دینامیک خطا را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= -k_1 \|s\|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s) + z_2 + \phi(t, x_1, x_2) \\ \dot{z}_2 &= -k_2 \text{sign}(s) \end{aligned} \quad (34)$$

گشتاور محرکه خواهد داشت که ناشی از تأثیر عیوب محرکه بوده و می‌تواند در حالت کلی به صورت زیر مدل شود:

$$\bar{\tau}(t) = \tau_0(t) + \delta\tau(t) \quad (38)$$

در معادله فوق عبارت  $\delta\tau(t)$  بیانگر عیوب محرکه است که می‌توان بر اساس آن عبارت مربوط به عیوب محرکه  $\Phi(q, \dot{q}, \tau)$  که در معادله (۶) تعریف شد را به صورت  $\delta\tau(t) = M^{-1}(q)\delta\tau(t)$  نشان داد. همچنین مقدار تخمین زده شده برای عیوب محرکه را می‌توان با توجه به خروجی رویتر طراحی شده به صورت  $\delta\hat{\tau}(t) = M(q)\hat{z}_{eq}$  محاسبه نمود که در آن  $\delta\hat{\tau}(t)$  بیانگر تخمین عیوب محرکه  $(\delta\tau(t))$  است. در شرایط کارکرد عادی سیستم (بدون وجود عیوب محرکه)  $\Phi(q, \dot{q}, \tau) = 0$  و همچنین  $\hat{z}_{eq} = \hat{\Delta}(q_1, \dot{q}, t)$  بوده و با توجه به معادله (۱۷) آستانه تشخیص عیب بر اساس باقیمانده به صورت‌های مختلف نشان داده شده در شکل (۳) انتخاب می‌گردند. در واقع زمانی که خروجی رویتر از حد آستانه در نظر گرفته شده عبور نماید دارای عیب است. برای بررسی قدرت تشخیص و جبران سازی اثرات عیوب محرکه یک عیب در محرکه دوم در لحظه  $t = 10s$  به صورت  $\delta\tau_1 = 15N$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- آستانه وقوع عیب و عملکرد رویتر در شناسایی آن

مسیرهای مطلوب<sup>۱</sup> برای حالت‌های سیستم در شبیه‌سازی به صورت  $x_d = [x_{1d}, x_{2d}, x_{3d}]$  در نظر گرفته شده است که با معادله (۳۹) تعریف می‌گردند:

$$\begin{cases} x_{1d} = \cos\left(\frac{t}{5\pi}\right) - 1 \\ x_{2d} = \cos\left(\frac{t}{5\pi} + \frac{\pi}{2}\right) \\ x_{3d} = \sin\left(\frac{t}{5\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 1 \end{cases} \quad (39)$$

یکی از کنترل‌کننده‌هایی که در ربات‌های صنعتی به صورت گسترده و به شکل عملی مورد استفاده قرار می‌گیرد کنترل‌کننده گشتاور محاسبه شده<sup>۲</sup> [۲۴] است که به عنوان معیاری برای مقایسه کیفیت عملکرد کنترل‌کننده‌های طراحی شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور ارزیابی عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی با نتایج روش کنترلی گشتاور محاسبه شده مورد مقایسه

در صورتی که بهره‌های سطح لغزش در معادله فوق به صورت رابطه (۳۵) انتخاب گردند پایداری سیستم تضمین می‌گردد و سیستم کنترلی دارای پایداری زمان محدود خواهد بود (پیوست ۱) [۳۴].

$$k_1 > 2\bar{\epsilon} \quad (35)$$

$$k_2 > k_1 \frac{5k_1 + 4\bar{\epsilon}}{(2k_1 - 4\bar{\epsilon})\bar{\epsilon}}$$

در ارتباط با پایداری روش کنترلی پیشنهادی دو نکته قابل توجه وجود دارد:

نکته اول عبارت است از این موضوع که پارامتر  $\bar{\epsilon}$  با توجه به اینکه حد بالای عملکرد تخمین رویتر طراحی شده در بخش‌های قبلی است و مقدار آن در حالت کلی نامعلوم است، مقدار آن را می‌توان از طریق آزمایش و سعی و خطا در خصوص عملکرد رویتر به دست آورد. هرچند با توجه به اینکه عملکرد رویترهای مد لغزشی مرتبه بالا از دقت بالایی برخوردار است؛ خطای تخمین این رویترها مقدار بسیار کوچکی می‌باشد و می‌توان برای آن در شبیه‌سازی و پیاده‌سازی سیستم کنترلی مقادیر بسیار کوچکی را در نظر گرفت

نکته دوم در ارتباط با تداخل نوع پایداری رویتر و کنترل‌کننده هست. در صورتی که رویتر مورد استفاده در یک ساختار کنترلی دارای پایداری مجانبی باشد و سیستم کنترلی طراحی شده دارای پایداری زمان محدود باشد این امکان وجود دارد که سیستم کنترلی در مجموع دارای پایداری زمان محدود نباشد؛ بنابراین بعد از اثبات پایداری رویتر و کنترل‌کننده به صورت جداگانه بایستی اثبات پایداری مجموعه سیستم کنترلی بار دیگر با در نظر گرفتن مقادیر تخمین زده شده برای حالت‌ها و عدم قطعیت‌های سیستم مورد بررسی قرار گیرد. همچنین در صورتی که رویتر مورد استفاده دارای پایداری زمان محدود باشد این تضمین را ارائه خواهد نمود که مقادیر تخمین زده شده حالت‌های سیستم بعد از زمان محدودی به مقادیر واقعی حالت‌های سیستم همگرا شده و معادل هم خواهند بود؛ بنابراین نیازی به اثبات مجدد پایداری سیستم کنترلی با جایگذاری مقادیر تخمینی حالت‌های سیستم و عدم قطعیت‌ها که از رویتر به دست می‌آید نخواهد بود [۲۴].

### ۳-۲- شبیه‌سازی و نتایج

اولین موردی که برای شبیه‌سازی نیاز است توابع مربوط به مدل اصطکاک و اغتشاشات خارجی وارد بر دینامیک سیستم است. در پژوهش حاضر به ترتیب از معادلات (۳۶) و (۳۷) برای توصیف دینامیک اصطکاک و نیروهای اغتشاشی خارجی استفاده شده است.

$$F(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 0.1\dot{q}_1 + 0.02\sin(3q_1) \\ 0.2\dot{q}_2 + 0.2\sin(2q_2) \\ 1.1\dot{q}_3 + 0.15\sin(q_3) \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\tau_d = \begin{bmatrix} 0.2\sin(\dot{q}_1) \\ 0.1\sin(\dot{q}_2) \\ 0.15\sin(\dot{q}_3) \end{bmatrix} \quad (37)$$

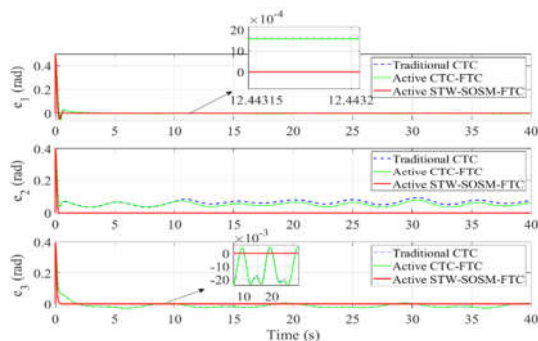
پارامترهای دینامیکی ربات مانند طول لینک‌های ربات، جرم لینک‌ها، ممان‌های اینرسی و عدم قطعیت‌های مربوط به این پارامترها همگی برگرفته از مرجع [۲۱] است که به عنوان مرجع اصلی دینامیک ربات puma شناخته می‌شود.

پس از وقوع عیب در محرکه‌های سیستم گشتاور تولیدی محرکه‌ها دیگر گشتاور نامی محرکه نبوده و یک مقدار اختلاف با مقدار نامی

<sup>1</sup> Desired Trajectories

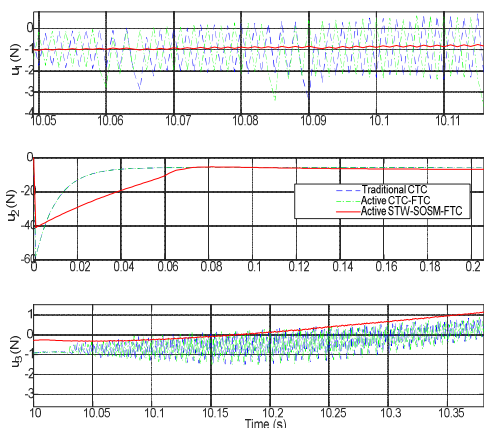
<sup>2</sup> Computed-Torque Control

با توجه به اینکه روش کنترل گشتاور محاسبه شده کلاسیک توانایی جبران اثرات عیوب محرکه را ندارد؛ بعد از لحظه  $t = 10s$  خطاهای ردیابی افزایش پیدا نموده و نتایج عملکرد ورودی‌های کنترلی نیز در شکل ۷ نشان داده شده است [۲۳]. با استفاده از رویکرد ساختار کنترلی گشتاور محاسبه شده در واقع این کنترل‌کننده تبدیل به یک کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب فعال می‌گردد. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده مشخص می‌شود نتایج ردیابی به دلیل استفاده از رویکرد به لطف قابلیت آن در تخمین میزان تأثیرگذاری عیوب محرکه و جبران آن بهبود پیدا نموده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که روش کنترلی تحمل‌پذیر عیب فعال مبتنی بر الگوریتم فرایچس هم از نظر سرعت ردیابی و هم از نظر دقت نسبت به روش‌های گشتاور محاسبه شده



شکل ۶- نتایج خطاهای ردیابی برای کنترل‌کننده پیشنهادی و روش کنترل گشتاور محاسبه‌شده

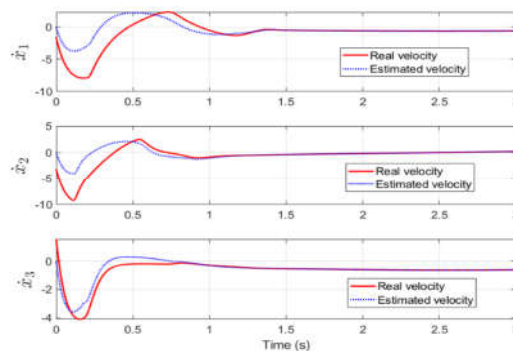
و منفعل در هر دو حالت بدون عیب و وجود عیب بهبود پیدا نموده است. همچنین با توجه به شکل ۷ لغزش کاهش یافته است [۳۰].



شکل ۷- نتایج ورودی‌های کنترلی برای روش پیشنهادی و روش کنترل گشتاور محاسبه شده

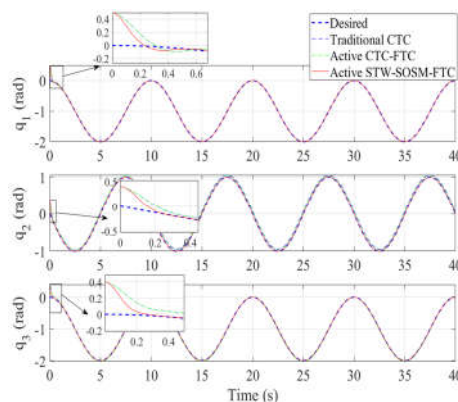
مقایسه نتایج شبیه‌سازی ردیابی و ورودی‌های کنترلی برای کنترل‌کننده‌های طراحی شده در پژوهش حاضر که عبارتند از کنترل‌کننده منفعل مبتنی بر مد لغزشی کلاسیک، کنترل‌کننده منفعل مبتنی بر مد لغزشی مرتبه دوم فرایچس و کنترل‌کننده فعال مبتنی بر مد لغزشی مرتبه دوم فرایچس به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان

قرار خواهد گرفت. ضرایب کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب فعال مبتنی بر الگوریتم فرایچس که در معادله (۳۴) با عبارت‌های  $k_1, k_2$  نشان داده شده است به صورت  $k_1 = 2.5$  و  $k_2 = 60$  و برای کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب منفعل مبتنی بر فرایچس به صورت  $c_1 = 18$  و  $c_2 = 60$  انتخاب شده است. حد بالای عدم قطعیت‌ها و عیوب محرکه‌های سیستم به صورت  $\bar{C} = \bar{\Delta} + \bar{\Phi} = 16$  و ضریب سطح لغزش کنترل‌کننده تحمل‌پذیر عیب منفعل با مد لغزشی مرتبه اول در معادله (۲۷) به صورت  $\rho_{diff} = 18$  انتخاب شده است. لازم به ذکر است انتخاب مقدار عددی پارامترها به صورت فرایچس و خطا انجام شده است. در صورتی که ضرایب رویکرد به صورت  $\alpha_0 = 1.1L, \alpha_1 = 1.9L^{1/3}, \alpha_2 = 1.5L^{1/2}$  انتخاب شود که در آن  $L$  حد بالای عدم قطعیت‌ها و عیوب محرکه سیستم است و در پژوهش حاضر  $L = 15$  در نظر گرفته شده است، نتیجه عملکرد رویکرد در تخمین سرعت زاویه‌ای مفاصل در شکل ۴ نشان داده شده است [۲۵ و ۳۰].



شکل ۴- عملکرد رویکرد در تخمین سرعت‌های زاویه‌ای

فرض شده است عیب در محرکه در لحظه  $t = 10s$  رخ می‌دهد و در لحظات قبل عیبی در محرکه‌های سیستم وجود ندارد. نتایج شبیه‌سازی برای ردیابی و خطاهای ردیابی در کنترل‌کننده گشتاور محاسبه شده مرسوم، کنترل‌کننده گشتاور محاسبه شده با در نظر گرفتن رویکرد طراحی شده در پژوهش حاضر و روش کنترلی مد لغزشی مرتبه دوم مبتنی بر رویکرد در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است با توجه به شکل ۶ خطا به مقدار بسیار زیادی کمتر شده است [۱۹ و ۲۰ و ۲۳].



شکل ۵- نتایج ردیابی روش پیشنهادی و روش کنترل گشتاور محاسبه‌شده



$$L = 2k_2 \|s\| + \frac{1}{2}(k_1 \|s\|^{1/2} \text{sign}(s) - z_2)^2 + \frac{z_2^2}{2} \quad (۱.پ)$$

$$= \xi^T P \xi$$

که در آن  $P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} k_1^2 + 4k_2 & -k_1 \\ -k_1 & 2 \end{bmatrix}$  و  $\xi = [\|s\|^{1/2} \text{sign}(s), z_2]^T$  است. در ادامه مشتق تابع لیپانوف انتخاب شده با توجه به رابطه (۲.پ) محاسبه می‌گردد:

$$\dot{L} = -\frac{1}{\|s\|^{1/2}} (\xi^T C_1 \xi - \gamma C_2 \xi) \quad (۲.پ)$$

که در آن ماتریس های  $C_1, C_2$  به صورت زیر انتخاب شدند:

$$C_1 = \frac{k_1}{2} \begin{bmatrix} 2k_2 + k_1^2 & -k_1 \\ -k_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (۳.پ)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 2k_2 + \frac{k_1^2}{2} & -\frac{k_1}{2} \end{bmatrix}^T$$

با لحاظ کردن محدودیت در نظر گرفته شده برای تابع عدم قطعیت‌های سیستم  $\bar{\varphi}(t, x_1, x_2) \leq \bar{\epsilon}$  می‌توان مشتق تابع لیپانوف را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\dot{L} \leq -\frac{1}{\|s\|^{1/2}} \xi^T C_3 \xi \quad (۴.پ)$$

که در آن عبارت است از:

$$C_3 = \frac{k_1}{2} \begin{bmatrix} 2k_2 + k_1^2 - \left(\frac{4k_2}{k_1} + k_1\right) \bar{\epsilon} & -(k_1 + 2\bar{\epsilon}) \\ -(k_1 + 2\bar{\epsilon}) & 1 \end{bmatrix} \quad (۵.پ)$$

حال برای آن که مشتق تابع لیپانوف یک تابع منفی معین باشد بایستی شرط  $C_3 > 0$  برقرار باشد. در صورتی که شرط بیان شده در معادله (۳۵) برقرار باشد،  $C_3 > 0$  برقرار خواهد بود و در نتیجه مشتق تابع لیپانوف انتخاب شده یک تابع منفی معین بوده و با توجه به قضیه پایداری لیپانوف، سیستم کنترلی پیشنهادی پایدار خواهد بود. بنابراین در مجموع می‌توان گفت که شرط پایداری سیستم کنترلی پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم فراپیشی آن است که ضرایب به کار رفته در قانون کنترلی آن به صورت زیر انتخاب گردند:

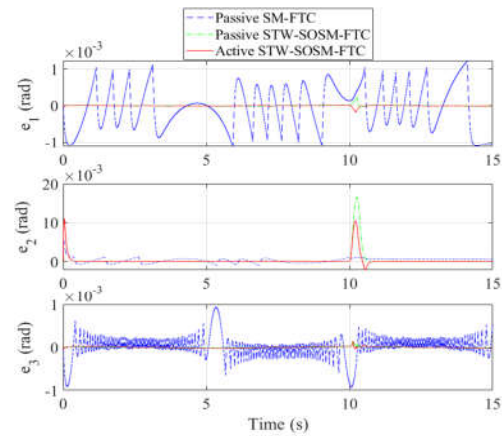
$$k_1 > 2\bar{\epsilon} \quad (۶.پ)$$

$$k_2 > k_1 \frac{5k_1 + 4\bar{\epsilon}}{(2k_1 - 4\bar{\epsilon})}$$

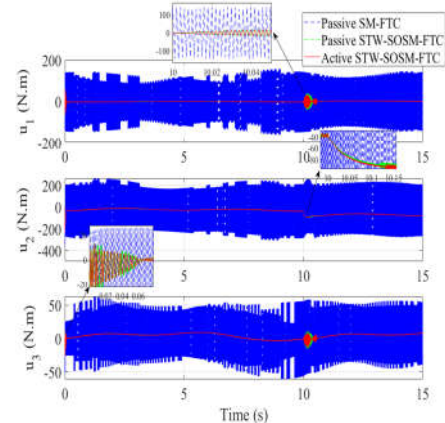
## ۵- مراجع

- [1] Fujie MG, Zhang B. State-of-the-art of intelligent minimally invasive surgical robots. *Frontiers of Medicine*. 2020 Aug;14:404-16.
- [2] Moglia A, Georgiou K, Georgiou E, Satava RM, Cuschieri A. A systematic review on artificial intelligence in robot-assisted surgery. *International Journal of Surgery*. 2021 Nov 1;95:106151.
- [3] Haidegger T, Speidel S, Stoyanov D, Satava RM. Robot-assisted minimally invasive surgery—Surgical robotics in the data age. *Proceedings of the IEEE*. 2022 Jun 23;110(7):835-46.
- [4] Kwok KW, Wurdemann H, Arezzo A, Menciassi A, Althoefer K. Soft robot-assisted minimally invasive surgery and interventions: Advances and outlook. *Proceedings of the IEEE*. 2022 May 2;110(7):871-92.
- [5] Han J, Davids J, Ashrafian H, Darzi A, Elson DS, Sodergren M. A systematic review of robotic surgery: From supervised paradigms to fully autonomous robotic approaches. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. 2022 Apr;18(2):e2358.
- [6] Hughes T, Rai B, Madaan S, Chedgy E, Somani B. The availability, cost, limitations, learning curve and future of robotic systems in urology and prostate cancer surgery. *Journal of Clinical Medicine*. 2023 Mar 15;12(6):2268.
- [7] Kawashima K, Kanno T, Tadano K. Robots in laparoscopic surgery: current and future status. *BMC Biomedical Engineering*. 2019 Dec;1(1):1-6.

داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است لرزش در سیگنال‌های کنترلی کنترل‌کننده منفعل مبتنی بر مد لغزشی مرتبه دوم فراپیشی نسبت به کنترل‌کننده منفعل مبتنی بر مد لغزشی کلاسیک کاهش چشمگیری داشته است و هم‌زمان دقت ردیابی نیز بهبود پیدا نموده است [۳۰ و ۳۱].



شکل ۸- ردیابی برای روش‌های کنترلی مبتنی بر مد لغزشی



شکل ۹- نتایج ورودی‌های کنترلی روش‌های مد لغزشی

## ۳- نتیجه‌گیری

استفاده از رویکردهای مد لغزشی مرتبه بالا در طراحی کنترل‌کننده برای ربات‌های جراحی علاوه بر دستیابی به دقت و سرعت عملکرد بالا، توانایی تخمین دقیق عدم قطعیت‌های سیستم، اغتشاشات خارجی وارد بر آن و همچنین شناسایی و تخمین آنلاین عیوب محرکه و کاهش قابل توجه پدیده لرزش را فراهم می‌سازد. روش‌های کنترلی مد لغزشی مرتبه بالا که در پژوهش حاضر از نوع مرتبه دوم و ترکیب آن با الگوریتم مد لغزشی فراپیشی در نظر گرفته شد؛ موجب دستیابی به دقت بالا و همگرایی سریع‌تر حالت‌های سیستم شده است.

## ۴- پیوست ۱: اثبات پایداری کنترل‌کننده

برای اثبات پایداری سیستم کنترلی پیشنهادی با در نظر گرفتن رابطه (۳۴) یک تابع لیپانوف به صورت رابطه (۱.پ) تعریف می‌شود:

- permanent magnet synchronous motor. *Energies*. 2021 Sep 23;14(19):6047.
- [27] Capisani LM, Ferrara A, De Loza AF, Fridman LM. Manipulator fault diagnosis via higher order sliding-mode observers. *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2012 Apr 3;59(10):3979-86.
- [28] Nagesh I, Edwards C. A multivariable super-twisting sliding mode approach. *Automatica*. 2014 Mar 1;50(3):984-8.
- [29] Shtessel Y, Edwards C, Fridman L, Levant A. *Sliding mode control and observation*. New York: Springer New York; 2014 Nov.
- [30] Chalanga A, Kamal S, Fridman L, Bandyopadhyay B, Moreno JA. How to implement Super-Twisting Controller based on sliding mode observer?. In 2014 13th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS) 2014 Jun 29 (pp. 1-6). IEEE.
- [31] Tripathi VK, Kamath AK, Behera L, Verma NK, Nahavandi S. Finite-time super twisting sliding mode controller based on higher-order sliding mode observer for real-time trajectory tracking of a quadrotor. *IET Control Theory & Applications*. 2020 Nov;14(16):2359-71.
- [32] Liu J, Wang X, Liu J, Wang X. *Advanced sliding mode control*. Springer Berlin Heidelberg; 2011.
- [33] Khalil HK. *Nonlinear Control: Adaptation and Learning*. Singapore: World Scientific; 2015.
- [34] Moreno JA, Osorio M. A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observers. In 2008 47th IEEE conference on decision and control 2008 Dec 9 (pp. 2856-2861). IEEE.
- [8] Matsuyama T, Kinugasa Y, Nakajima Y, Kojima K. Robotic-assisted surgery for rectal cancer: Current state and future perspective. *Annals of Gastroenterological Surgery*. 2018 Nov;2(6):406-12.
- [9] Zemmar A, Lozano AM, Nelson BJ. The rise of robots in surgical environments during COVID-19. *Nature Machine Intelligence*. 2020 Oct;2(10):566-72.
- [10] Qureshi MS, Swarnkar P, Gupta S. A supervisory on-line tuned fuzzy logic based sliding mode control for robotics: An application to surgical robots. *Robotics and Autonomous Systems*. 2018 Nov 1;109:68-85.
- [11] Hao S, Hu L, Liu PX. Sliding mode control for a surgical teleoperation system via a disturbance observer. *IEEE Access*. 2019 Mar 14;7:43383-93.
- [12] Song YE, Kim CY, Lee MC. Sliding mode control with sliding perturbation observer for surgical robots. In 2009 IEEE International
- [13] Sang H, Yang C, Liu F, Yun J, Jin G. A fuzzy neural network sliding mode controller for vibration suppression in robotically assisted minimally invasive surgery. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. 2016 Dec;12(4):670-9.
- [14] Shuizhong Z, Bo P, Yili F, Shuguo W, Shuxiang G. An adaptive fuzzy sliding mode control for minimally invasive surgical robot's remote center mechanisms. In 2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA) 2014 Jul 28 (pp. 102-107). IEEE.
- [15] Hamedani MH, Selvaggio M, Rahimkhani M, Ficuciello F, Sadeghian H, Zekri M, Sheikholeslam F. Robust dynamic surface control of da Vinci robot manipulator considering uncertainties: A fuzzy based approach. In 2019 7th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM) 2019 Nov 20 (pp. 418-423). IEEE.
- [16] Milecki A, Nowak P. Review of Fault-Tolerant Control Systems Used in Robotic Manipulators. *Applied Sciences*. 2023 Feb 19;13(4):2675.
- [17] Piltan F, Kim CH, Kim JM. Advanced adaptive fault diagnosis and tolerant control for robot manipulators. *Energies*. 2019 Apr 3;12(7):1281.
- [18] Abbaspour A, Mokhtari S, Sargolzaei A, Yen KK. A survey on active fault-tolerant control systems. *Electronics*. 2020 Sep 15;9(9):1513.
- [19] Riaz U, Tayyeb M, Amin AA. A review of sliding mode control with the perspective of utilization in fault tolerant control. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering)*. 2021 May 1;14(3):312-24.
- [20] Zenteno-Torres J, Cieslak J, Dávila J, Henry D. Sliding mode control with application to fault-tolerant control: assessment and open problems. *Automation*. 2021 Feb 4;2(1):1-30.
- [21] Armstrong B, Khatib O, Burdick J. The explicit dynamic model and inertial parameters of the PUMA 560 arm. In Proceedings. 1986 IEEE international conference on robotics and automation 1986 Apr 7 (Vol. 3, pp. 510-518). IEEE.
- [22] Leahy MB, Valavanis KP, Saridis GN. Evaluation of dynamic models for PUMA robot control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1989 Apr;5(2):242-5.
- [23] Hendel R, Khaber F, Essounbouli N. Adaptive high-order sliding mode controller-observer for MIMO uncertain nonlinear systems. *Asian Journal of Control*. 2020 Nov;22(6):2309-29.
- [24] Van M, Ge SS, Ren H. Finite time fault tolerant control for robot manipulators using time delay estimation and continuous nonsingular fast terminal sliding mode control. *IEEE transactions on cybernetics*. 2016 Apr 28;47(7):1681-93.
- [25] Van M, Kang HJ, Suh YS, Shin KS. Output feedback tracking control of uncertain robot manipulators via higher-order sliding-mode observer and fuzzy compensator. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2013 Aug;27:2487-96.
- [26] Zhao Y, Yu H, Wang S. An improved super-twisting high-order sliding mode observer for sensorless control of