



کنترل سیستم تله اپراتوری دو طرفه غیرخطی نامعین مبتنی بر روش تطبیقی فازی پسگام

رضا رحمانی^۱ و صالح مبین^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، مهندسی برق-کنترل، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۲ دانشیار، مهندسی برق-کنترل، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

چکیده

مهم‌ترین چالش در سیستم‌های تله‌اپراتوری دو طرفه، دست‌یابی به حس درست اپراتور از محیط و ضمانت پایداری سیستم است. تاکنون روش‌های متنوعی برای کنترل این سیستم‌ها ارائه شده است که در آن‌ها از شرایط انفعال برای نیروی‌های محیطی و اپراتور در اثبات پایداری تابع لیاپانوف استفاده شده است. این شرایط می‌توانند محدودیت‌های جدی به خصوص در حیطه کاربردهای پزشکی روی سیستم‌های تله‌اپراتوری تحمیل نمایند. وجود تأخیر زمانی متغیر با زمان در کانال ارتباطی راهبر-پیرو و همچنین عدم قطعیت (اغتشاش خارجی و دینامیک‌های مدل نشده) که در مواقعی موجب برهم زدن پایداری سیستم کنترلی می‌شوند، از جمله عوامل مهم و زمینه‌ساز برای جلب توجه محققان بوده است. هدف اصلی این مقاله، پیشنهاد یک کنترل‌کننده تطبیقی فازی پسگام از نوع مقاوم برای کنترل سیستم تله‌اپراتوری دو طرفه غیرخطی در حضور تأخیر زمانی و عدم قطعیت پارامتری است. تحلیل پایداری مبتنی بر لیاپانوف بوده و نتایج شبیه‌سازی، موفقیت روش پیشنهادی را در تحقق اهداف کنترلی نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: تله اپراتوری؛ رویکرد تطبیقی فازی؛ روش پسگام؛ تأخیر متغیر با زمان؛ عدم قطعیت.

Control of Uncertain Nonlinear Bilateral Teleoperation System Based on Backstepping Fuzzy Adaptive Approach

R. Rahmani¹, S. Mobayen^{2,*}

¹ M.Sc., Department of Electrical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

² Associate Professor, Department of Electrical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Abstract

The most important challenge in the bilateral teleoperation systems is to achieve the operator's true sense of the environment and guarantee the stability of the system. Until now, various approaches have been developed to design such systems in which the passivity condition for environmental forces and operators have been used to prove the stability of the Lyapunov function. These conditions can impose serious restrictions, especially in the field of medical applications on teleoperation systems. The existence of time-varying delay in the master-slave communication channel and also uncertainties (external disturbances and un-modeled dynamics), which sometimes may destabilize the control system, are important factors and underlie in attracting researchers attention. The main purpose of this paper is to propose a robust backstepping fuzzy adaptive controller for the control of uncertain nonlinear bilateral teleoperation system in the presence of time delay and parametric uncertainty. The stability analysis is based on Lyapunov and the simulation results demonstrate the success of the proposed method in achieving the control goals.

Keywords: Teleoperation; Fuzzy Adaptive Approach; Backstepping Method; Time-Varying Delay; Uncertainty.

۱- مقدمه

سیستم‌های تله‌اپراتوری، به دلیل کاربردهای مختلف آن‌ها در سیستم‌های کنترلی که عملی را بدون دخالت بشر از راه دور انجام می‌دهند و به ویژه نقش آن‌ها در انجام کارهای خطرناک و دشوار، امروزه در زندگی بشر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. برای آشنایی با کاربردهای مهم در زمینه سیستم‌های تله‌اپراتوری می‌توان به جراحی از راه دور، کاوش‌های فضایی، نیروگاه‌های اتمی، زیر دریایی‌ها و شبیه‌سازهای پزشکی اشاره کرد [۲،۱]. سیستم‌های تله‌اپراتوری دارای محدودیت‌هایی می‌باشند که یکی از شاخص‌ترین ویژگی آن‌ها، وجود تأخیر بوده که موجب ایجاد انگیزه برای تحقیقات فراوان در این زمینه‌ها شده است [۴،۳]. وجود تأخیر می‌تواند موجب ناپایداری این سیستم شود. هدف اصلی این کاوش‌ها، پیشنهاد کنترل‌کننده‌های مختلف بوده تا بتواند علی‌رغم ضمانت پایداری، موجب عملکرد مناسب این سیستم‌ها در برابر اغتشاشات، تأخیر و عوامل محیطی شود. دلیل این تأخیر، کانال ارتباطی بین راهبر^۱ و پیرو^۲ است که انتقال اطلاعات بین این دو عامل را به صورت تأخیردار ارسال می‌کند.

در سیستم‌های تله‌اپراتوری، اگر دستورات (که شامل نیرو یا حرکت می‌باشد) به صورت یک طرفه از راهبر به سمت پیرو انتقال داده شود، سیستم را یک‌طرفه یا یک‌جانبه^۳ می‌نامند و اگر واکنش نیروی محیطی از سمت پیرو به راهبر نیز منتقل شود، آنگاه سیستم عملیات از راه دور را دوطرفه یا متقارن^۴ می‌نامند [۵]. در کاربردهای تله‌اپراتوری، یکی از چالش‌های مهم چگونگی غلبه بر اختلالات نامعلوم در سیستم نامی است که در قالب دینامیک‌های مدل نشده و اغتشاش محیطی ظاهر می‌شوند. بدیهی است که با توجه به دینامیک‌های مدل نشده و با توجه به اغتشاشات خارجی متغیر با زمان، مدل کردن سیستم کاری بسیار سخت خواهد بود. عدم قطعیت‌ها می‌توانند تابع کنترلی مبتنی بر مدل بازخوردی را مختل کرده و موجب ناپایداری سیستم شوند.

روش‌های فازی و شبکه‌های عصبی ابزار قدرتمندی برای کنترل سیستم‌های رباتیکی ارائه داده‌اند که قادر هستند، سیستم‌های دارای عدم قطعیت ساختاریافته و بدون ساختار را پایدار نمایند [۷،۶]. در مرجع [۸]، یک کنترل‌کننده تطبیقی معرفی شده است که قادر به همزمان‌سازی حالت و سرعت در حضور نامعینی‌های دینامیکی بدون حضور تأخیر در کانال انتقال اطلاعات است. روش کنترل فازی در مرجع [۹] برای ضمانت پایداری سیستم‌های غیرخطی ارائه شده است؛ اما به هرحال این روش‌ها بیشتر به ربات‌های سیار پرداخته‌اند و به ندرت به سیستم‌های تله‌اپراتوری غیرخطی تأخیردار توجه داشته‌اند. شایان ذکر است که در برخی از تحقیقات به منظور دستیابی به عملکرد مناسب، سیستم‌های تله‌اپراتوری مبتنی بر تأخیر ثابت یا تأخیر معلوم ارائه شده‌اند [۱۰،۱۱]. بدیهی است که در عمل، تأخیر موجود در این سیستم‌ها به صورت متغیر است. در واقع، هدف اصلی سیستم‌های تله‌اپراتوری پایداری مقاوم و شفافیت^۵ (تأثیر مستقیم انسان بر محیط کاری) است [۱۲،۱۳]. به دلیل برخی مشکلات بنیادی در این سیستم‌ها، دستیابی به این مهم، کار بسیاری پیچیده‌ای است که یکی از دلایل آن وجود تأخیر در کانال ارتباطی بین راهبر و پیرو است. این عامل حتی ممکن است، موجب ناپایداری سیستم کنترلی نیز شوند [۱۴].

یکی از روش‌های دیگر برای مقابله با تأخیر در این نوع از سیستم‌ها، استفاده از پیکره‌بندی تخمین‌گر اسمیت^۶ است [۱۵]. در مقاله [۱۶] با حذف تأخیر از مشخصه‌های معادلات توسط تخمین‌گر اسمیت، سیستم پایدار شده است. به هرحال مدل دقیق در این سیستم‌ها به خصوص برای مدل غیرخطی غیرقابل دسترس است؛ اما این نوع مدل‌سازی به دلیل ماهیت غیرخطی بودن این سیستم‌ها از اطمینان بالایی برخوردار نخواهد بود. در مرجع [۱۷]، سیستم به صورت غیرخطی و با تأخیر متغیر است که در آن با استفاده از شرط انفعال و تابع لیاپانوف - کراسوفسکی^۷ به بررسی پایداری سیستم پرداخته شده است و تلاش می‌شود، یک کران برای تأخیر زمانی به

5- Transparency
6- Smith Predictor Configuration
7- Lyapunov-Krasovskii

1- Master
2- Slave
3- Unilateral
4- Bilateral

پایه روش پسگام طراحی شده و به منظور تقریب جملات نامعلوم از تقریب‌گر فازی استفاده می‌گردد. مزیت دیگر تقریب‌گر فازی، استفاده از آن به جای حسگر اندازه‌گیری نیرو است که موجب کاهش هزینه، کالیبراسیون و یا تست خرابی حسگرها می‌شود. از ویژگی‌های برجسته روش پیشنهادی، می‌توان به سادگی در طراحی و کاهش حجم محاسباتی در قانون کنترل اشاره کرد؛ همچنین در این روش، خطای تقریب فازی و عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری، جبران شده است.

ساختار مقاله حاضر از بخش‌های زیر تشکیل شده است: در بخش دوم، فرضیات و لم‌های مورد نظر ارائه می‌شوند. طرح کنترل پیشنهادی و تحلیل پایداری آن در بخش سوم مقاله بیان می‌شود. نهایتاً، نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری در بخش‌های چهارم و پنجم ارائه شده‌اند.

۲- مفاهیم و مقدمات طراحی

به منظور طراحی سیستم کنترل مورد نظر، موارد زیر در نظر گرفته می‌شود:

خاصیت ۱ [۲۹]: ماتریس‌های اینرسی جرم M_s و M_m متقارن، مثبت معین و محدود می‌باشند.

خاصیت ۲ [۳۰]: عبارت‌های $\dot{Z}_m(\dot{M}_m - 2C_m)\dot{Z}_m = 0$ و $\dot{Z}_s(\dot{M}_s - 2C_s)\dot{Z}_s = 0$ بیانگر خاصیت پادمتقارنی ($\dot{M}_i - 2C_i = 0$) ربات‌های راهبر و پیرو می‌باشند.

لم ۱ [۳۱]: برای هر تابع پیوسته $f(x)$ یک سیستم فازی به صورت $\theta^T \zeta(x)$ وجود دارد که رابطه $\sup_{x \in \Omega} |f(x) - \theta^T \zeta(x)| \leq w, \forall w > 0$ برقرار می‌نماید.

تذکره ۱: مکانیزم طراحی بر پایه‌ی روش پسگام است؛ بدین صورت که با در نظر گرفتن دو زیرسیستم برای مدل تله اپراتوری، در گام اول ورودی‌های مجازی α_s و α_m پیشنهاد می‌شوند و سپس در گام دوم قانون کنترل نهایی τ_s و τ_m مبتنی بر تئوری لیاپانوف حاصل می‌شوند. با توجه به مدل سیستم تله اپراتوری که از مرتبه دو است، دو زیرسیستم را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$\dot{x}_1 = x_2$
 $\dot{x}_2 = M_i^{-1}(-C_i x_2 - g_i + \tau_i + D_i + \tau_{ext})$
 که $x_2 = \dot{q}_i$ و $x_1 = q_i$ ($i = m, s$) است. با توجه به فرم فضای حالت فوق، کنترل پسگام در دو مرحله طراحی

دست آید؛ اما یکی از ضعف‌های این روش، استفاده از شرط انفعال است که یک نوع محدودیت برای سیستم محسوب می‌شود که این نیز در مرجع [۱۸] مرتفع شده است؛ اما در این دو مرجع به بحث عدم قطعیت در مدل پرداخته نشده است.

به دلیل ماهیت ارسال اطلاعات در فواصل طولانی، تأخیر زمانی موجود در کانال ارتباطی غیرقابل چشم‌پوشی است [۱۹]. همزمان‌سازی راهبر-پیرو [۲۰] و تحلیل پایداری سیستم‌های تله‌اپراتوری با انواع مختلف تأخیرهای زمانی، مانند تأخیر ثابت [۸]، تأخیرهای متغیر با زمان [۲۲، ۲۱]، یا تأخیرهای تصادفی [۲۳] مباحث جذاب در زمینه سیستم‌های تله‌اپراتوری محسوب می‌شوند. در مقاله [۲۴] یک جبران‌ساز تأخیر برای سیستم‌های تله‌اپراتوری در حضور نیروی بازخوردی در چهارچوب کنترل فضای کار پیشنهاد شده است. از آنجایی که اندازه‌گیری دقیق پارامترهای سینماتیکی و دینامیکی امری بسیار دشوار است، چندین الگوریتم کنترلی برای مقابله با این دو موضوع پیشنهاد شده است. با ترکیب کنترل تطبیقی و مقاوم، سیستم از مزایای هر دو نوع کنترل-کننده برخوردار خواهد بود. اگر دینامیک‌های غیرساختاری در اختیار باشند، کنترل مقاوم تطبیقی برای ردگیری موقعیت ربات سودمند است. به هر حال، روش کنترلی دارای حجم محاسباتی بالایی خواهد بود [۲۵]. یکی دیگر از روش‌های کنترل غیرخطی، روش کنترل پسگام است. در روش کنترل پسگام، بر خلاف کنترل مد لغزشی، لازم نیست که معادلات به فرم همراه باشند [۲۶]؛ بنابراین، کنترل ربات در حضور نیروی محیطی همچنان به عنوان یک چالش مطرح است.

بسیاری از طرح‌های پیشین کنترل ربات راهبر و پیرو مبتنی بر راهبرد کنترل فازی تطبیقی سیستم‌های تله اپراتوری هستند [۲۷]. به علت پیچیدگی معادلات دینامیکی سیستم تله اپراتوری، راهبرد کنترل ربات راهبر و پیرو پیچیده است. به علاوه استفاده از شرایط پسیویتی [۲۸] در اثبات پایداری کنترل‌کننده، باعث ایجاد محدودیت‌هایی می‌شود.

این مقاله، با توجه به شناخت چالش‌های موجود و بررسی تحقیقات انجام شده به طراحی کنترل‌کننده تطبیقی فازی روی سیستم تله‌اپراتوری غیرخطی نامعین در حضور تأخیر متغیر با زمان می‌پردازد. طرح جدید فازی تطبیقی بر

$$\begin{aligned} Z_{m1} &= q_m - q_s(t - T_s(t)) \\ Z_{s1} &= q_s - q_m(t - T_m(t)) \end{aligned} \quad (۲)$$

$$\begin{aligned} Z_{m2} &= \dot{q}_m - \alpha_{m1} \\ Z_{s2} &= \dot{q}_s - \alpha_{s1} \end{aligned} \quad (۳)$$

به طوری که α_{s1} و α_{m1} ورودی‌های مجازی هستند. تابع لیاپانوف گام اول به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_1 = \frac{1}{2} Z_{m1}^T Z_{m1} + \frac{1}{2} Z_{s1}^T Z_{s1} \quad (۴)$$

مشتق V_1 به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= Z_{m1}^T \dot{Z}_{m1} + Z_{s1}^T \dot{Z}_{s1} \\ &= Z_{m1}^T \left(\dot{q}_m - (1 - \dot{T}_s(t)) \dot{q}_s(t - T_s(t)) \right) \\ &\quad + Z_{s1}^T \left(\dot{q}_s - (1 - \dot{T}_m(t)) \dot{q}_m(t - T_m(t)) \right) \end{aligned} \quad (۵)$$

شایان ذکر است که در کانال ارتباطی، جمله تأخیر و مشتق آن کران‌دار می‌باشند؛ یعنی $T_m(t) \leq d_1$ ، $T_s(t) \leq d_2$ ، $\dot{T}_m(t) \leq \mu_1 \leq 1$ و $\dot{T}_s(t) \leq \mu_2 \leq 1$ می‌باشند؛ به طوری که d_1 و d_2 مقادیر اسکالر مثبت هستند. حال با جایگذاری مشتق روابط (۳) در (۵) داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= Z_{m1}^T \left(Z_{m2} + \alpha_{m1} - (1 - \dot{T}_s(t)) \dot{q}_s(t - T_s(t)) \right) \\ &\quad + Z_{s1}^T \left(Z_{s2} + \alpha_{s1} - (1 - \dot{T}_m(t)) \dot{q}_m(t - T_m(t)) \right) \end{aligned} \quad (۶)$$

به طوری که ورودی‌های مجازی با استفاده از الگوریتم پسگام به صورت زیر پیشنهاد می‌شوند:

$$\begin{aligned} \alpha_{m1} &= -K_{m1} Z_{m1} + (1 - \dot{T}_s(t)) \dot{q}_s(t - T_s(t)) \\ \alpha_{s1} &= -K_{s1} Z_{s1} + (1 - \dot{T}_m(t)) \dot{q}_m(t - T_m(t)) \end{aligned} \quad (۷)$$

که K_{s1} و K_{m1} مقادیر ثابت مثبت هستند. آنگاه با جایگذاری معادلات (۷) در (۶) نتیجه زیر حاصل خواهد شد:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= -Z_{m1}^T K_{m1} Z_{m1} - Z_{s1}^T K_{s1} Z_{s1} \\ &\quad + Z_{m1}^T Z_{m2} + Z_{s1}^T Z_{s2} \end{aligned} \quad (۸)$$

از طرفی طبق معادله (۴) داریم:

$$\begin{aligned} \dot{q}_m &= M_m^{-1}(q_m) (-C_m(q_m, \dot{q}_m) \dot{q}_m - g_m(q_m) \\ &\quad + \tau_m + D_m + \tau_h) \\ \dot{q}_s &= M_s^{-1}(q_s) (-C_s(q_s, \dot{q}_s) \dot{q}_s - g_s(q_s) + \tau_s \\ &\quad + D_s + \tau_e) \end{aligned} \quad (۹)$$

می‌شود که مستلزم پیشنهاد تابع لیاپانوف اولیه (مرحله اول) و تابع لیاپانوف نهایی (مرحله دوم) است.

تذکر ۲: به منظور تقریب جملات نامعلوم، از تقریب‌گر فازی استفاده می‌شود که ساختار آن بر پایه فازی‌ساز منفرد، موتور استنتاج ضرب ممدانی و غیرفازی‌ساز میانگین مراکز است.

تذکر ۳: در این مقاله، به منظور غلبه بر اغتشاشات خارجی و خطای تقریب فازی از جمله مقاوم‌ساز استفاده می‌شود که یکی از نقاط قوت کار در حوزه کنترل سیستم‌های تله اپراتوری محسوب می‌شود.

۳- طرح کنترلی پیشنهادی

در این روش، گشتاور حاصل از محیط توسط کنترل تطبیقی فازی تخمین زده می‌شود. البته اگر حسگر اندازه‌گیری نیرو دقیق باشد، می‌توان بدون استفاده از تخمین فازی از حسگر برای به دست آوردن گشتاور محیط استفاده نمود؛ اما به طور کلی حذف حسگر نه تنها موجب کاهش هزینه‌ها بلکه راهی برای آزمون خرابی حسگرهای اندازه‌گیری نیروی محیطی است؛ همچنین، در این روش کران تمام نامعینی‌ها توسط قانون تطبیق تخمین زده می‌شود.

مدل سیستم تله‌اپراتوری به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} M_m(q_m) \ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m) \dot{q}_m + g_m(q_m) \\ = \tau_m + D_m + \tau_h \\ M_s(q_s) \ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s) \dot{q}_s + g_s(q_s) \\ = \tau_s + D_s - \tau_e \end{aligned} \quad (۱)$$

به طوری که اندیس‌های m و s به ترتیب بیانگر ربات راهبر و پیرو، q_m و q_s بردارهای موقعیت مفاصل، \dot{q}_m و \dot{q}_s بردارهای سرعت مفاصل، $M_m(q_m)$ و $M_s(q_s)$ ماتریس‌های اینرسی مثبت معین، $C_m(q_m, \dot{q}_m)$ و $C_s(q_s, \dot{q}_s)$ گشتاورهای کورولوس، $g_m(q_m)$ و $g_s(q_s)$ گشتاورهای گرانشی، τ_e و τ_h گشتاور انسان و محیط، و τ_m و τ_s سیگنال‌های کنترل از جنس گشتاور می‌باشند. به علاوه اینکه D_m و D_s مجموع عدم قطعیت مربوط به اغتشاش خارجی و دینامیک مدل نشده می‌باشند. با توجه به مرتبه مدل سیستم تله اپراتوری فوق، دو زیرسیستم به صورت زیر برای دینامیک‌های خطا می‌توان در نظر گرفت:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -Z_{m1}^T K_{m1} Z_{m1} - Z_{s1}^T K_{s1} Z_{s1} \\ & + Z_{m1}^T Z_{m2} + Z_{s1}^T Z_{s2} \\ & + Z_{m2}^T (-C_m(q_m, \dot{q}_m) \dot{q}_m - g_m(q_m) + \tau_m \\ & + D_m + \tau_h - M_m \dot{\alpha}_{m1}) + Z_{s2}^T (-C_s(q_s, \dot{q}_s) \dot{q}_s \\ & - g_s(q_s) + \tau_s + D_s + \tau_e - M_s \dot{\alpha}_{s1}) \\ & + Z_{m2}^T C_m Z_{m2} + Z_{s2}^T C_s Z_{s2} + \tilde{\theta}_m^T \Gamma_m^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_m \\ & + \tilde{\theta}_s^T \Gamma_s^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_s + \tilde{\theta}_e^T \Gamma_e^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_e + \tilde{\delta}_m^T \mu_m^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_m \\ & + \tilde{\delta}_s^T \mu_s^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_s \end{aligned} \quad (۱۵)$$

از طرفی رابطه (۱۵) به صورت زیر قابل بیان است:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -Z_{m1}^T K_{m1} Z_{m1} - Z_{s1}^T K_{s1} Z_{s1} + Z_{m1}^T Z_{m2} \\ & + Z_{s1}^T Z_{s2} + Z_{m2}^T (-C_m \dot{q}_m + C_m Z_{m2} - g_m(q_m) \\ & + \tau_m + D_m + \tau_h - M_m \dot{\alpha}_{m1}) + Z_{s2}^T (-C_s \dot{q}_s \\ & + C_s Z_{s2} - g_s(q_s) + \tau_s + D_s + \tau_e - M_s \dot{\alpha}_{s1}) \\ & + \tilde{\theta}_m^T \Gamma_m^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_m + \tilde{\theta}_s^T \Gamma_s^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_s + \tilde{\theta}_e^T \Gamma_e^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_e \\ & + \tilde{\delta}_m^T \mu_m^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_m + \tilde{\delta}_s^T \mu_s^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_s \end{aligned} \quad (۱۶)$$

با توجه به رابطه (۳)، رابطه $-C_i \dot{q}_i + C_i Z_{i2} = -C_i \alpha_{i1}$ را به صورت $\phi_m = \theta_m^T \zeta_m$ و $\phi_s = \theta_s^T \zeta_s$ در نظر گرفته می‌شوند که سیستم‌های فازی عهده‌دار تقریب آن‌ها می‌باشند:

$$\begin{aligned} -C_m \alpha_{m1} - g_m - M_m \dot{\alpha}_{m1} = \phi_m = \theta_m^T \zeta_m \\ -C_s \alpha_{s1} - g_s - M_s \dot{\alpha}_{s1} = \phi_s = \theta_s^T \zeta_s \end{aligned} \quad (۱۷)$$

چنانچه سیگنال‌های کنترل به صورت زیر پیشنهاد شوند:

$$\begin{aligned} \tau_m = & -K_{m2} Z_{m2} - Z_{m1} - \tau_h - \hat{\phi}_m - u_{rm} \\ \tau_s = & -K_{s2} Z_{s2} - Z_{s1} - \hat{\tau}_e - \hat{\phi}_s - u_{rs} \end{aligned} \quad (۱۸)$$

به طوری که جملات u_{ri} مقاوم‌ساز سیگنال‌های کنترل راهبر و پیرو هستند، آنگاه با جایگذاری روابط (۱۷) و (۱۸) در رابطه (۱۶) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -Z_{m1}^T K_{m1} Z_{m1} - Z_{s1}^T K_{s1} Z_{s1} - Z_{m2}^T K_{m2} Z_{m2} \\ & - Z_{s2}^T K_{s2} Z_{s2} + Z_{m2}^T (\phi_m - \hat{\phi}_m) \\ & + Z_{m2}^T (D_m - u_{rm}) + Z_{s2}^T (\phi_s - \hat{\phi}_s) \\ & + Z_{s2}^T (D_s - u_{rs}) + Z_{s2}^T (\tau_e - \hat{\tau}_e) \\ & + \tilde{\theta}_m^T \Gamma_m^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_m + \tilde{\theta}_s^T \Gamma_s^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_s \\ & + \tilde{\theta}_e^T \Gamma_e^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_e + \tilde{\delta}_m^T \mu_m^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_m + \tilde{\delta}_s^T \mu_s^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_s \end{aligned} \quad (۱۹)$$

مشتق دینامیک‌های خطا در گام دوم طراحی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{m2} = & \ddot{q}_m - \dot{\alpha}_{m1} = M_m^{-1}(q_m) (-C_m(q_m, \dot{q}_m) \dot{q}_m \\ & - g_m(q_m) + \tau_m + D_m + \tau_h) - \dot{\alpha}_{m1} \end{aligned} \quad (۱۰)$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{s2} = & \ddot{q}_s - \dot{\alpha}_{s1} = M_s^{-1}(q_s) (-C_s(q_s, \dot{q}_s) \dot{q}_s \\ & - g_s(q_s) + \tau_s + D_s + \tau_e) - \dot{\alpha}_{s1} \end{aligned} \quad (۱۱)$$

تابع لیاپانوف نهایی سیستم به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\begin{aligned} V_2 = & V_1 + \frac{1}{2} Z_{m2}^T M_m Z_{m2} \\ & + \frac{1}{2} Z_{s2}^T M_s Z_{s2} + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_m^T \Gamma_m^{-1} \tilde{\theta}_m \\ & + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_s^T \Gamma_s^{-1} \tilde{\theta}_s + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_e^T \Gamma_e^{-1} \tilde{\theta}_e \\ & + \frac{1}{2} \tilde{\delta}_m^T \mu_m^{-1} \tilde{\delta}_m + \frac{1}{2} \tilde{\delta}_s^T \mu_s^{-1} \tilde{\delta}_s \end{aligned} \quad (۱۲)$$

که $\mu_s, \mu_m, \Gamma_e, \Gamma_s, \Gamma_m$ پارامترهای تنظیم هستند؛ همچنین داریم:

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_i = & \theta_i^* - \hat{\theta}_i, (i = m, s) \\ \tilde{\delta}_i = & \delta_i^* - \hat{\delta}_i \\ \tilde{\theta}_e = & \theta_e^* - \hat{\theta}_e \end{aligned} \quad (۱۳)$$

به طوری که $\tilde{\theta}_i, \tilde{\theta}_e, \tilde{\delta}_i$ به ترتیب خطای تخمین پارامتر راهبر، پیرو، محیط و کران نامعینی است. در نهایت مشتق تابع لیاپانوف نهایی سیستم به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -Z_{m1}^T K_{m1} Z_{m1} - Z_{s1}^T K_{s1} Z_{s1} \\ & + Z_{m1}^T Z_{m2} + Z_{s1}^T Z_{s2} + Z_{m2}^T M_m \dot{Z}_{m2} \\ & + Z_{s2}^T M_s \dot{Z}_{s2} + \frac{1}{2} Z_{m2}^T \dot{M}_m Z_{m2} \\ & + \frac{1}{2} Z_{s2}^T \dot{M}_s Z_{s2} + \tilde{\theta}_m^T \Gamma_m^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_m \\ & + \tilde{\theta}_s^T \Gamma_s^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_s + \tilde{\theta}_e^T \Gamma_e^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_e + \tilde{\delta}_m^T \mu_m^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_m \\ & + \tilde{\delta}_s^T \mu_s^{-1} \dot{\tilde{\delta}}_s \end{aligned} \quad (۱۴)$$

با توجه به خاصیت پادمتقارن بودن ربات $(\dot{M} - 2C = 0)$ و جایگذاری روابط (۱۰) و (۱۱)، می‌توان رابطه فوق را به صورت زیر بازنویسی کرد:

در نتیجه خطای ردیابی ربات راهبر- پیرو به صورت مجانبی به صفر همگرا شده و پایداری سیستم کنترلی تضمین می‌شود. لازم به ذکر است که روش پیشنهادی از شرط انفعال برای اثبات پایداری استفاده نمی‌کند و همچنین یک روش قدرتمند در سیستم‌های تله‌اپراتوری غیر خطی به شمار می‌رود. دیاگرام بلوکی روش کنترلی پیشنهادی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی از دو ربات دارای دو لینک با مفاصل دورانی در طرف‌های راهبر و پیرو استفاده می‌شود که در رابطه (۱) مدل شده است [۳۲]. ماتریس‌های C_i, M_i و g_i ربات‌ها به فرم زیر می‌باشند ($i = m, s$):

$$M_{i(q_i)} = \begin{bmatrix} M_{i11(q_i)} & M_{i12(q_i)} \\ M_{i21(q_i)} & M_{i22(q_i)} \end{bmatrix}$$

$$C_{i(q_i, \dot{q}_i)} = \begin{bmatrix} C_{i11(q_i, \dot{q}_i)} & C_{i12(q_i, \dot{q}_i)} \\ C_{i21(q_i, \dot{q}_i)} & C_{i22(q_i, \dot{q}_i)} \end{bmatrix}$$

$$g_i = \begin{bmatrix} g_{i1} \\ g_{i2} \end{bmatrix} \quad (27)$$

که در آن:

$$M_{i11(q_i)} = l_{i2}^2 m_{i12} + l_{i1}^2 M_i + 2l_{i1} l_{i2} m_{i2} c_{i2},$$

$$M_{i22(q_i)} = l_{i2}^2 m_{i12},$$

$$M_{i12(q_i)} = M_{i21(q_i)} = l_{i2}^2 m_{i2} + l_{i1} l_{i2} m_{i2} c_{i2},$$

$$C_{i11(q_i, \dot{q}_i)} = -l_{i1} l_{i2} m_{i2} s_{i2} \dot{q}_{i2},$$

$$C_{i12(q_i, \dot{q}_i)} = -l_{i1} l_{i2} m_{i2} s_{i2} (\dot{q}_{i1} + \dot{q}_{i2}),$$

$$C_{i21(q_i, \dot{q}_i)} = l_{i1} l_{i2} m_{i2} s_{i2} \dot{q}_{i1}, C_{i22(q_i, \dot{q}_i)} = 0,$$

$$g_{i1}(q_i) = g_{l_{i2}} m_{i2} c_{i12} + l_{i1} M_i c_{i1},$$

$$g_{i2}(q_i) = g_{l_{i2}} m_{i2} c_{i12}.$$

عبارت‌های m_{ik} و l_{ik} به ترتیب جرم و طول لینک k ام ربات $k \in \{1, 2\}$ است. جمله $M_i = m_{i1} + m_{i2}$ مجموع جرم لینک‌های ربات بوده و c_{i1}, c_{i2}, s_{i2} به ترتیب علامت‌های اختصاری $\cos(q_{i1}), \cos(q_{i2}), \cos(q_{i1})$ و $\sin(q_{i2})$ است. شتاب گرانشی اولیه داده شده به کنترل-کننده‌ها نیز برای هر دو طرف راهبر و پیرو برابر $g_i = 9.81$ در نظر گرفته شده است. پارامترهای ربات، کنترل‌کننده و تأخیر زمانی در جدول ۱ ارائه شده است.

اگر خطای تقریب فازی را به صورت زیر در نظر بگیریم:

$$\omega_i = \phi_i - \hat{\phi}_i(X|\theta_i^*) \quad (20)$$

می‌توان عبارت زیر را نتیجه‌گیری کرد:

$$\phi_j - \hat{\phi}_j = \hat{\phi}_j(X|\theta_j^*) - \hat{\phi}_j + \omega_j$$

$$= \tilde{\theta}_j^T \zeta_j + \omega_j, (j = m, s, e) \quad (21)$$

آنگاه رابطه (۱۹) در قالب زیر قابل بازنویسی می‌شود:

$$\dot{V}_2 = -Z_{m1}^T K_{m1} Z_{m1} - Z_{s1}^T K_{s1} Z_{s1}$$

$$- Z_{m2}^T K_{m2} Z_{m2} - Z_{s2}^T K_{s2} Z_{s2}$$

$$+ Z_{m2}^T \tilde{\theta}_m^T \zeta_m + Z_{m2}^T (\omega_m + D_m - u_{rm})$$

$$+ Z_{s2}^T \tilde{\theta}_s^T \zeta_s + Z_{s2}^T (\omega_s + \omega_e + D_s - u_{rs})$$

$$+ Z_{s2}^T \tilde{\theta}_e^T \zeta_e + \tilde{\theta}_m^T \Gamma_m^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_m + \tilde{\theta}_s^T \Gamma_s^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_s$$

$$+ \tilde{\theta}_e^T \Gamma_e^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_e + \delta_m^T \mu_m^{-1} \dot{\delta}_m + \delta_s^T \mu_s^{-1} \dot{\delta}_s \quad (22)$$

شایان ذکر است که کران نامعینی‌ها به صورت $|\omega_s + \omega_e + D_s|_{max} = \delta_s^*$ و $|\omega_m + D_m|_{max} = \delta_m^*$ در نظر گرفته می‌شوند. چنانچه قوانین تطبیق به صورت زیر پیشنهاد شوند:

$$\dot{\tilde{\theta}}_m = \Gamma_m Z_{m2}^T \zeta_m$$

$$\dot{\tilde{\theta}}_s = \Gamma_s Z_{s2}^T \zeta_s$$

$$\dot{\tilde{\theta}}_e = \Gamma_e Z_{s2}^T \zeta_e \quad (23)$$

که ورودی‌های رگر سورهای فازی محیط به صورت $\zeta_e \propto (Z_{s1}, Z_{s2}, Z_{m1}, Z_{m2})$ منظور شده است؛ لذا با جایگذاری قوانین (۲۳) در رابطه (۲۲) و با در نظر گرفتن کران نامعینی خواهیم داشت:

$$\dot{V}_2 \leq -Z_{m1}^T K_{m1} Z_{m1} - Z_{s1}^T K_{s1} Z_{s1} - Z_{m2}^T K_{m2} Z_{m2}$$

$$- Z_{s2}^T K_{s2} Z_{s2} + Z_{m2}^T \dot{\tilde{\theta}}_m + Z_{m2}^T \delta_m - Z_{m2}^T u_{rm}$$

$$+ Z_{s2}^T \delta_s + Z_{s2}^T \delta_s - Z_{s2}^T u_{rs} + \delta_m^T \mu_m^{-1} \dot{\delta}_m$$

$$+ \delta_s^T \mu_s^{-1} \dot{\delta}_s \quad (24)$$

همچنین اگر جملات مقاوم‌ساز به صورت زیر پیشنهاد شوند:

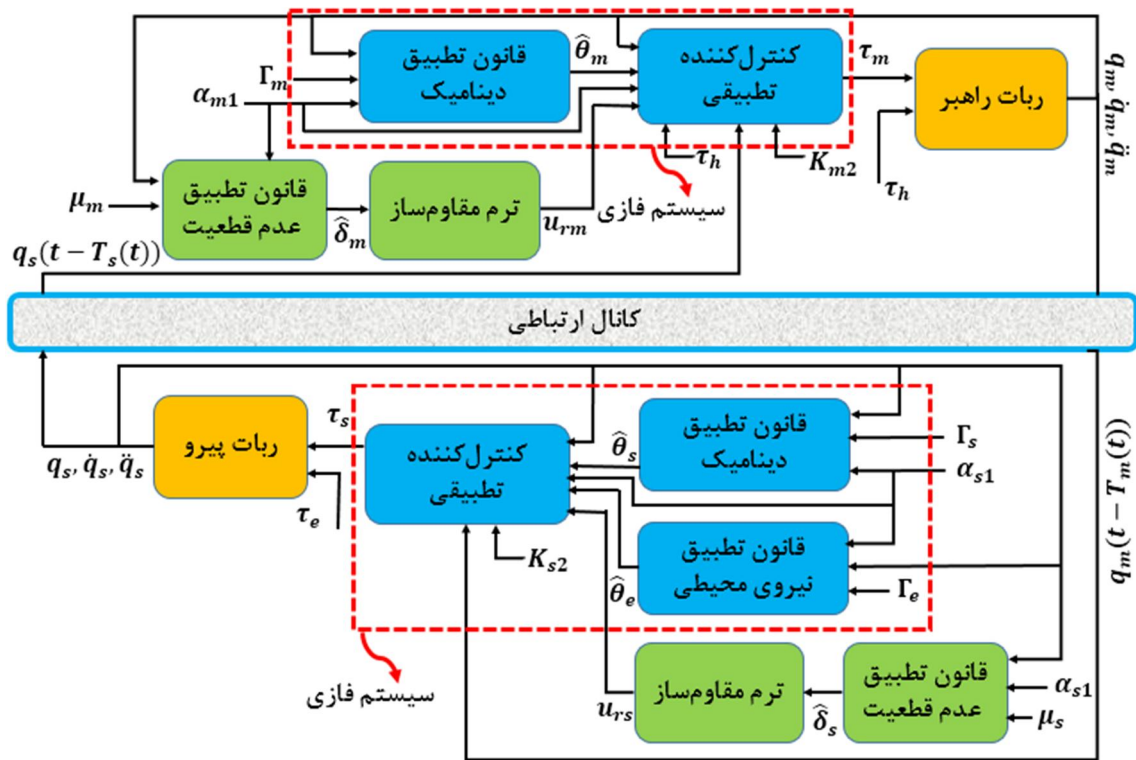
$$\dot{\delta}_m = \mu_m Z_{m2} \rightarrow u_{rm} = \delta_m \|Z_{m2}\|$$

$$\dot{\delta}_s = \mu_s Z_{s2} \rightarrow u_{rs} = \delta_s \|Z_{s2}\| \quad (25)$$

آنگاه خواهیم داشت:

$$\dot{V}_2 \leq -Z_{m1}^T K_{m1} Z_{m1} - Z_{s1}^T K_{s1} Z_{s1}$$

$$- Z_{m2}^T K_{m2} Z_{m2} - Z_{s2}^T K_{s2} Z_{s2} \leq 0 \quad (26)$$



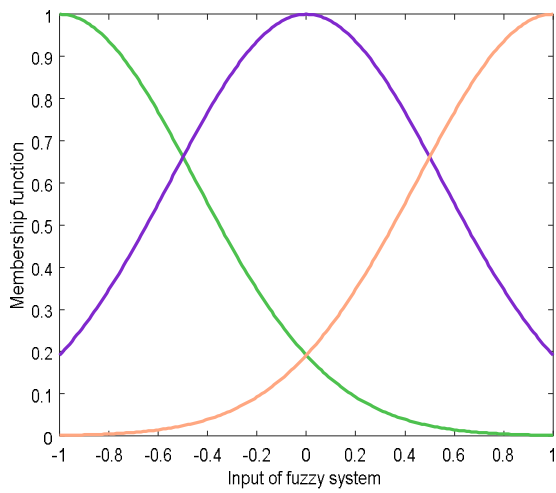
شکل ۱- بلوک دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی

کنترل کننده پیشنهادی تحت نیروی انسانی نشان داده شده در شکل ۲ در نظر گرفته شده است که در راستای محور عمودی γ به ربات راهبر اعمال می‌شود؛ اما به دلیل استفاده از روابط گشتاور در معادلات سیستم، می‌بایست نیروی انسان تبدیل به گشتاور شود. بدین منظور از رابطه $\tau_h = J_m^T \times [0 \ 1] \times F_h$ استفاده می‌شود. توجه داشته باشید که هر یک از ورودی‌های فازی استفاده شده در این شبیه‌سازی تحت توابع تعلق نشان داده شده توسط سیستم فازی ممدانی شکل ۳ انجام وظیفه می‌کنند؛ همچنین در این بخش، نیرویی معادل ۱۵ نیوتون در راستای محور عمودی γ از طرف محیط به ربات پیرو اعمال می‌شود که گشتاوری برابر $\tau_e = J_s^T \times 15 \times [0 \ 1]$ به ربات پیرو تحمیل خواهد نمود.

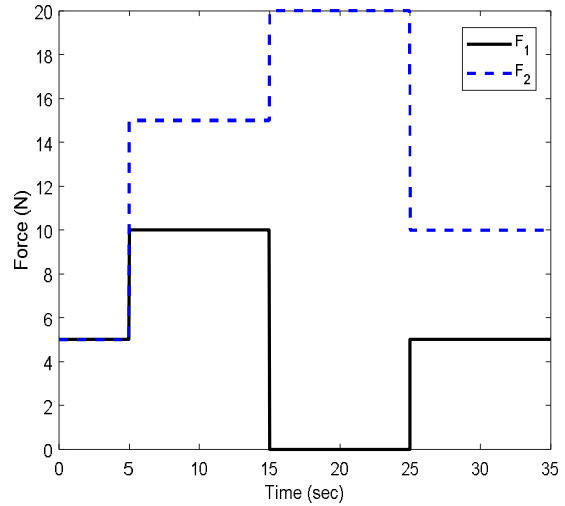
عملکرد کنترل کننده پیشنهادی تحت نیروی مذکور در شکل‌های ۴ تا ۷ نمایش داده شده است. در این بخش، نتایج شبیه‌سازی کنترلی پیشنهادی فازی مبتنی بر روش پسگام برای سیستم تله اپراتوری دو طرفه غیرخطی ارائه شده است و مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی و روش مرجع [۲۶] صورت

جدول ۱- پارامترهای سیستم تله اپراتوری

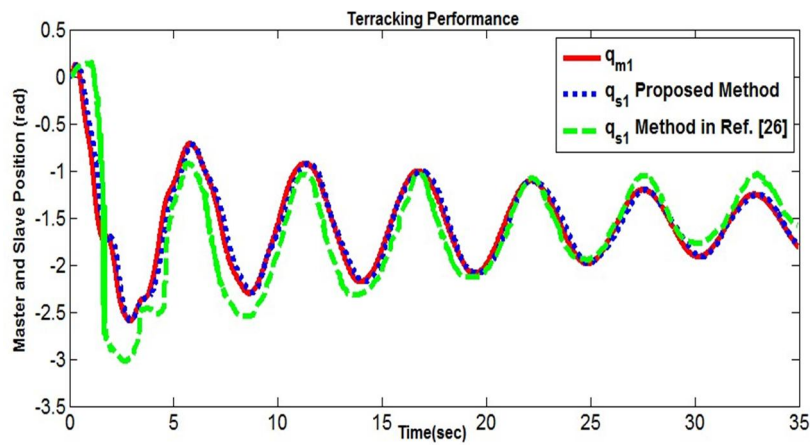
مقدار پارامتر	پارامتر ربات‌های راهبر و پیرو
$l_{1i} = 0/7m, l_{2i} = 0/5m$	طول لینک‌ها
$m_{2m} = 10\ kg, m_{1m} = 5\ kg$	جرم لینک‌ها
$q_i(0) = \dot{q}(0) = \ddot{q}(0) = 0$	شرایط اولیه
$K_{m1} = 0/02, K_{m2} = 0/2, K_{s1} = 50, K_{s2} = 8$	بهره کنترل کننده‌ها
$\Gamma_e = 0/1, \Gamma_s = 0/5, \Gamma_m = 0/1$	پارامترهای طراحی مدل و محیط
$\mu_s = 0/2, \mu_m = 0/2$	پارامترهای طراحی ترم مقاوم‌ساز
$D_m = D_s = [0/1 \ 0/1]$	عدم قطعیت
$d_m(t) = 0/2 \times \sin(t)$	تأخیر در سمت ربات راهبر
$d_s(t) = 0/2 \times \sin(t)$	تأخیر در سمت ربات پیرو



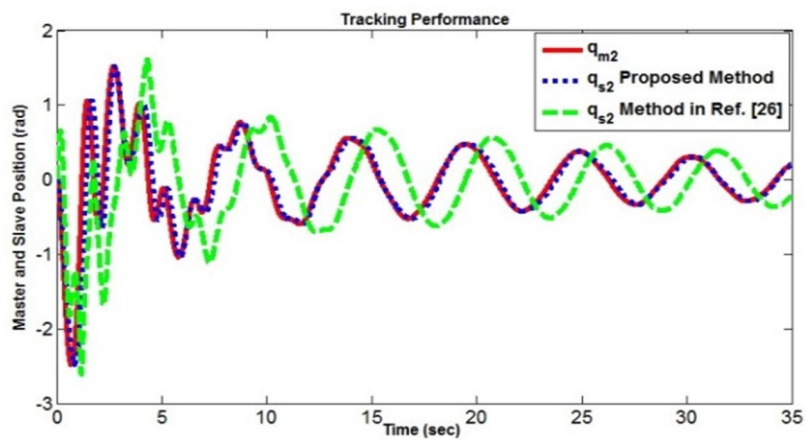
شکل ۳- توابع تعلق فازی



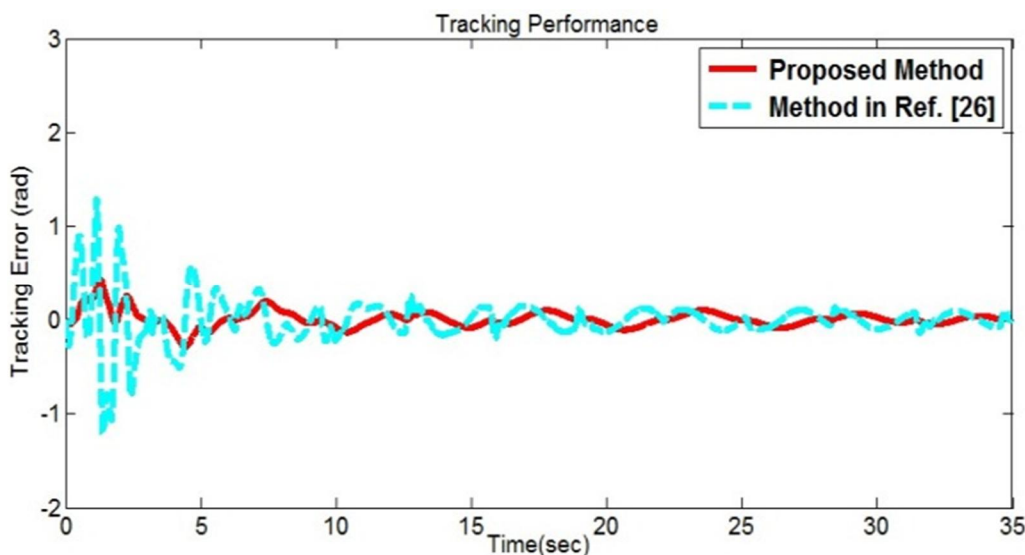
شکل ۲- نیروی انسانی



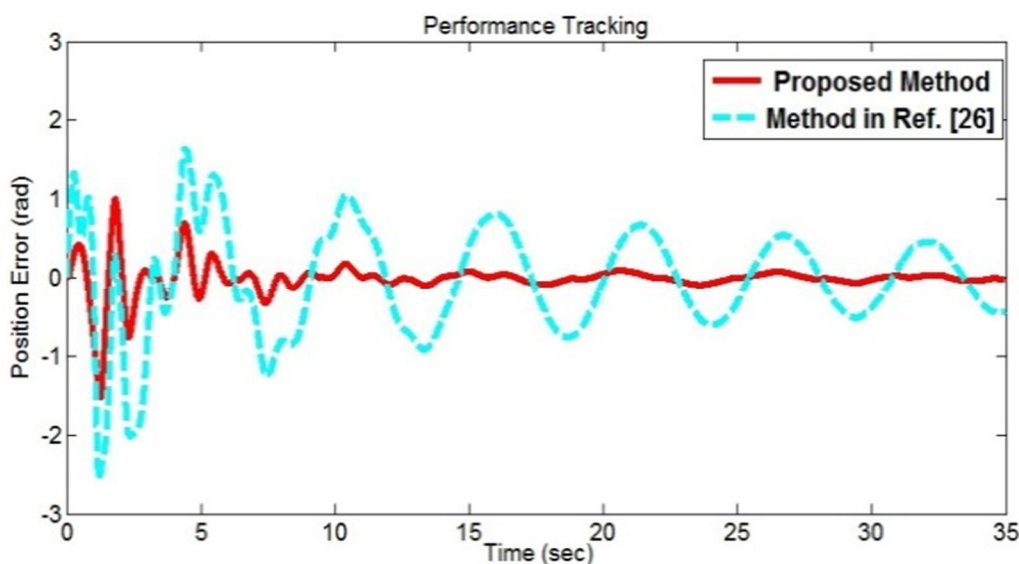
شکل ۴- تخمین موقعیت q_{m1} توسط q_{s1}



شکل ۵- تخمین موقعیت q_{m2} توسط q_{s2}



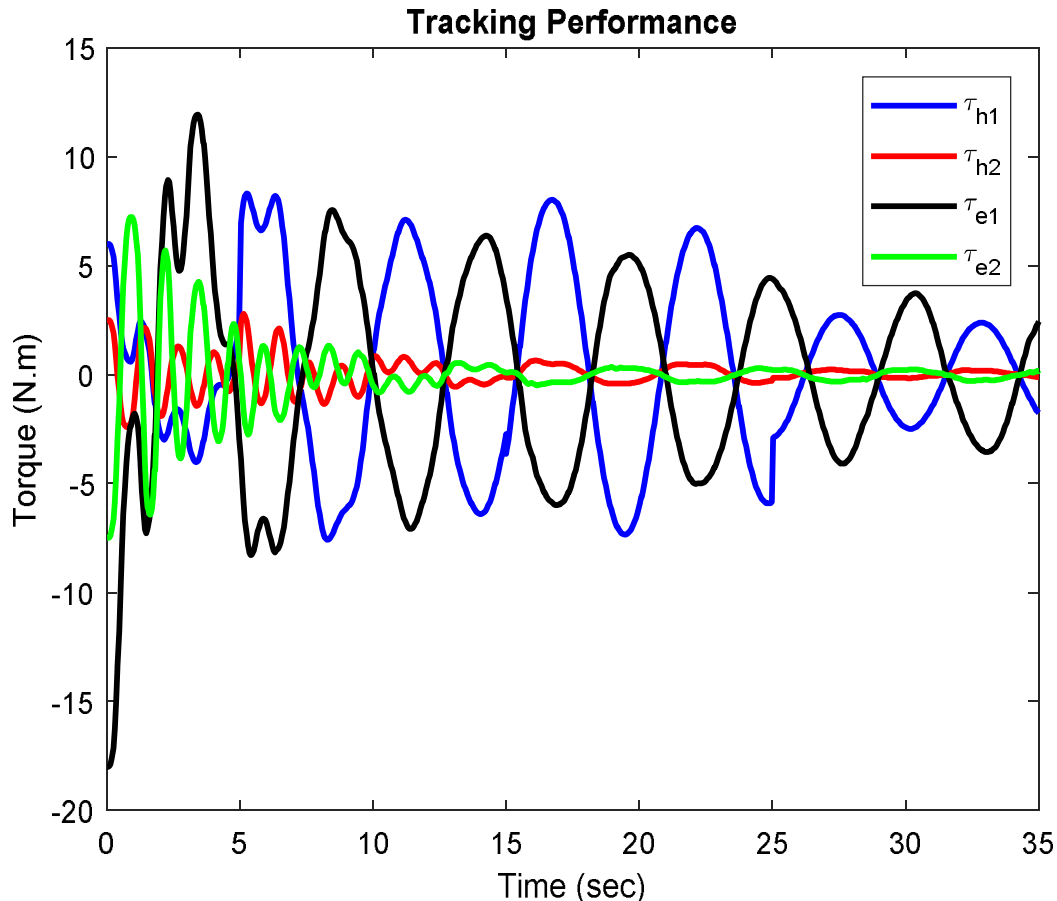
شکل ۶- خطای تخمین موقعیت q_{m1} توسط q_{s1} (با مانع)



شکل ۷- خطای تخمین موقعیت q_{m2} توسط q_{s2} (با مانع)

روش [۲۶] بسیار بهتر و مطلوب‌تر است. در شکل‌های ۶ و ۷، خطاهای ردیابی دو روش آورده شده است که روش پیشنهادی مقاله دارای خطای ردیابی کمتری است. شکل ۸ بیان می‌کند که گشتاور محیطی در جهت مخالف گشتاور انسانی روی ربات پیرو اعمال شده است؛ با این حال، عمل ردیابی (همانطور که بیان شد) به خوبی صورت گرفته است. این نتایج عملکرد مناسب کنترل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

گرفته است. به منظور بررسی ردیابی موقعیت برای مفاصل ربات‌های راهبر و پیرو و همچنین خطاهای ردیابی آن، شبیه-سازی این مقاله نیز در شکل‌های ۴ الی ۷ به ازای موقعیت مفاصل راهبر یکسان در نظر گرفته شده در روش مرجع [۲۶] اجرا شده است. شکل ۴ و ۵ به ترتیب ردیابی موقعیت مفصل اول و دوم ربات پیرو با استفاده از روش پیشنهادی و روش مرجع [۲۶] نسبت به ربات راهبر را نشان می‌دهند. همانطور که مشخص است، عملکرد ردیابی روش پیشنهادی نسبت به



شکل ۸- گشتاور محیط و انسان

۵- نتیجه گیری

هدف اصلی این مقاله، کنترل سیستم تله اپراتوری دوطرفه غیرخطی در حضور نامعینی پارامتری و تأخیر متغیر با زمان با استفاده از الگوریتم مقاوم تطبیقی فازی مبتنی بر روش پسگام است. وجود تأخیر زمانی متغیر با زمان در کانال ارتباطی راهبر-پیرو و عدم قطعیت‌های ناشی از اغتشاش خارجی و دینامیک‌های مدل نشده (که در مواقعی موجب برهم‌زدن پایداری سیستم می‌شوند)، از جمله عوامل مهم و موردتوجه در این مقاله بوده است. نتایج شبیه‌سازی، موفقیت طرح پیشنهادی را در تحقق اهداف کنترلی نشان می‌دهد.

۶- مراجع

[1] Shuang H, Hu L, Liu PX (2019) Sliding mode control for a surgical teleoperation system via a

همچنین، به طور کلی، در مقایسه با مرجع [۲۶]، می‌توان به سه نکته زیر اشاره کرد:

الف) در طرح پیشنهادی، اثبات پایداری به صورت همزمان برای سیستم تله اپراتوری انجام می‌شود؛ در حالی که در مرجع [۲۶]، آنالیز پایداری به صورت مجزا برای ربات راهبر و پیرو انجام شده است.

ب) در طرح پیشنهادی خطای تقریب فازی در نظر گرفته می‌شود و جمله مقاوم‌ساز مسئول رسیدگی به آن است؛ کما اینکه در مرجع مذکور، از خطای تقریب فازی صرف نظر شده است.

ج) تأخیر زمانی در این طرح به صورت متغیر با زمان منظور می‌شود، ولی در مرجع مذکور تأخیر به صورت ثابت لحاظ شده است.

- adaptive network buffering. IFAC-Papers On Line 50(1): 11421-11426.
- [16] Hou W, Fu M, Zhang H (2018) Distributed consensus of third-order multi-agent systems with communication delay. *Asian J Control* 20(2): 956-961.
- [17] Hua CC, Liu XP (2010) Delay-dependent stability criteria of teleoperation systems with asymmetric time-varying delays. *IEEE Trans Robot* 26(5): 925-932.
- [18] Hua CC, Liu XP (2012) A new coordinated slave torque feedback control algorithm for network-based teleoperation systems. *IEEE ASME Trans Mechatron* 18(2): 764-774.
- [19] Liu K, Seuret A, Xia Y (2017) Stability analysis of systems with time-varying delays via the second-order Bessel-Legendre inequality. *Automatica* 76: 138-142.
- [20] Wu ZG, et al. (2017) Event-triggered control for consensus of multiagent systems with fixed/switching topologies. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst* 48(10): 1736-1746.
- [21] Li Y, et al. (2015) Guaranteed cost control design for delayed teleoperation systems. *J Franklin I* 352(11): 5085-5105.
- [۲۲] زینلی ز، رضانی ا، ازگلی س (۲۰۱۵) جبران تاخیر زمانی متغیر با زمان در سیستم های کارکرد از دور با استفاده از رویکرد اغتشاش ارتباطی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل سازی. *مجله مکانیک سازه ها و شماره ها* ۱۵۶-۱۴۳: ۴(۴).
- [23] Yu K, et al. (2012) Robust control of motion/force for robotic manipulators with random time delays. *IEEE Trans Control Syst Technol* 21(5): 1708-1718.
- [24] Abidi K, Yildiz Y, Korpe BE (2016) Explicit time-delay compensation in teleoperation: An adaptive control approach. *Int J Robust Nonlin* 26(15): 3388-3403.
- [25] Jing B, et al. (2016) Robust adaptive control for bilateral teleoperation systems with guaranteed parameter estimation. 2016 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM).
- [26] Chen Z, et al. (2019) Adaptive fuzzy backstepping control for stable nonlinear bilateral teleoperation manipulators with enhanced transparency performance. *IEEE Trans Ind Electron* 67(1): 746-756.
- [27] Lu Z, Huang P, Liu Z (2017) Predictive approach for sensorless bimanual teleoperation under random time delays with adaptive fuzzy control. *IEEE Trans Ind Electron* 65(3): 2439-2448.
- [28] Li H, Kawashima K (2016) Bilateral teleoperation with delayed force feedback using time domain disturbance observer. *IEEE Access* 7: 43383-43393.
- [2] Kebria Parham M, et al. (2019) Robust adaptive control scheme for teleoperation systems with delay and uncertainties. *IEEE Trans Cybern* 1-11.
- [3] Xia L, Tao R, Tavakoli M (2014) Adaptive control of uncertain nonlinear teleoperation systems. *Mechatronics* 24(1): 66-78.
- [4] Yuan Y, Wang Y, Guo L (2018) Force reflecting control for bilateral teleoperation system under time-varying delays. *IEEE Trans Industr Inform* 15(2): 1162-1172.
- [5] Khatai H, et al. (2019) Neuro-fuzzy control of bilateral teleoperation system using FPGA. *Iranian Journal of Fuzzy Systems* 16(6): 17-32.
- [6] Chenguang Y, et al. (2008) Output feedback NN control for two classes of discrete-time systems with unknown control directions in a unified approach. *IEEE Trans Neural Netw* 19(11): 1873-1886.
- [7] Liu YJ et al. (2009) Robust adaptive tracking control for nonlinear systems based on bounds of fuzzy approximation parameters. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst* 40(1): 170-184.
- [8] Liu X, Tao R, Tavakoli M (2014) Adaptive control of uncertain nonlinear teleoperation systems. *Mechatronics* 24(1): 66-78.
- [9] Hwang CL, Chang NW (2008) Fuzzy decentralized sliding-mode control of a car-like mobile robot in distributed sensor-network spaces. *IEEE Trans Fuzzy Syst* 16(1): 97-109.
- [10] Hugo SR, et al. (2015) Higher order sliding mode based impedance control for dual-user bilateral teleoperation under unknown constant time delay. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).
- [11] Shahdi A, Sirouspour S (2009) Adaptive/robust control for time-delay teleoperation. *IEEE Trans Robot* 25(1): 196-205.
- [12] Mohammadi L, Alfi A, Xu B (2017) Robust bilateral control for state convergence in uncertain teleoperation systems with time-varying delay: a guaranteed cost control design. *Nonlinear Dyn* 88(2): 1413-1426.
- [13] Victor Hugo A, et al. (2016) Transparency of a bilateral tele-operation scheme of a mobile manipulator robot. *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics*.
- [14] Tian D, Yashiro D, Ohnishi K (2012) Haptic transmission by weighting control under time-varying communication delay. *Iet Control Theory A* 6(3): 420-429.
- [15] De Rossi G, Muradore R (2017) A bilateral teleoperation architecture using Smith predictor and

- [31] Li W (1994) Adaptive fuzzy systems and control: Design and stability analysis. Prentice-Hall.
- [32] Li Y, Yin Y, Zhang D (2018) Adaptive task-space synchronization control of bilateral teleoperation systems with uncertain parameters and communication delays. IEEE Access 6: 5740-5748.
- passivity controller. Robot Cim-Int Manuf 37: 188-196.
- [29] Spong MW, Hutchinson SA, Vidyasagar M (2006) Robot modeling and control. IEEE Control Syst 26(6): 113-115
- [30] Kelly R, Santibañez V, Loria A (2005) Control of robot manipulators in joint space. Springer, Berlin.