مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۲۵-۱۹

کنترل تطبیقی محدود سیستم تله اپراتوری غیرخطی نامعین با وجود اشباع محرک ها و تاخیر زمانی نامتقارن و متغیر بازمان

سهیل گنجه فر[۱]، سارا رضائی[۲]، فرزاد هاشم زاده[۳]

[۱] دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی، گروه برق، دانشگاه بوعلی سینا، s_ganjefar@basu.ac.ir

[۲] دانشجوی دکتری مهندسی برق-کنترل، گروه برق، دانشگاه بوعلی سینا، s.rezaei55@gmail.com

[۳] استادیار، دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر، گروه کنترل، دانشگاه تبریز، farzad.hashemzadeh@gmail.com

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۵/۱۱/۲۹، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۶/۲/۱۴)

چکیده: در این مقاله هدف طراحی کنترل کننده تطبیقی محدود برای سیستم های تله اپراتوری غیرخطی نامعین و مقید به مساله اشباع محرک ها می باشد که در آن تاخیر زمانی موجود در کانال انتقال اطلاعات نیز به صورت متغیر با زمان و نامتقارن است. ساختار کنترلی پیشنهادی یک کنترل کننده تناسبی غیرخطی به همراه یک کنترل کننده دمپینگ غیرخطی بوده که جمله تناسبی تابعی از خطای ردیابی موقعیت بین روبات های فرمانده و فرمانبر می باشد. همچنین جمله های کنترل تطبیقی محدود نیز جهت جبران نامعینی ماتریس جاذبه و ماتریس اصطکاک روبات ها به صورت زمان واقعی[۱]، به این کنترل کننده افزوده می شود. با انتخاب مناسب تابع غیرخطی در معادلات کنترلی روبات ها و با در نظر گرفتن شرایطی برای تخمین پارامترهای نامعلوم، کنترل کننده پیشنهادی علی رغم تاخیر زمانی و نامعینی های پارامتری همواره در باند خطی محرک ها عمل می کند و محدودیتی نیز روی نرخ تغییرات تاخیر ندارد. تحلیل پایداری، محاسبه رابطه تخمینی برای پارامترهای نامعین روبات های فرمانده و فرمانبر و اثبات محدود ماندن سیگنال های سرعت فرمانده و فرمانبر و خطای موقعیت روبات ها با استفاده از تابع لیاپانوف-کراسفسکی و تحت شرایط وابسته به حداکثر تاخیر زمانی اثبات می گردد. سپس از لم باربالات به منظور تحلیل ردیابی مجانبی موقعیت روبات ها استفاده می شود. نتایج شبیه سازی موید کارآیی کنترل کننده در رسیدن اهداف پایداری، ردیابی و عدم اشباع محرک ها می باشد.

کلمات کلیدی: تله اپراتوری غیرخطی، تاخیر زمانی متغیر نامتقارن، اشباع محرک ها، پایداری، کنترل تطبیقی محدود.

Bounded Adaptive Control of Uncertain Nonlinear Teleoperation with Actuators Saturation and Asymmetric Varying Time Delays

Soheil Ganjefar, Sara Rezaei, Farzad Hashemzadeh

Abstract: In this paper, adaptive controller is proposed for bilateral teleoperation systems with parametric uncertainties, asymmetric time-varying delays in their communication channel and sandwich linearity in their actuators. The proposed bounded adaptive approach is a nonlinear-Proportional plus nonlinear Damping *(nP+nD)* controller which nonlinear adaptive terms are also employed locally to cope with the parametric uncertainties. The designed controller has the ability to deal with parameter variations in the dynamics of the master and slave robots . The proposed controller also guarantees asymptotic stability and position tracking and avoiding the inputs to reach their usual actuator bounds. The asymptotic stability and tracking performance of the teleoperation system are proved using a Lyapunov-Krasovskii functional. The effectiveness of the proposed method is corroborated through simulation results.

Keywords: Nonlinear Teleoperation; Asymmetric Time-varying Delay; Actuator Saturation; Asymptotic Stability; Bounded Adaptive Control.

[1] real time

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.3.0]

۱- مقدمه

با پیشرفت روز افزون ربات ها در دنیای امروز و لزوم استفاده از آنها در محیط های دور از دسترس و خطرناک، بحث استفاده از ربات ها در فواصل دور و کنترل آنها توجه بسیاری از محققان را به خود جلب نموده است. این کاربرد و کنترل ربات ها در فواصل دورتر تحت عنوان(سیستم های حرکتی از راه دور[1]) مورد بررسی قرار می گیرد. سیستم های حرکتی از راه دور متشکل از اپراتور، دو روبات، کنترل کننده ها، کانال انتقال اطلاعات و محیط کاری می باشند. یکی از روبات ها که با کاربر در ارتباط است، روبات فرمانده و روبات دیگر که با محیط کاری در ارتباط می باشد روبات فرمانبر نامیده می شود. هدف کنترل کننده های روبات فرمانده و فرمانبر تضمین اهداف کنترلی شامل پایداری کل مجموعه سیستم و شفافیت آن می باشد. پایداری سیستم های حرکتی از راه دور به مفهوم کراندارماندن خطای ردیابی و کارایی این سیستم هاکه در حالت کلی با مفهوم شفافیت بیان می شود، به مفهوم افزایش میزان احساس کاربر از محیط کاری می باشد که در فاصله دورتری قرار گرفته است. هرچه این سیستم شفاف تر باشد، کاربر احساس دقیق تری از محیط کاری خواهد داشت. به منظور افزایش میزان شفافیت می بایست از محیط کاری اطلاعات کافی به دست آورده و به کاربر منتقل کرد. در اغلب این سیستم ها اطلاعات نیرو و موقعیت جهت طراحی کنترل کننده به منظور پایدارسازی و افزایش میزان شفافیت مورد استفاده قرار می گیرد.

معمولا به دلیل فاصله زیاد بین روبات های موجود در سیستم های حرکت از راه دور، در انتقال اطلاعات مذکور بین روبات ها تاخیر وجود دارد که این تاخیر مهمترین چالش در کنترل پایداری و کارایی این سیستم ها می باشد. ساختارهای کنترلی متفاوتی جهت جبران تاخیر زمانی پیشنهاد شده است [۱-۹] . اغلب تحقیقات صورت گرفته در زمینه کنترل این سیستم ها برای سیستم های با تاخیر ثابت ومتقارن و یا متغییر با کران خاص و نرخ تغییرات کوچکتر یا برابر یک انجام شده است. درصورتی که در اکثر کاربردهای عملی سیستمهای حرکت از راه دور، تاخیر کانال انتقال به تاخیرهای پردازشی،انتقالی، انتشاری و صف تقسیم می شوند[۱۰, ۱۱]. از آنجا که تاخیرهای پردازش و صف دارای ویژگی تصادفی می باشند، نرخ تغییرات آنها می تواند بزرگتر از یک باشد.

در حالت ایده آل محرک ها توانایی تولید هر گشتاور را داشته و اطلاعات دقیق از پارامترهای سیستم های روباتیکی نیز وجود دارد. ولی در عمل به دلیل نامعلوم بودن یا احتمال تغییرات برخی پارامترهای روبات نظیر اصطکاک، جرم و اغتشاشات خارجی، امکان دسترسی به مقادیر واقعی روبات وجود ندارد. همچنین در مسائل عملی محرک های روبات ها دارای محدودیت های فیزیکی هستند که این امر، دامنه گشتاورهای قابل دسترس را محدود می سازد. اشباع[2]، منطقه مرده[3]، لقی[4] و هیسترزیس[5] از عوامل غیرخطی محرک ها در کاربردهای عملی سیستم های کنترل می باشند. این عوامل غیر قابل پیشگیری بوده و اگر در طراحی کنترل کننده لحاظ نشوند، می توانند عملکرد حلقه بسته سیستم را تخریب و به نتایج غیرقابل پیش بینی و یا غیرقابل انتظار منجر شود. اگر چه با استفاده از موتورهای با گشتاور بالا، تقریبا می توان مانع از بروز اشباع در کنترل کننده های روبات شد، ولی اندازه بزرگ چنین موتورهایی باعث ایجاد مشکلات فراوانی در طراحی روبات ها و کنترل کننده ها می گردد. در این راستا در نظر گرفتن مدل اشباع محرک ها و نامعینی های پارامتری در طراحی کنترل کننده و اثبات پایداری سیستم، روشی کارا می باشد که در نتیجه آن سیگنال کنترلی موثر و پایدار با وجود محرک های با سایز کوچکتر که به ناچار دارای ظرفیت خروجی محدودی می باشند، ایجاد می گردد.

اخیرا تحقیقاتی در خصوص در نظر گرفتن مساله اشباع محرک ها در سیستم های تله اپراتوری صورت گرفته است. در مرجع [۱۲] کنترل کننده PID به صورت ترکیبی با ساختار ضد اشباع برای سیستم تله اپراتوری معین و بدون تاخیر در کانال ارتباطی طراحی شده است. در مرجع [۱۳] ساختاری متفاوت با ترکیب روش متغییرهای موج و کنترل کننده تناسبی غیرخطی برای کنترل سیستم های تله اپراتوری مقید به مساله اشباع ارائه شده است که در آن تاخیر موجود در کانال انتقال اطلاعات ثابت و دینامیک روبات هم معین باشد. در پژوهشی دیگر جهت کنترل موقعیت و تضمین پایداری روبات های فرمانده و فرمانبر معین مقید به مساله اشباع محرک ها با تاخیر زمانی ثابت روش ترکیبی متغییرهای موج با ساختار ضداشباع مطرح شده است [۱۴]. اخیرا این نویسندگان به ارائه ساختار تکمیل شده ای از مقالات [۱۳, ۱۴] پرداختند [۱۵]. در این پژوهش سیستم تله اپراتوری معین و دارای تاخیر زمانی ثابت در کانال ارتباطی می باشد. هاشم زاده و همکارانش [۱۶]، به ارائه کنترل کننده nP+D برای سیستم تله اپراتوری غیرخطی معین دارای تاخیر زمانی متغیر و مقید به مساله اشباع در محرک ها پرداختند. براساس این ساختار، زی[6]و همکارانش با فرض عدم دسترسی به سیگنال های سرعت، کنترل کننده مناسب برای سیستم تله اپراتوری غیرخطی دارای تاخیر زمانی متغیر و مقید به مساله اشباع ارائه نمودند که پایداری سیستم براساس شرایط محدود کننده LMI تضمین می گردد[۱۷]. در مرجع [۱۸] یانگ و همکارانش به ارائه یک کنترل کننده تطبیقی عصبی برای سیستم های تله اپراتوری غیرخطی دارای تاخیر زمانی ثابت در کانال ارتباطی و مقید به اشباع محرک ها پرداختند. کنترل کننده پیشنهادی براساس ساختار PPC[7] طراحی شده است. شرایط وابسته به زمان پایداری

[1] Teleoperation Systems
[2] saturation
[3] Dead zone
[4] Back lash
[5] Hysteresis
[6] Zhai
[7] prescribed performance control

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.3.0]

و تضمین ردیابی موقعیت روبات های فرمانده و فرمانبر با استفاده از LMI به دست آمده است.

در این تحقیقات طراحی کنترل کننده براساس اینکه اطلاعات دقیق از پارامترهای روبات وجود داشته باشد یا تاخیر زمانی ثابت باشد، انجام گرفته است که این امر در عمل به دلیل وجود نامعینی ها در روبات ها و تاخیر متغیر با زمان در کانال، امکان پذیر نمی باشد. از دیدگاه کنترلی طراحی کنترل کننده ای که با کمترین محدودیت، پایداری مجانبی و شفافیت را در سیستم تله اپراتوری مقید به مساله اشباع محرک ها و با وجود تاخیر زمانی متغیر نامتقارن در کانال ارتباطی و در حضور نامعینی های دینامیکی تضمین نموده و محدودیتی روی نرخ تغییرات تاخیر نیز نداشته باشد، حائز اهمیت فراوانی می باشد. در تحقیقات که تاکنون در زمینه سیستم های تله اپراتوری صورت گرفته است، روشی که بتواند تمام این مسائل را به صورت یکجا در نظر بگیرد وجود ندارد.

در این مقاله روش طراحی کنترل کننده تطبیقی محدود برای سیستم تله اپراتوری نامعین با تاخیر زمانی نامتقارن و متغیر با زمان و مقید به مساله اشباع محرک ها مورد بررسی قرار می گیرد. ساختار کنترلی پیشنهادی یک کنترل کننده تناسبی غیرخطی به همراه یک کنترل کننده دمپینگ غیرخطی بوده که در آن جمله های کنترل تطبیقی محدود به صورت محلی در هر کنترل کننده به منظور غلبه بر نامعینی های پارامتری در نظر گرفته شده است. با انتخاب مناسب تابع غیرخطی در معادلات کنترلی روبات ها و با در نظر گرفتن شرایطی برای تخمین پارامترهای نامعلوم، کنترل کننده پیشنهادی علی رغم تاخیر زمانی و نامعینی های پارامتری همواره در باند خطی محرک ها عمل می کند و محدودیتی نیز روی نرخ تغییرات تاخیر ندارد. با استفاده از تابع لیاپانوف-کراسفسکی پایداری، تضمین ردیابی مجانبی موقعیت مفاصل بین روبات های فرمانده و فرمانبر اثبات و قانون کنترل تطبیقی جهت مقاوم ساختن سیستم در مقابل نامعینی های پارامتری نیز استخراج می گردد.

در ادامه مقاله در بخش دوم و سوم مدل سیستم تله اپراتوری با کنترل کننده مقید به مساله اشباع و مدل محرک اشباع با ناحیه خطی محدود توصیف می گردد. در بخش چهارم نحوه طراحی کنترل کننده تطبیقی محدود بررسی می گردد. در بخش پنجم کارآیی کنترل کننده و تحلیل پایداری سیستم بررسی می شود. در بخش ششم نتایج شبیه سازی ارائه می شود. در نهایت بخش هفتم نتیجه گیری از روش تحت مطالعه می باشد.

۲- مدل سیستم تله اپراتوری با کنترل کننده مقید به مساله اشباع

مدل سیستم تله اپراتوری غیرخطی با کنترل کننده های مقید به اشباع در محرک ها به صورت زیرمی باشد.

$$\begin{aligned} &M_m\left(q_m(t)\right)\ddot{q}_m(t)+C_m\left(q_m(t),\dot{q}_m(t)\right)\dot{q}_m(t)\\ &+F_m\dot{q}_m(t)+F_{cm}\left(\dot{q}_m(t)\right)+G_m\left(q_m(t)\right)\\ &=\tau_h(t)+S\left(\tau_m(t)\right) \end{aligned} \quad (۱)$$

$$\begin{aligned} &M_s\left(q_s(t)\right)\ddot{q}_s(t)+C_s\left(q_s(t),\dot{q}_s(t)\right)\dot{q}_s(t)\\ &+F_s\dot{q}_s(t)+F_{cs}\left(\dot{q}_s(t)\right)+G_s\left(q_s(t)\right)\\ &=S\left(\tau_s(t)\right)-\tau_e(t) \end{aligned} \quad (۲)$$

در رابطه بالا برای $j\in\{m,s\}$ ، $\ddot{q}_j,\dot{q}_j,q_j\in R^{n\times1}$ بوده و به ترتیب موقعیت، سرعت وشتاب روبات های فرمانده و فرمانبر می باشند. $G_j\left(q_j(t)\right)\in R^{n\times1}$ بردار جاذبه $M_j\left(q_j(t)\right)\in R^{n\times n},C_j\left(q_j(t),\dot{q}_j(t)\right)\in R^{n\times n}$, به ترتیب ماتریس های کوریولیوس و سانتریفوژ و اینرسی می باشند. همچنین $F_j\in R^{n\times n}$ و $F_{cj}\left(\dot{q}_j(t)\right)\in R^{n\times1}$ ضرایب اصطکاک ویسکوز و کولمبی سیستم می باشند. $\tau_e(t)\in R^{n\times1}$ و $\tau_h(t)$ گشتاورهای اعمالی از طرف کاربر و محیط کاری می باشند. $\tau_m(t),\tau_s(t)\in R^{n\times1}$ نیز سیگنال های کنترلی روبات های فرمانده و فرمانبر می باشند که از تابع برداری غیرخطی $S:R^{n\times1}\to R^{n\times1}$ که مربوط به مدل اشباع می باشد عبور کرده و سپس به روبات ها اعمال می گردد. در این پژوهش زیرنویس m نشان دهنده پارامترهای روبات فرمانده و زیرنویس s نشان دهنده پارامترهای روبات فرمانبر می باشد. n نیز معرف تعداد مفاصل روبات ها می باشد.مهمترین ویژگی های مدل غیر خطی روبات ها که در این پژوهش از آنها استفاده می شود به صورت زیر می باشند[۱۹, ۲۰].

۱- ماتریس های اینرسی $M_m\left(q_m(t)\right)$ و $M_s\left(q_s(t)\right)$ ماتریس های متقارن و مثبت معین محدود بوده و دارای باندهای بالا و پایین $0<\mu_m I\le M_m\left(q_m(t)\right)\le\mu_M I$ و $0<\mu_s I\le M_s\left(q_s(t)\right)\le\mu_S I$ می باشند.

۲- ماتریس سانتریفوژ/کوریولیس دارای ویژگی های زیر می باشد:

الف- رابطه بین ماتریس های اینرسی و سانتریفوژ/کوریولیس به صورت $\dot{M}\left(q,\dot{q}\right)=C\left(q,\dot{q}\right)+C^T\left(q,\dot{q}\right)$,$\forall q,\dot{q}\in R^{n\times1}$, می باشد.

ب- براساس رابطه فوق، رابطه $\dot{q}^T\left[\frac{1}{2}\dot{M}\left(q,\dot{q}\right)-C\left(q,\dot{q}\right)\right]\dot{q}=0$ به دست می آید.

ج- برای روبات های دارای مفاصل دورانی، عدد مثبت k_c وجود دارد، به گونه ای که ماتریس سانتریفوژ/کوریولیس به صورت $\left\|C\left(x,y\right)z\right\|\le k_c\|y\|\|z\|$ محدود باقی می ماند.

۳- مشتق زمانی $C\left(q(t),\dot{q}(t)\right)$ در صورت محدود بودن $\dot{q}(t)$ و $\ddot{q}(t)$ محدود خواهد بود.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.3.0]

۴- ماتریس اصطکاک متقارن، قطری و مثبت معین محدود و دارای کران بالا و پایین بوده که رابطه زیر را ارضا می نماید.

$$f_m \|x\|^2 \le x^T F x \le f_M \|x\|^2, \forall x \in R^{n\times 1}) \qquad (۳)$$

۵- برای روبات ها دارای مفاصل دورانی، بردار جاذبه $G(q(t))$ محدود می باشد. به عبارت دیگر عدد مثبت γ وجود دارد به طوری که $\|G(q(t))\|_\infty \le \gamma$ یا به عبارتی اعداد مثبت γ_i وجود دارند به طوری که اجزا بردار جاذبه یعنی $g_i(q(t))$ در شرط $|g_i(q(t))| \le \gamma_i$ صدق می کنند.

۶- معادلات حرکت روبات ها با n لینک را می توان به صورت خطی $M(q(t))\ddot{q}(t)+C(q(t),\dot{q}(t))\dot{q}(t)+F\dot{q}(t)+F(\dot{q}(t))+G(q(t))=Y(q(t),\dot{q}(t),\ddot{q}(t))\theta=\tau$ پارامتریزه کرد. که در آن $Y(q(t),\dot{q}(t),\ddot{q}(t)) \in R^{n\times l}$ یک ماتریس تابعی پیوسته بوده که اعضای آن منحصرا به متغییرهای سرعت، موقعیت و شتاب روبات وابسته بوده و شامل توابع شناخته شده می باشد که ماتریس رگرسیون نامیده می شود. همچنین $\theta \in R^l$ برداری ثابت از پارامترهای نامعین روبات می باشد. τ گشتاور کنترلی روبات و l نیز تعداد پارامترهای نامعین روبات می باشد.

۷- ویژگی ششم روبات ها را در نظر گرفته و فرض نمایید که $\theta_{Mj} > 0$ محدوده بالای بردار $|\theta_j|$ بوده، به طوری که $|\theta_j| \le \theta_{Mj}, \forall j \in \{1,\dots,l\}$ باشد و تعریف می نماییم:

$$\theta_M \square (\theta_{M1},\dots,\theta_{Ml})^T \ , \ \Theta \square [-\theta_{M1},\theta_{M1}]\times\dots\times[-\theta_{Ml},\theta_{Ml}]$$

الف- با توجه به ویژگی های ۵ و۶ روبات ها، مقادیر مثبت $B_{gi}^\Theta, i=1,\dots,n,$ وجود دارند به طوری که:

$$|g_i(w,z)| = |Y_{gi}(w)z| \le B_{gi}^\Theta, \ i=1,\dots,n, \forall (w,z) \in R^n \times \Theta$$

می باشد. همچنین مقادیر مثبت $B_{G_{ij}}$, B_{G_i} و B_G وجود دارند، به طوری که، $\|Y_g(w)\| \le B_G$ و $|Y_{gij}(w)| \le B_{G_{ij}}$, $\|Y_{gi}(w)\| \le B_{G_i}$ برای $\forall w \in R^n, \ i=1,\dots,n, \ j=1,\dots,l$.

ب- با توجه به ویژگی ۱، ۵، ۶،۷ و بند پنجم ویژگی ۲ و فرض محدود بودن x, y، مقدار مثبت $B_{Di}^\Theta, i=1,\dots,n$ می تواند وجود داشته باشد، به طوری که $|Y_i(w,x,y)z| \le B_{Di}^\Theta, \ i=1,\dots,n,$ به ازای $\forall (w,x,y,z) \in R^n \times R^n \times R^n \times \Theta.$

همچنین مقادیر مثبت $B_{Y_{ij}}$, B_{Y_i} و B_Y وجود دارند به طوری که:

$$|Y_{ij}(w,x,y)| \le B_{Y_{ij}}, \|Y_i(w,x,y)\| \le B_{Y_i}, \|Y(w,x,y)\| \le B_Y,$$
$$\forall (w,x,y) \in R^n \times R^n \times R^n, i=1,\dots,n, j=1,\dots,l.$$

در این پژوهش همچنین فرض شده است که تابع اصطکاک کولمبی محدود و پیوسته تکه ای می باشد.

۳- مدل محرک اشباع با ناحیه خطی محدود

مدل محرک با ناحیه خطی محدود به صورت تابع برداری $S(X)$ در نظر گرفته می شود. با فرض اینکه تعداد مفاصل روبات های فرمانده و فرمانبر n باشد، اعضای تابع برداری $S(X)$ به صورت $s_i(x_i): R \to R, \ i=1,\dots,n$ می باشند.

$$s_i(x_i) = \begin{cases} > M_i & x_i > M_i \\ = x_i & -M_i \le x_i \le M_i \\ < -M_i & x_i < -M_i \end{cases} \qquad (۴)$$

با تعریفی که در قسمت بالا برای تابع $S(X)$ ارایه شد، می توان برای تک تک مفاصل روبات ها، تابع جداگانه ای برای مدل غیرخطی اشباع در نظر گرفت. شایان ذکر است که در این مدل، تابع $s_i(x_i)$ می بایست در بازه $-M_i \le x_i \le M_i$ خطی باشد و در خارج از این ناحیه $(|x_i| > M_i)$ می تواند غیرخطی(محدود یا نامحدود) باشد. مثالی از اینگونه توابع، تابع اشباع می باشد.

فرض می شود که برای تمامی $i=1,\dots,n$ ، $\gamma_i < M_i$ می باشد. که γ_i ماکزیمم $|g_i(q)|$ می باشد. این شرط به این معنی است که محرک های هر دو روبات فرمانده و فرمانبر توانایی غلبه بر نیروی جاذبه وارد شده بر روبات ها را دارا می باشند .

۴- طراحی کنترل کننده تطبیقی محدود

جهت رویارویی با مساله اشباع محرک ها ، نامعینی های دینامیکی و سنکرون سازی سیگنالهای موقعیت و سرعت روبات های فرمانده و فرمانبر در سیستم های تله اپراتوری غیرخطی که دارای کانال انتقال اطلاعات نامتقارن و متغیر با زمان می باشند، یک کنترل کننده تناسبی- مشتق گیر غیرخطی (nP+nD) به همراه جمله های کنترل تطبیقی محدود که به صورت محلی تعریف می گردند، به صورت زیر پیشنهاد می شود.

$$\tau_m(t) = Y_m(q_m(t),\dot{q}_m(t))\hat{\theta}_m - P(q_m(t) - q_s(t - d_s(t))) - K_m P(\dot{q}_m(t)) \qquad (۵)$$

$$\tau_s(t) = Y_s(q_s(t),\dot{q}_s(t))\hat{\theta}_s - P(q_s(t) - q_m(t - d_m(t))) - K_s P(\dot{q}_s(t)) \qquad (۶)$$

در رابطه بالا، $K_m, K_s \in R^{n\times n}$ ماتریس های مثبت معین، متقارن و ثابت می باشند. $d_m(t)$ و $d_s(t)$ به ترتیب تاخیرهای نامتقارن کانال ارتباطی در مسیر پیشرو (از فرمانده به فرمانبر) و پس رو (از فرمانبر به فرمانده) می باشند. $\hat{\theta}_m, \hat{\theta}_s \in R^l$ بردار تخمین پارامترهای نامعین و $Y_m(q_m(t),\dot{q}_m(t)), Y_s(q_s(t),\dot{q}_s(t)) \in R^{n\times l}$ ماتریس های رگرسیون روبات های فرمانده و فرمانبر می باشند که به صورت زیر تعریف می شوند:

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.3.0]

$$Y_m\left(q_m(t),\dot{q}_m(t)\right)\hat{\theta}_m=\hat{G}_m\left(q_m(t)\right)+\hat{F}_m\dot{q}_m(t)+\hat{F}_{cm}\left(\dot{q}_m(t)\right) \quad (۷)$$

$$Y_s\left(q_s(t),\dot{q}_s(t)\right)\hat{\theta}_s=\hat{G}_s\left(q_s(t)\right)+\hat{F}_s\dot{q}_s(t)+\hat{F}_{cs}\left(\dot{q}_s(t)\right) \quad (۸)$$

همچنین $P(X):R^{n\times1}\to R^{n\times1}$ تابع غیرخطی برداری با اعضای $p_i(x_i):R\to R$ می باشد. تابع $p_i(x_i)$ دارای ویژگی های زیر می باشد.

۱. اکیدا صعودی
۲. محدود
۳. پیوسته
۴. $p_i(0)=0$
۵. برای x های مثبت، مقعر و برای x های منفی محدب
۶. دارای مشتق مرتبه اول پیوسته حول مبدا
۷. $\left|p_i(x_i)\right|\le\left|x_i\right|$
۸. $p_i(-x_i)=-p_i(x_i)$
۹. $xp_i(x)\ge0$
۱۰. برای تمامی $x\in R$، $\left|p_i(x)\right|\le \min\left\{|x|,N_i\right\}$ می باشد که در آن $N_i\square\sup_{x\in R}p_i(x)$
۱۱. برای تمامی $x\in R$، $\frac{d}{dt}\left(p_i(x)\right)$ محدود می باشد.

حال با توجه به این شرایط و ویژگی هفتم دینامیک روبات ها، کنترل تطبیقی ارائه شده در (۵) و (۶) دارای کران بالا به صورت زیر می باشد:

$$\left|\tau_{m_i}(t)\right|\le N_i+\lambda_{\max}\left\{K_m\right\}N_i+B^{\Theta}_{Dm_i},i=1,\ldots,n \quad (۹)$$

$$\left|\tau_{s_i}(t)\right|\le N_i+\lambda_{\max}\left\{K_s\right\}N_i+B^{\Theta}_{Ds_i},i=1,\ldots,n \quad (۱۰)$$

در این رابطه $B^{\Theta}_{Dm_i}$ و $B^{\Theta}_{Ds_i}$ باندهای بالا ترم های کنترل تطبیقی موجود در روابط (۷) و (۸) می باشند که پیشتر در بخش دوم به آن پرداخته شد. قیدهای محرک که در رابطه (۴) بیان شده است، با انتخاب مناسب بهره های K_m و K_s، کران بالای تابع غیرخطی N_i و باندهای بالا ترم های تطبیقی به صورت زیر ارضا شده ودر نتیجه سیگنال های کنترلی تولید شده همواره در باند خطی محرک عمل می کنند.

$$N_i+\lambda_{\max}\left\{K_m\right\}N_i+B^{\Theta}_{Dm_i}\le M_i,i=1,\ldots,n \quad (۱۱)$$

$$N_i+\lambda_{\max}\left\{K_s\right\}N_i+B^{\Theta}_{Ds_i}\le M_i,i=1,\ldots,n \quad (۱۲)$$

با در نظر گرفتن روابط (۱۱) و (۱۲) و ترکیب کنترل کننده های (۵) و (۶) در معادلات دینامیکی (۱) و (۲)، معادلات حلقه بسته سیستم به صورت زیر بدست می آید.

$$M_m\left(q_m(t)\right)\ddot{q}_m(t)+C_m\left(q_m(t),\dot{q}_m(t)\right)\dot{q}_m(t)=\tau_h(t)+Y_m\left(q_m(t),\dot{q}_m(t)\right)\tilde{\theta}_m-P\left(q_m(t)-q_s\left(t-d_s(t)\right)\right)-K_mP\left(\dot{q}_m(t)\right) \quad (۱۳)$$

$$M_s\left(q_s(t)\right)\ddot{q}_s(t)+C_s\left(q_s(t),\dot{q}_s(t)\right)\dot{q}_s(t)=Y_s\left(q_s(t),\dot{q}_s(t)\right)\tilde{\theta}_s-\tau_e(t)-P\left(q_s(t)-q_m\left(t-d_m(t)\right)\right)-K_sP\left(\dot{q}_s(t)\right) \quad (۱۴)$$

در رابطه بالا $\tilde{\theta}=\hat{\theta}-\theta$ بیانگر خطای تخمین در پارامترهای روبات می باشد. در این مرحله می توان قانون کنترل تطبیقی زیر را برای تخمین پارامترهای نامعین به منظور استفاده از آنها در کنترل کننده مطرح نمود.

$$\hat{\theta}_j=S_{a_i}\left(\Phi_i\right),\ i\in\left\{m,s\right\} \quad (۱۵)$$

که در آن Φ_i به صورت زیر به روز می شود:

$$\dot{\Phi}_i=-\Gamma_iY_i^T\left(q_i(t),\dot{q}_i(t)\right)\dot{q}_i(t),\ i\in\left\{m,s\right\} \quad (۱۶)$$

در رابطه بالا برای $i\in\left\{m,s\right\}$، Γ_i ماتریس متقارن و مثبت معین می باشد. S_{a_m} و S_{a_s} توابع اشباع روبات های فرمانده و فرمانبر با باندهای θ_{Mj_m} و θ_{Mj_s} برای $j=1,\ldots,l$ می باشند که پیشتر در بخش دوم به آن پرداخته شد. این روش تخمین پارامترها (عبور پارامترهای تخمینی از تابع اشباع) محدود بودن پارامترهای تخمین و خطای تخمین را تضمین می نماید.

۵- بررسی کارآیی و تحلیل پایداری

در این بخش به بررسی پایداری سیستم حلقه بسته ، تحلیل ردیابی مجانبی موقعیت روبات ها و محاسبه معادله دینامیکی تخمین پیوسته و محدود پارامتر ناشناخته θ در سیستم تله اپراتوری غیرخطی دوطرفه که مقید به مساله اشباع در محرک ها می باشد، پرداخته می شود. در ابتدا چند لم کاربردی که در اثبات قضیه ۱و۲ مورد نیاز می باشند، آورده شده است.

لم۱: (لم باربالات) برای هرتابع $f:[0\infty]\to R^n$، اگر $f(t)\in L_\infty\cap L_2$ و $\dot{f}(t)\in L_\infty$ در این صورت $\lim_{t\to\infty}f(t)=0$ [۲۱].

لم۲: اگر تابع مشتق $f(t)$ دارای حد محدودی باشد و $\dot{f}(t)$ نیز پیوستگی یکنواخت داشته باشد، آنگاه $\lim_{t\to\infty}\dot{f}(t)=0$ [۲۲].

لم۳: برای تمامی $d(t)\in R\ge0,\ x(t)\in R\ge0$ رابطه زیر برقرار است[۱۶].

$$p_i\left(\int_{t-d(t)}^{t}x(\tau)d\tau\right)\le\int_{t-d(t)}^{t}p_i\left(x(\tau)\right)d\tau \quad (۱۷)$$

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.3.0]

لم۴ : برای توابع برداری $A(t), B(t) \in R^n$ و به ازای تمامی توابع محدود $0 \le d(t) \le d_M$ نامساوی زیر برقرار است[۱۶].

$$A^T(t)\int_{t-d(t)}^{t} P(B(\tau))d\tau - \int_{t-d(t)}^{t} B^T(\tau)P(B(\tau))d\tau \le d_M A^T(t)P(A(t)) \quad (۱۸)$$

لم۵ : برای توابع برداری $q_m(t)$ و $q_s(t)$ و برای تمامی توابع مثبت $d_m(t)$ و $d_s(t)$، نامساوی زیر برقرار است[۱۶].

$$\begin{aligned} &\dot{q}_m^T(t)\left(P(q_m(t)-q_s(t))-P(q_m(t)-q_s(t-d_s(t)))\right) \\ &\le 2\left|\dot{q}_m(t)\right|^T \int_{t-d_s(t)}^{t} P(|\dot{q}_s(\tau)|)d\tau \\ &\dot{q}_s^T(t)\left(P(q_s(t)-q_m(t))-P(q_s(t)-q_m(t-d_m(t)))\right) \\ &\le 2\left|\dot{q}_s(t)\right|^T \int_{t-d_m(t)}^{t} P(|\dot{q}_m(\tau)|)d\tau \end{aligned} \quad (۱۹)$$

قضیه ۱. در سیستم تله اپراتوری(۱) و(۲) با کنترل کننده های (۵) و (۶) و قانون تطبیقی (۱۵) و (۱۶)، به ازای تمامی تاخیرهای متغیر با زمان و محدود $d_m(t)$ و $d_s(t)$ که مقید به قیدهای زیر می باشند و با فرض اینکه کاربر و محیط کاری پسیو باشند، قیود محرک ها ارضا و سیستم حلقه بسته پایدار بوده و سرعت های $\dot{q}_m(t)$ و $\dot{q}_s(t)$ و خطای موقعیت $q_m(t)-q_s(t)$ محدود می باشند.

- $(d_{mmax}+d_{smax}) < \dfrac{\lambda_{\min}\{K_m\}}{2}$
- $(d_{mmax}+d_{smax}) < \dfrac{\lambda_{\min}\{K_s\}}{2}$
- $N_i + \lambda_{\max}\{K_m\}N_i + B_{Dm_i}^{\Theta} \le M_i, i=1,\ldots,n$
- $N_i + \lambda_{\max}\{K_s\}N_i + B_{Ds_i}^{\Theta} \le M_i, i=1,\ldots,n$

در قیدهای فوق $d_{mmax} \triangleq \sup_{t\in R} d_m(t)$ و $d_{smax} \triangleq \sup_{t\in R} d_s(t)$ می باشد.

اثبات قضیه ۱:

برای اثبات پایداری سیستم حلقه بسته (۱۳) و (۱۴)، تابع لیاپانوف- کراسفسکی به صورت زیر تعریف می گردد:

$$V(t) = V_1(t)+V_2(t)+V_3(t)+V_4(t)+V_5(t) \quad (۲۰)$$

که در آن

$$V_1(t) = \frac{1}{2}\dot{q}_m^T M_m(q_m)\dot{q}_m + \frac{1}{2}\dot{q}_s^T M_s(q_s)\dot{q}_s \quad (۲۱)$$

$$V_2(t) = \int_0^t \left(-\dot{q}_m(\tau)\tau_h(\tau)+\dot{q}_s(\tau)\tau_e(\tau)\right)d\tau \quad (۲۲)$$

$$V_3(t) = \sum_{i=1}^{n}\int_0^{q_{mi}(t)-q_{si}(t)} p_i(\gamma_i)\,d\gamma_i \quad (۲۳)$$

$$\begin{aligned} V_4(t) &= 2\int_{-d_{m\max}}^{0}\int_{t+\gamma}^{t} \dot{q}_m^T(\eta)P(\dot{q}_m(\eta))d\eta d\gamma \\ &+ 2\int_{-d_{s\max}}^{0}\int_{t+\gamma}^{t} \dot{q}_s^T(\eta)P(\dot{q}_s(\eta))d\eta d\gamma \end{aligned} \quad (۲۴)$$

$$\begin{aligned} V_5(t) &= \sum_{j=1}^{l}\int_0^{\varphi_{mj}(t)} \gamma_{mj}^{-1}\tilde{s}_{a_{mj}}(\eta)\,d\eta \\ &+ \sum_{j=1}^{l}\int_0^{\varphi_{sj}(t)} \gamma_{sj}^{-1}\tilde{s}_{a_{sj}}(\eta)\,d\eta \end{aligned} \quad (۲۵)$$

که در آن، γ_{mj} و γ_{sj} مقادیر ثابت مثبت می باشند. $\varphi_{mj}(t)$ و $\varphi_{sj}(t)$ عضوهای j ام بردارهای Φ_m و Φ_s بوده و $\tilde{s}_{a_{mj}}(.)$ و $\tilde{s}_{a_{sj}}(.)$ عضوهای j ام بردارهای $\tilde{S}_{a_m}(\Phi_m)$ و $\tilde{S}_{a_s}(\Phi_s)$ می باشند، که به صورت زیر تعریف می گردند.

$$\tilde{S}_{a_i}(\Phi_i) = S_{a_i}(\Phi_i) - S_{a_i}(\Phi^*{}_i) = \hat{\theta}_i - \theta_i = \tilde{\theta}_i \quad , i \in \{m,s\} \quad (۲۶)$$

با فرض پسیو بودن کاربر و محیط کاری روابط زیر برقرار است.

$$\int_0^t -\dot{q}_m(\tau)\tau_h(\tau)d\tau \ge 0,$$

$$\int_0^t \dot{q}_s(\tau)\tau_e(\tau)d\tau \ge 0$$

بنابراین $V_2(t)$ یک تابع مثبت معین می باشد. همچنین با توجه به فرد بودن تابع $p_i(\gamma_i)$، انتگرال این تابع از صفر تا اعداد مثبت و یا منفی همواره مثبت می باشد. بنابراین تابع $V_3(t)$ نیز مثبت معین است. مثبت معین بودن تابع $V_5(t)$ مشابه تابع $V_3(t)$ و براساس ویژگی های تابع اشباع اثبات می شود. تابع $V_4(t)$ نیز براساس ویژگی ۹ تابع غیرخطی $p_i(\gamma_i)$، انتگرال تابع همواره مثبت می باشد، بنابراین این تابع نیز مثبت معین بوده و در نتیجه مثبت معین بودن تابع $V(t)$ اثبات می شود.

با مشتق گیری از معادله $V_1(t)$ و با توجه به ویژگی۲- قسمت ب می توان نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{q}_m^T\left[Y_m(q_m,\dot{q}_m)\tilde{\theta}_m + \tau_h(t)\right] \\ &-\dot{q}_m^T\left[K_m P(\dot{q}_m) + P\left(q_m(t)-q_s(t-d_s(t))\right)\right] \\ &+\dot{q}_s^T\left[Y_s(q_s,\dot{q}_s)\tilde{\theta}_s - \tau_e(t)\right] \\ &-\dot{q}_s^T\left[K_s P(\dot{q}_s) + P\left(q_s(t)-q_m(t-d_m(t))\right)\right] \end{aligned} \quad (۲۷)$$

با استفاده از معادله (۲۶) و ویژگی هشتم تابع غیر خطی P، مجموع مشتق توابع لیاپانوف به صورت زیر بازنویسی می گردد.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1+\dot{V}_2+\dot{V}_3 &= \dot{q}_m^T Y_m(q_m,\dot{q}_m)\tilde{S}_{a_m}(\Phi_m) \\ &+\dot{q}_m^T\left(P(q_m-q_s)-P\left(q_m(t)-q_s(t-d_s(t))\right)\right) \\ &+\dot{q}_s^T Y_s(q_s,\dot{q}_s)\tilde{S}_{a_s}(\Phi_s) \\ &+\dot{q}_s^T\left(P(q_s-q_m)-P\left(q_s(t)-q_m(t-d_m(t))\right)\right) \\ &-\dot{q}_m^T K_m P(\dot{q}_m) - \dot{q}_s^T K_s P(\dot{q}_s) \end{aligned} \quad (۲۸)$$

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.3.0]

مشتق زمانی $V_5(t)$ نیز به صورت زیر می باشد.

$$\dot{V}_5 = \dot{\Phi}_m^T \Gamma_m^{-1} \tilde{S}_{a_m}(\Phi_m) + \dot{\Phi}_s^T \Gamma_s^{-1} \tilde{S}_{a_s}(\Phi_s) \qquad (۲۹)$$

که در آن Γ_m و Γ_s ماتریس های مثبت و قطری با عناصر γ_{mj} و γ_{sj} می باشند. با اعمال قانون کنترل تطبیقی (۱۵) و (۱۶) به مجموع مشتق های فوق داریم:

$$\begin{aligned}&\dot{V}_1+\dot{V}_2+\dot{V}_3+\dot{V}_5\\&=\dot{q}_s^T\left(P(q_s-q_m)-P\left(q_s(t)-q_m\left(t-d_m(t)\right)\right)\right)\\&+\dot{q}_m^T\left(P(q_m-q_s)-P\left(q_m(t)-q_s\left(t-d_s(t)\right)\right)\right)\\&-\dot{q}_m^T K_m P(\dot{q}_m)-\dot{q}_s^T K_s P(\dot{q}_s)\end{aligned} \qquad (۳۰)$$

با اعمال لم ۵ به دو جمله اول معادله و استفاده از ویژگی های ماتریس P، رابطه (۳۰) به صورت زیر ساده می شود.

$$\begin{aligned}&\dot{V}_1+\dot{V}_2+\dot{V}_3+\dot{V}_5\\&\le+2|\dot{q}_m|^T\int_{t-d_s(t)}^{t}P\left(|\dot{q}_s(\tau)|\right)d\tau\\&+2|\dot{q}_s|^T\int_{t-d_m(t)}^{t}P\left(|\dot{q}_m(\tau)|\right)d\tau\\&-\lambda_{\min}\{K_m\}\dot{q}_m^T P(\dot{q}_m)-\lambda_{\min}\{K_s\}\dot{q}_s^T P(\dot{q}_s)\end{aligned} \qquad (۳۱)$$

از طرفی مشتق زمانی $V_4(t)$ نیز به صورت زیر می باشد.

$$\begin{aligned}&\dot{V}_4=2d_{mmax}\dot{q}_m^T P(\dot{q}_m)+2d_{smax}\dot{q}_s^T P(\dot{q}_s)\\&-2\int_{t-d_m(t)}^{t}\dot{q}_m^T(\tau)P\left(\dot{q}_m(\tau)\right)d\tau\\&-2\int_{t-d_s(t)}^{t}\dot{q}_s^T(\tau)P\left(\dot{q}_s(\tau)\right)d\tau\end{aligned} \qquad (۳۲)$$

با در نظر گرفتن معادلات (۳۱) و(۳۲)، مشتق تابع لیاپانوف $V(t)$ به صورت زیر نوشته می شود.

$$\begin{aligned}&\sum_{i=1}^{5}\dot{V}_i\le 2|\dot{q}_m|^T\int_{t-d_s(t)}^{t}P\left(|\dot{q}_s(\tau)|\right)d\tau\\&+2|\dot{q}_s|^T\int_{t-d_m(t)}^{t}P\left(|\dot{q}_m(\tau)|\right)d\tau\\&-\lambda_{\min}\{K_m\}\dot{q}_m^T P(\dot{q}_m)-\lambda_{\min}\{K_s\}\dot{q}_s^T P(\dot{q}_s)\\&+2d_{mmax}\dot{q}_m^T P(\dot{q}_m)+2d_{smax}\dot{q}_s^T P(\dot{q}_s)\\&-2\int_{t-d_m(t)}^{t}\dot{q}_m^T(\tau)P\left(\dot{q}_m(\tau)\right)d\tau\\&-2\int_{t-d_s(t)}^{t}\dot{q}_s^T(\tau)P\left(\dot{q}_s(\tau)\right)d\tau\end{aligned} \qquad (۳۳)$$

با اعمال لم ۴ به معادله (۳۳)، داریم:

$$\begin{aligned}&\dot{V}\le 2(d_{mmax}+d_{smax})\dot{q}_m^T P(\dot{q}_m)\\&+2(d_{mmax}+d_{smax})\dot{q}_s^T P(\dot{q}_s)\\&-\lambda_{\min}\{K_m\}\dot{q}_m^T P(\dot{q}_m)-\lambda_{\min}\{K_s\}\dot{q}_s^T P(\dot{q}_s)\end{aligned} \qquad (۳۴)$$

این رابطه را می توان به صورت زیر ساده نمود.

$$\begin{aligned}\dot{V}&\le\dot{q}_m^T P(\dot{q}_m)\left[2(d_{mmax}+d_{smax})-\lambda_{\min}\{K_m\}\right]\\&+\dot{q}_s^T P(\dot{q}_s)\left[2(d_{mmax}+d_{smax})-\lambda_{\min}\{K_s\}\right]\end{aligned} \qquad (۳۵)$$

حال باید شرایط را به گونه ای یافت که همواره $\dot{V}\le 0$ باشد. با توجه با رابطه (۳۵) شرط کافی برای اینکه $\dot{V}\le 0$ به صورت زیر می باشد.

$$\begin{aligned}(d_{mmax}+d_{smax})&<\frac{\lambda_{\min}\{K_m\}}{2}\\(d_{mmax}+d_{smax})&<\frac{\lambda_{\min}\{K_s\}}{2}\end{aligned} \qquad (۳۶)$$

با استفاده از تحلیل بالا می توان به این نتیجه رسید که در صورتی که شرایط معادله (۳۶) برای ترم های تاخیر مسیر پیشرو و پس رو برقرار باشد، $\dot{V}\le 0$خواهد بود و سیستم پایدار بوده و تمامی عبارات موجود در $V(t)$ محدود می باشند. بنابراین $q_m-q_s,\ \dot{q}_m,\dot{q}_s,\tilde{\theta}_m,\tilde{\theta}_s\in L_\infty$ بوده و بدین ترتیب اثبات کامل می شود.

□

قضیه ۲. در سیستم تله اپراتوری(۱) و(۲) با کنترل کننده های (۵) و (۶) و قانون تطبیقی (۱۵) و (۱۶) در حرکت آزاد، قدر مطلق سرعت های $|\dot{q}_m|$و $|\dot{q}_s|$ و خطای ردیابی موقعیت $q_m(t)-q_s\left(t-d_s(t)\right)$ و $q_s(t)-q_m\left(t-d_m(t)\right)$ به صورت مجانبی به سمت صفر میل می کنند؛ اگر تمام شرایط قضیه ۱ برقرار بوده و $\dot{d}_s(t)$و$\dot{d}_m(t)$ نیز محدود باشند.

اثبات قضیه ۲:

با انتگرال گیری از رابطه (۳۵) می توان نتیجه گرفت که $\dot{q}_m,\dot{q}_s\in L_2$ می باشند. با توجه به نتایج قضیه ۱ نیز $\dot{q}_m,\dot{q}_s,q_m-q_s,\tilde{\theta}_m,\tilde{\theta}_s\in L_\infty$ می باشند. محدود بودن این سیگنال ها، محدود بودن تابع رگرسیون را نیز تضمین می نماید. با توجه به اینکه

$$q_m(t)-q_s\left(t-d_s(t)\right)=q_m(t)-q_s(t)+\int_{t-d_s(t)}^{t}\dot{q}_s(t)dt$$

و $\int_{t-d_s(t)}^{t}\dot{q}_s(t)dt\in L_\infty$ می باشد، می توان نتیجه گرفت که $q_m(t)-q_s\left(t-d_s(t)\right)\in L_\infty$ می باشد. همچنین به صورت مشابه $q_s(t)-q_m\left(t-d_m(t)\right)\in L_\infty$ می باشد. با توجه به محدود بودن $\hat{\theta}_m,\hat{\theta}_s,q_s(t)-q_m\left(t-d_m(t)\right),\dot{q}_m,\dot{q}_s,q_m(t)-q_s\left(t-d_s(t)\right)$، کنترل کننده های Y_m,Y_s و τ_m و τ_s محدود می باشند. باتوجه به ویژگی اول و دوم دینامیک روبات ها و محدود بودن کنترل کننده ها، می توان دید که $\ddot{q}_m\in L_\infty$ و $\ddot{q}_s$ می باشند. با توجه به اینکه $\dot{q}_m,\dot{q}_s\in L_2$ می باشند، با استفاده از قضیه باربالات می توان نتیجه گرفت که $\dot{q}_m\to 0$ و $\dot{q}_s\to 0$.

اگر بتوان ثابت نمود که $\ddot{q}_m\to 0$ و $\ddot{q}_s\to 0$، اثبات اینکه خطای ردیابی موقعیت به سمت صفر میل می کند ساده خواهد بود. برای این

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.3.0]

منظور ابتدا باید نشان داد $\ddot{q}_m$ و $\ddot{q}_s$ پیوسته می باشند یا به عبارت دیگر $\ddot{q}_m \in \mathrm{L}_\infty$ و $\ddot{q}_s$ می باشند. سیستم کنترل حلقه بسته به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}\ddot{q}_m &= M_m(q_m)^{-1}\{-C_m(q_m,\dot{q}_m)\dot{q}_m \\ &+Y_m(q_m,\dot{q}_m)\tilde{\theta}_m - P(e_m) - K_m P(\dot{q}_m)\} \\ \ddot{q}_s &= M_s(q_s)^{-1}\{-C_s(q_s,\dot{q}_s)\dot{q}_s \\ &+Y_s(q_s,\dot{q}_s)\tilde{\theta}_s - P(e_s) - K_s P(\dot{q}_s)\}\end{aligned} \qquad (۳۷)$$

با مشتق گیری از این رابطه و با استفاده از ویژگی یک و دو دینامیک روبات ها و محدود بودن $\dot{q}_m$ و $\dot{q}_s$ به راحتی می توان دید که $\frac{d}{dt}\left(M_m(q_m)\right)^{-1}$ و $\frac{d}{dt}\left(M_s(q_s)\right)^{-1}$ نیز محدود می باشند. با توجه به محدود بودن $\dot{P}(.)$ ویژگی یک، دو، سه، شش و هفت دینامیک روبات ها و همچنین محدود بودن $\ddot{q}_s, q_m(t)-q_s(t-d_s(t)), q_s(t)-q_m(t-d_m(t)), \dot{q}_m, \dot{q}_s, \ddot{q}_m$ $\ddot{q}_m, \ddot{q}_s \in \mathrm{L}_\infty$ می توان نتیجه گرفت $\dot{\tilde{\theta}}_m, \dot{\tilde{\theta}}_s, \dot{d}_m, \dot{d}_s$ می باشند. با توجه به اینکه $\dot{q}_m \to 0$ و $\dot{q}_s \to 0$ و $\ddot{q}_m, \ddot{q}_s \in \mathrm{L}_\infty$ با استفاده از قضیه باربالات می توان نتیجه گرفت که $\ddot{q}_m \to 0$ و $\ddot{q}_s \to 0$. بنابراین داریم:

$$\begin{aligned}&\left|q_m(t)-q_s(t-d_s(t))\right| \to 0 \\ &\left|q_s(t)-q_m(t-d_m(t))\right| \to 0\end{aligned} \qquad (۳۸)$$

با توجه به معادله های زیر:

$$\begin{aligned}&q_s(t)-q_m(t-d_m(t)) \\ &= q_s(t)-q_m(t)+\int_{t-d_m(t)}^{t}\dot{q}_m(\tau)\,d\tau \\ &q_m(t)-q_s(t-d_s(t)) \\ &= q_m(t)-q_s(t)+\int_{t-d_s(t)}^{t}\dot{q}_s(\tau)\,d\tau\end{aligned} \qquad (۳۹)$$

از آنجایی که $\dot{q}_m \to 0, \dot{q}_s \to 0, q_s(t)-q_m(t-d_m(t)) \to 0$ و $q_m(t)-q_s(t-d_s(t)) \to 0$ می توان ثابت کرد $q_m(t)-q_s(t) \to 0$ و $q_s(t)-q_m(t) \to 0$.
بدین ترتیب همگرایی سرعت ها و خطای ردیابی موقعیت روبات ها به سمت صفر بدست می آید و اثبات کامل می شود.

□

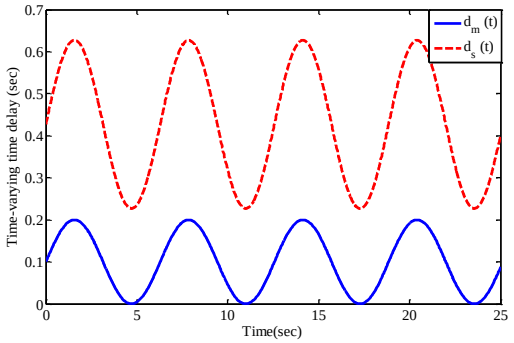
۶- نتایج شبیه سازی

برای بررسی بیشتر نتایج نظری و کارآیی ساختار کنترلی پیشنهادی به دست آمده، در این بخش روبات های فرمانده و فرمانبر را به صورت روبات های صفحه ای با مفصل های دورانی و دو درجه آزادی در نظر می گیریم. این روبات ها از طریق کانال های انتقال اطلاعات عمومی (تاخیر نامتقارن و متغیر با زمان) به یکدیگر مرتبط می باشند. در شبیه سازی انجام شده، پارامترهای فیزیکی روبات ها $l_{m_1}=l_{m_2}=1m, l_{s1}=l_{s2}=1\mathrm{m}, m_{s_1}=3.4\mathrm{kg}, m_{s_2}=0.25\mathrm{kg}$ $k_{m_1}=k_{s_1}=5,\ k_{m_2}=k_{s_2}=4, m_{m1}=4\mathrm{kg}, m_{m2}=0.5\mathrm{kg},$ $f_{d_{m1}}=f_{d_{s1}}=3, f_{d_{m_2}}=f_{d_{s2}}=4$ که در آن برای $i\in\{m,s\}$، l_{i_1} و l_{i_2} طول لینک ها، m_{i_1} و m_{i_2} جرم لینک های اول و دوم، $f_{d_{i1}}$ و $f_{d_{i2}}$ ضرایب اصطکاک ویسکوز و k_{i_1} و k_{i_2} ضرایب اصطکاک کولمبی در روبات های فرمانده و فرمانبر می باشند . همچنین حدود اشباع محرک ها برای لینک اول و دوم روبات های فرمانده و فرمانبر به ترتیب 62N.m و 40N.m در نظر گرفته شده اند. پارامترهای قانون کنترل تطبیقی به صورت $\mathrm{S}_{\mathrm{a_s}}(\Phi_s) = \mathrm{sign}(\Phi_s)\min\{|\Phi_s|,\theta_{M_s}\}$ $\mathrm{S}_{\mathrm{a_m}}(\Phi_m) = \mathrm{sign}(\Phi_m)\min\{|\Phi_m|,\theta_{M_m}\}$ $\Gamma_m = 100, \theta_{M_m}^T = (3.43\ 30.9\ 4.2\ 5.6\ 7\ 5.6)$ و $\Gamma_s = 20, \theta_{M_s}^T = (1.7\ 25.06\ 4.2\ 5.6\ 7\ 5.6)$ انتخاب شده اند. با استفاده از این مقادیر، $B_{Dm_1}^{\Theta}=49.73$ ، $B_{Dm_2}^{\Theta}=20.$ ، $B_{Ds_1}^{\Theta}=42.18$ و $B_{Ds_2}^{\Theta}=18.51$ محاسبه می گردند. تابع غیر خطی $P(.)$ که در کنترل کننده های (۵) و (۶) وجود دارد به صورت $\tan^{-1}(.)$ انتخاب می شود که تمامی ویژگی مورد نظر تابع غیرخطی $P(.)$ را دارا و $N_i=\frac{\pi}{2}$ می باشد. با استفاده از ماکزیمم دامنه محرک ها، $B_{Ds_i}^{\Theta}$، $B_{Dm_i}^{\Theta}$ و N_i، نامساوی های (۱۱) و (۱۲) با انتخاب $K_m = K_s = 10I$ ارضا می گردد.

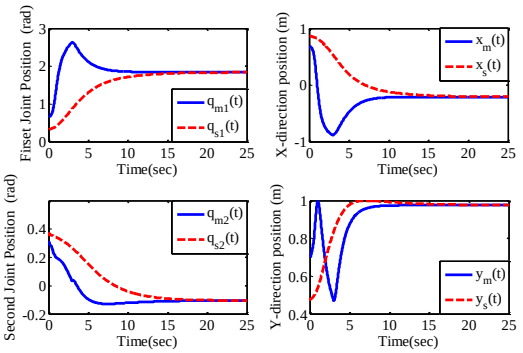
در این شبیه سازی، تاخیرهای زمانی مسیر رفت و برگشت به صورت $d_m(t)=0.1+0.1\sin(4t)$ و $d_s(t)=0.427+1\ 0.2(\sin$ که نامتقارن و متغیر با زمان می باشند، در نظر گرفته شده اند. حالت اولیه موقعیت و سرعت روبات های فرمانده و فرمانبر به صورت $\dot{q}_s(0)=[0\ 0]^T, q_m(0)=[0.2\pi\ 0.1\pi]^T, \dot{q}_m(0)=[0\ 0]^T$ و $q_s(0)=[0.1\pi\ 0.12\pi]^T$ و تخمین اولیه پارامترهای کنترل تطبیقی به صورت $\Phi_m^T(0)=[2.94\ 26.48\ 3.6\ 4.8\ 6\ 4.8]$ و $\Phi_s^T(0)=[1.47\ 21.48\ 3.6\ 4.8\ 6\ 4.8]$ انتخاب شده اند. نیروی اعمالی از طرف کاربر که به روبات فرمانده وارد می شود در زمانهای بین ۰ تا ۰,۵ ثانیه صفر بوده و سپس به ۱۰ نیوتن افزایش یافته و در زمانهای ۰,۵ تا ۳ ثانیه ثابت باقی می ماند و سپس در زمان سه ثانیه کاهش یافته تا به صفر می رسد. نتایج شبیه سازی در شکل های (۱) تا (۸) نشان داده شده است. تاخیرهای نامتقارن و متغییر بازمان $d_m(t)$ و $d_s(t)$ در شکل (۱) نشان داده شده است. کیفیت ردیابی موقعیت مفاصل بین روبات های فرمانده و فرمانبر، ردیابی موقعیت مجری نهایی در فضای کاری و خطای ردیابی در شکل های (۲) و (۳) نشان داده شده است. سرعت زاویه ای روبات های فرمانده و فرمانبر در شکل (۴) و شکل (۵) گشتاورهای کنترلی مورد نیاز روبات های فرمانده و فرمانبر را نشان می دهد. تخمین پارامترهای نامعین روبات های فرمانده و فرمانبر در شکل های (۶) تا (۸) مشخص شده است. همان طور که از شکلهای (۲) و

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.3.0]

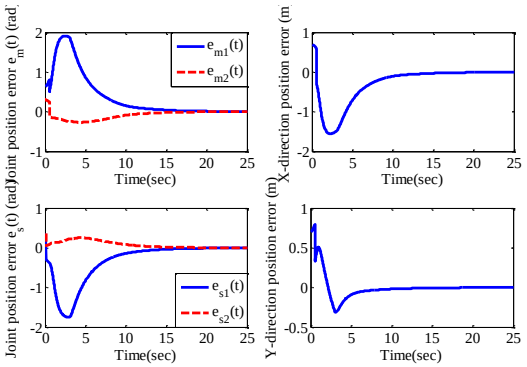
(۳) می توان دید، روبات فرمانبر در فضای مفصلی و فضای کاری از روبات فرمانده پیروی نموده و خطای ردیابی به سمت صفر میل می نماید.



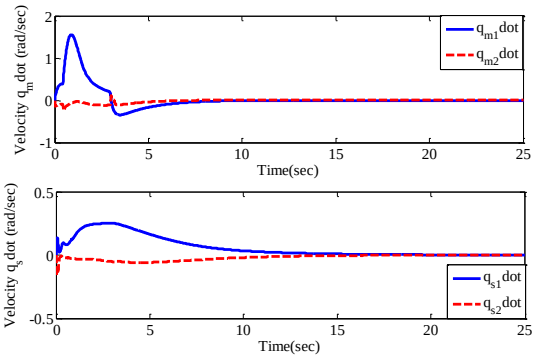
شکل۱: تاخیرهای زمانی نامتقارن و متغییر با زمان مسیرهای رفت و برگشت اطلاعات در کانال ارتباطی



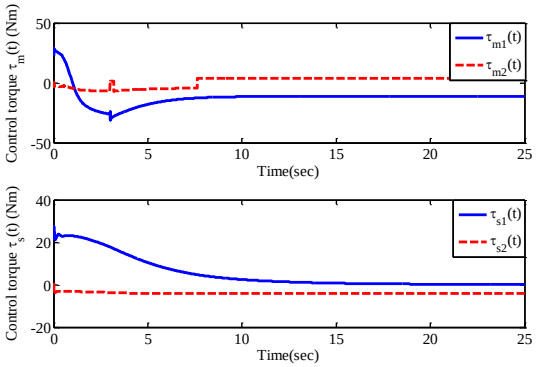
شکل۲: ردیابی موقعیت روبات های فرمانده و فرمانبر تحت کنترل کننده تطبیقی محدود در فضای مفصلی و کاری



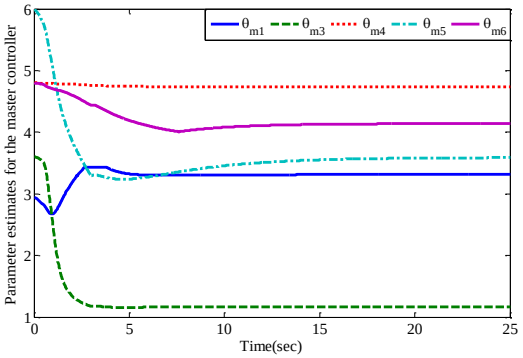
شکل۳. خطای ردیابی موقعیت روبات های فرمانده و فرمانبر تحت کنترل کننده تطبیقی



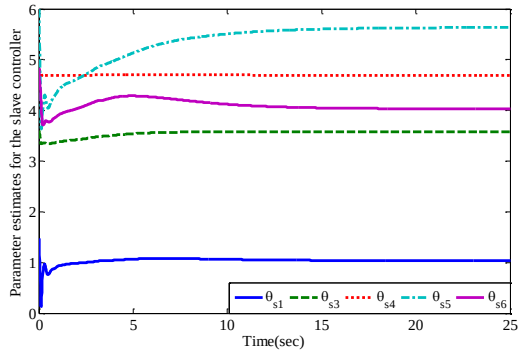
شکل۴: سرعت زاویه ای روبات های فرمانده و فرمانبر



شکل۵:گشتاورهای کنترلی روبات های فرمانده و فرمانبر

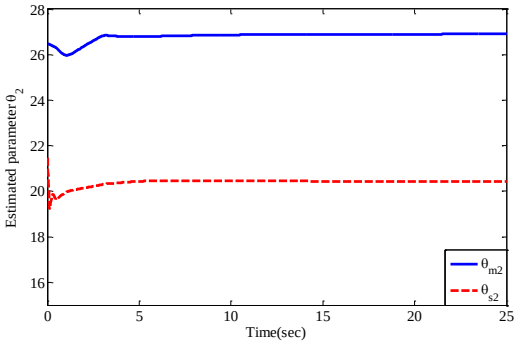


شکل۶: تخمین پارامترهای نامعین در روبات فرمانده $\hat{\theta}_m$



شکل۷: تخمین پارامترهای نامعین در روبات فرمانبر $\hat{\theta}_s$

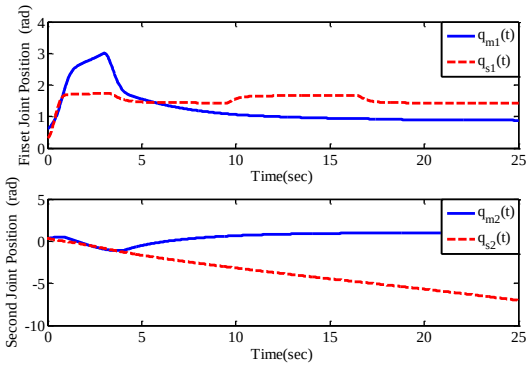
[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.3.0]



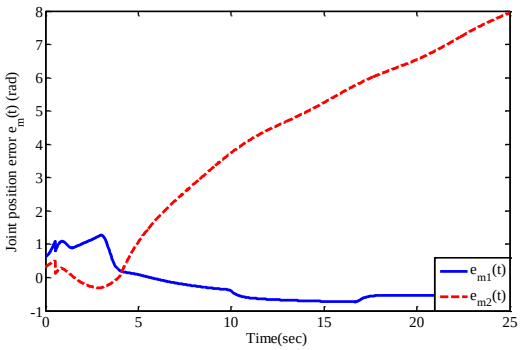
شکل۸: تخمین پارامتر نامعین $\hat{\theta}_{m_2}$ و $\hat{\theta}_{s_2}$ در روبات های فرمانده و فرمانبر

از شکل (۴) می توان مشاهده نمود که سرعت زوایه ای روبات های فرمانده و فرمانبر به سمت صفر میل می نماید. همچنین سیگنالهای کنترلی روبات های فرمانده و فرمانبر براساس شکل (۵) کمتر از محدوده اشباع محرک ها در هر لینک می باشند.

برای مشاهده اثر ترم کنترل تطبیقی و پدیده اشباع محرک ها در کیفیت ردیابی و ناپایداری سیستم حلقه بسته در ادامه دو سناریو در نظر گرفته می شود. در سناریو اول مشابه مقاله غیر تطبیقی [۱۶]، نامعینی ها در طراحی کنترل کننده لحاظ نمی شود. در سناریو دوم کنترل کننده تطبیقی P+D را یک بار بدون در نظر گرفتن اشباع در محرک ها و بار دیگر با در نظر رفتن اشباع در محرک های روبات ها به سیستم تله اپراتوری اعمال می نماییم. نتایج این حالت ها در شکل های (۹) تا (۱۴) نشان داده شده است.

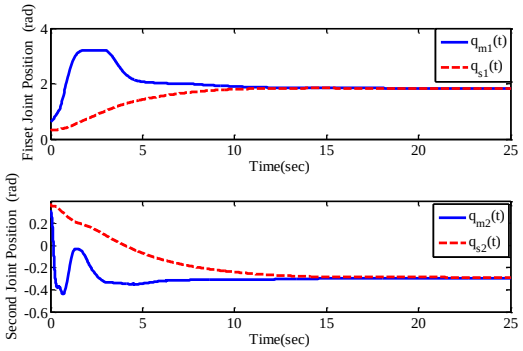


شکل۹: ردیابی موقعیت روبات های فرمانده و فرمانبر در سیستم تله اپراتوری مقید به اشباع محرک ها و بدون استفاده از قانون کنترل تطبیقی در کنترل کننده nP+nD

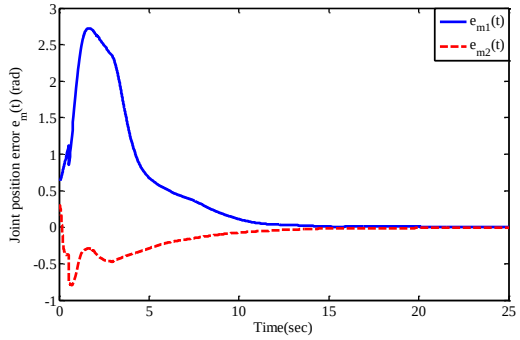


شکل۱۰: خطای ردیابی موقعیت روبات های فرمانده و فرمانبر در سیستم تله اپراتوری مقید به اشباع محرک ها و بدون استفاده از قانون کنترل تطبیقی در کنترل کننده nP+nD

همان طور که از شکلهای (۹) و (۱۰) می توان دید، در نظر نگرفتن نامعینی ها در طراحی کنترل کننده (مشابه مقاله [۱۶]) منجر به ناپایداری و از بین رفتن ردیابی موقعیت روبات های فرمانده و فرمانبر شده، در صورتی که ساختار کنترلی ارائه شده در این مقاله در برخورد با نامعینی ها، مساله اشباع محرک ها و تاخیر زمانی متغیر و نامتقارن رفتار مقاوم تری داشته و پایداری سیستم و ردیابی مجانبی موقعیت مفاصل را تضمین می نماید.

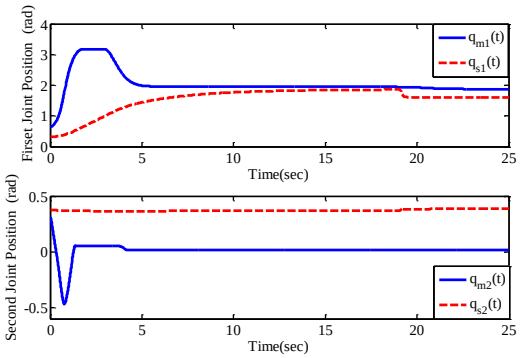


شکل ۱۱: ردیابی موقعیت روبات های فرمانده و فرمانبر در سیستم تله اپراتوری که مقید به اشباع محرک ها نمی باشد و توسط کنترل کننده تطبیقی P+D کنترل می شود.

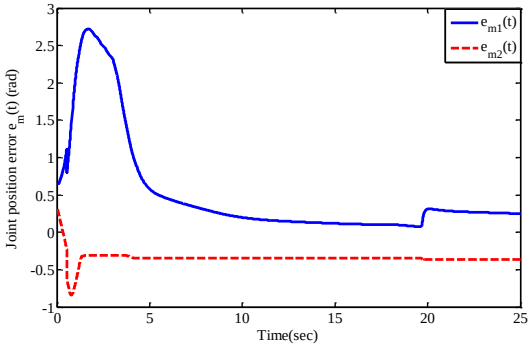


شکل۱۲: خطای ردیابی موقعیت روبات های فرمانده و فرمانبر در سیستم تله اپراتوری که مقید به اشباع محرک ها نمی باشد و توسط کنترل کننده تطبیقی P+D کنترل می شود.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.3.0]



شکل۱۳: ردیابی موقعیت روبات های فرمانده و فرمانبر در سیستم تله اپراتوری که مقید به اشباع محرک ها می باشد و توسط کنترل کننده تطبیقی P+D کنترل می شود.



شکل۱۴: خطای ردیابی موقعیت روبات های فرمانده و فرمانبر در سیستم تله اپراتوری که مقید به اشباع محرک ها می باشد و توسط کنترل کننده تطبیقی P+D کنترل می شود.

همانگونه که از شکل های (۱۱) تا (۱۴) می توان دید، کنترل کننده تطبیقیP+D که در مراجع [۶, ۷, ۲۳, ۲۴] جهت کنترل سیستم های تله اپراتوری استفاده شده است، در صورت نبود پدیده اشباع می تواند پایداری و ردیابی مجانبی موقعیت مفصل های روبات های فرمانده و فرمانبر را تضمین نماید ولی در صورت وجود پدیده اشباع در محرک های روبات ها، گشتاورهای کنترلی فرمانبر و فرمانبر که توسط کنترل کننده تطبیقی P+D تولید شده است در برخی از بازه های زمانی از سطوح اشباع محرک ها عبور کرده و بدین ترتیب گشتاورهای اعمالی به روبات ها در سطوح اشباع ثابت باقی می مانند. بنابراین این کنترل کننده در تضمین ردیابی مجانبی موقعیت روبات ها و در برخی از موارد نیز در تضمین پایداری سیستم های تله اپراتوری می تواند با مشکل مواجه شود.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله کنترل کننده تطبیقی محدود برای سیستم های تله اپراتوری غیرخطی طراحی گردید. هدف از ارائه این کنترل کننده رویارویی با مساله اشباع محرک ها، تاخیر زمانی متغیر و نامتقارن و نامعینی های دینامیکی در این سیستم ها می باشد. ساختار کنترل کننده پیشنهادی به صورت یک کنترل کننده تناسبی- مشتق گیر غیرخطی (nP+nD) به همراه جمله های کنترل تطبیقی محدود می باشد. مقایسه عملکرد این کنترل کننده با کنترل کننده غیر تطبیقی(nP+nD) و تطبیقی (P+D) نشان می دهد که ساختارهای مذکور به ترتیب در مواجه با نامعینی ها و مساله اشباع محرک ها عملکرد مناسبی نداشته و می توانند باعث از بین رفتن ردیابی موقعیت و یا ناپایداری سیستم گردند، در صورتی که ساختار کنترلی ارائه شده در این مقاله در برخورد با این موارد عملکرد بهتری داشته و پایداری سیستم ، ردیابی مجانبی موقعیت مفاصل و محدود ماندن سیگنال های کنترلی را تضمین می نماید. از طرح های در دست بررسی کاهش محافظه کاری در طراحی کنترل کننده می باشد که در این صورت محدودیت کمتری در مورد پارامترهای کنترلی و محدوده اشباع محرک ها ایجاد گردد.

مراجع

[1] F. Hashemzadeh, I. Hassanzadeh, M. Tavakoli, and G. Alizadeh, "Adaptive control for state synchronization of nonlinear haptic telerobotic systems with asymmetric varying time delays," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 68, pp. 245-259, 201.۲

[2] Z. Li, Y. Xia, and X. Cao, "Adaptive control of bilateral teleoperation with unsymmetrical time-varying delays," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 9, pp. 753-767, 2013.

[3] E. Nuño, R. Ortega, and L. Basañez, "An adaptive controller for nonlinear teleoperators," *Automatica*, vol. 46, pp. 155-159, 2010.

[4] I. Sarras, E. Nuño, and L. Basañez, "An adaptive controller for nonlinear teleoperators with variable time-delays," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 351, pp. 4817-4837, 2014.

[5] B.-Y. Kim and H.-S. Ahn, "A design of bilateral teleoperation systems using composite adaptive controller," *Control Engineering Practice*, vol. 21, pp. 1641-1652, 2013.

[6] S. Islam, P. X. Liu, A. E. Saddik, and Y. B. Yang" ,Bilateral Control of Teleoperation Systems With Time Delay," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. PP, pp. 1-12, 2014.

[7] S. Islam, P. X. Liu, and A. El Saddik, "Nonlinear control for teleoperation systems with time varying delay," *Nonlinear Dynamics*, vol. 76, pp. 931-954, 2014/04/01 2014.

[8] E. Nuño, I. Sarras, L. Basañez, and M. Kinnaert, "Control of teleoperators with joint flexibility, uncertain parameters and time-delays," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 62, pp. 1691-1701, 2014.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.3.0]

[9] Y.-C. Liu and N. Chopra, "Control of semi-autonomous teleoperation system with time delays," *Automatica*, vol. 49, pp. 1553-1565, 2013.

[10] G.-P. Liu, Y. Xia, J. Chen, D. Rees, and W. Hu, "Networked predictive control of systems with random network delays in both forward and feedback channels," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 54, pp. 1282-1297, 2007.

[11] W.-j. Kim, K. Ji, and A. Ambike, "Networked real-time control strategies dealing with stochastic time delays and packet losses," in *American Control Conference, 2005. Proceedings of the 2005*, 2005, pp. 621-626.

[12] S. H. Ahn and J. S. Yoon, "A bilateral control scheme for 2-DOF telemanipulators with control input saturation," *Control Engineering Practice*, vol. 10, pp. 1081-1090, 2002.

[13] S.-J. Lee and H.-S. Ahn, "Synchronization of bilateral teleoperation systems with input saturation," in *Control Automation and Systems (ICCAS), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 1357-1361.

[14] S.-J. Lee and H.-S. Ahn, "A study on bilateral teleoperation with input saturation and systems," in *Control, Automation and Systems (ICCAS), 2011 11th International Conference on*, 2011, pp. 161-166.

[15] S.-J. Lee and H.-S. Ahn, "Controller designs for bilateral teleoperation with input saturation ", *Control Engineering Practice*, vol. 33, pp. 35-47, 2014.

[16] F. Hashemzadeh, I. Hassanzadeh, and M. Tavakoli, "Teleoperation in the presence of varying time delays and sandwich linearity in actuators," *Automatica*, vol. 49, pp. 2813-2821, 2013.

[17] D. H .Zhai and Y. Xia, "Robust saturation-based control of bilateral teleoperation without velocity measurements," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2014.

[18] Y. Yang, C. Ge, H. Wang, X. Li, and C. Hua, "Adaptive neural network based prescribed performance control for teleoperation system under input saturation," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 352, pp. 1850-1866, 2015.

[19] R. Kelly, V. S. Davila, and J. A. L. Perez, *Control of robot manipulators in joint space*: Springer, 2006.

[20] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot modeling and control* vol. 3: Wiley New York, 2006.

[21] A. R. Teel, "Asymptotic convergence from L p stability," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 44, pp. 2169-2170, 1999.

[22] J.-J. E .Slotine and W. Li, *Applied nonlinear control* vol. 199: Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.

[23] S. Islam, X. P. Liu, A. El Saddik, L. Seneviratne, and J. Dias, "Control schemes for passive teleoperation systems over wide area communication networks with time varying delay," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 11, pp. 100-108, 2014.

[24] E. Nuño, L. Basañez, C. López-Franco, and N. Arana-Daniel, "Stability of nonlinear teleoperators using PD controllers without velocity measurements," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 351, pp. 241-258, 2014.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.1.3.0]