

طراحی کنترل پیش‌بین برای سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه نامعین

سیدوحید قوشخانه‌ای^۱، دانشجوی دکتری؛ علیرضا الفی^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران - ghoosh@shahroodut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران - a_alfi@shahroodut.ac.ir

چکیده: تأخیر زمانی در کانال‌های ارتباطی رفت و برگشت و همچنین وجود نامعینی در این تأخیرها و در محیط عملیاتی از جمله عوامل محدودکننده در عملکرد سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه هستند که در بسیاری از مواقع منجر به ناپایداری این سیستم‌ها می‌شوند. بدین‌منظور، در این مقاله یک ساختار کنترلی با دو کنترل‌کننده محلی - به‌نام‌های کنترل‌کننده فرمانده و فرمانبر - برای سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه پیشنهاد می‌شود. کنترل‌کننده فرمانده بر مبنای کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل طراحی شده و هدف آن جبران زمان تأخیر مسیر رفت در کانال ارتباطی، تحقق ردیابی نیرو و حفظ پایداری سیستم است. از سوی دیگر، کنترل‌کننده فرمانبر یک کنترل‌کننده تناسبی - مشتقی مرسوم است که تحقق ردیابی موقعیت در سیستم را به عهده دارد. همچنین، در ساختار پیشنهادی از یک پیش‌بین اسمیت برای جبران تأخیر در مسیر برگشت در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها عملکرد مناسب ساختار کنترلی پیشنهادی را در حضور تأخیرهای زمانی نسبتاً بزرگ نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: عملیات از راه دور، کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، پیش‌بین اسمیت، پایداری، شفافیت، تأخیر زمانی.

Predictive Control Design for Uncertain Bilateral Teleoperation Systems

S. V. Ghooshkhaane¹, PhD Student; A. R. Alfi², Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Robotic Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, Email: ghoosh@shahroodut.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Robotic Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, Email: a_alfi@shahroodut.ac.ir

Abstract: Time delay in both forward and backward communication channels and also the corresponding uncertainties in both the delays and task environment have always been considered as restricting factors in the performance of bilateral teleoperation systems which in many cases lead to instability of such systems. To this end, in this paper, the control framework is proposed for bilateral teleoperation systems with two local controllers namely master and the slave controller. Master controller is designed based upon Model Predictive Control and aims at forward time delay compensation, force tracking and stability maintenance. On the other hand, slave controller is a traditional Proportional-Derivative controller with the role of position tracking in the system. Furthermore, in the core of the proposed control framework, a Smith Predictor is utilized to compensate for the time delay in backward path. Simulation results exhibit the effectiveness of the proposed control framework against relatively large time delays.

Keywords: Teleoperation, model predictive control, smith predictor, stability, transparency, time delay.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۷ و ۱۳۹۵/۰۴/۲۷

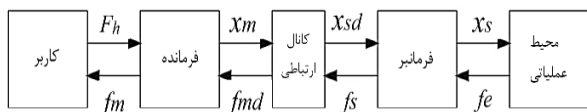
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۱

نام نویسنده مسئول: علیرضا الفی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شاهرود - بلوار دانشگاه - دانشگاه صنعتی شاهرود - پردیس مهندسی و فناوری‌های نوین - دانشکده مهندسی برق و رباتیک.

۱- مقدمه

مبتنی بر پیش‌بین اسمیت [۱۵ و ۱۶]، کنترل مقاوم [۲۰-۱۷] و کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل [۳۰-۲۱] اشاره کرد.



شکل ۱: گردش سیگنال‌ها در عملیات از راه دور دوطرفه

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل دهه‌های موفقیت‌آمیزی از کاربرد و نظریه را پشت سر گذاشته است [۲۱] و اکنون به یک روش کنترلی مؤثر مبدل شده است. از دلایل بدهی موفقیت این کنترل، قابلیت کار با سیستم‌های ناپایدار، تأخیردار و غیرکمینه‌فاز است. به‌عنوان نمونه در [۲۲]، نویسندگان با تلفیق سیستم تطبیقی مدل مرجع و کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل با استفاده از نامساوی‌های ماتریسی خطی، شرایط پایداری و عملکرد مناسب را برای کنترل وضعیت ماهواره فراهم نموده‌اند. از ویژگی‌های مثبت این پژوهش می‌توان به مقاوم بودن کنترل پیش‌بینی در برابر نامعینی در مدل سیستم و اغتشاشات خارجی اشاره کرد. در ادامه تاریخچه مختصری از پژوهش‌های صورت‌گرفته پیرامون کنترل پیش‌بین سیستم‌های عملیات از راه دور آورده می‌شود.

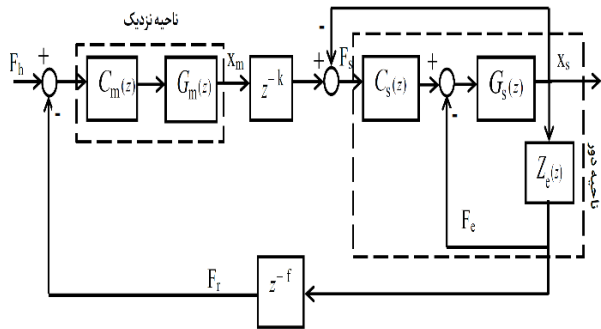
در [۲۳]، کنترل پیش‌بین چندمدله به سیستم اعمال شده است و تمام معیارهای مورد نیاز برآورده شده‌اند؛ اما این روش در حضور زمان تأخیر ثابت با پیچیدگی‌های بسیاری همراه است. در [۲۴]، از یک طرح کنترلی پیش‌بین استفاده شده است و در صورتی که زمان تأخیر دقیقاً مشخص باشد مقاوم است. با این حال، در حضور تأخیر زمانی نامعین پایداری تضمین نمی‌شود. مرجع [۲۵] به معرفی روشی پیش‌بین می‌پردازد که بر پایه تأخیرهای متغیر با زمان است. سیستم نسبت به نامعینی‌های مدل و زمان تأخیر مقاوم است، اما ردیابی موقعیت در این روش وجود ندارد. در [۲۶]، مسیر مرجع از قبل مشخص نیست و دلیل مشخص نبودن آن، تغییر مسیر مرجع توسط فیدبک نیرو عنوان شده است. نکته بسیار مثبت این پژوهش استفاده از داده‌های عملی و استفاده از بستر اینترنت است. در [۲۷]، نویسندگان محاسبات زمان‌بر را به‌عنوان یک محدودیت در کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در نظر داشته و از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند برای حل مشکل استفاده کرده‌اند. با این حال، رویکرد مورد استفاده از پیچیدگی برخوردار است. مرجع [۲۸] ساختاری پیش‌بین را برای سیستم‌های عملیات از راه دور فضایی با تأخیرهای بزرگ ارائه می‌دهد که در آن فرمانده و فرمانبر بازوهایی با دو درجه آزادی هستند. اما اثبات پایداری سیستم مشکل بوده و مقاوم بودن سیستم لحاظ نشده است. در [۲۹]، از کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل غیرخطی برای کنترل سیستم‌های عملیات از راه دور استفاده شده است. تأخیر در کانال ارتباطی متغیر با زمان بوده و پایداری و عملکرد بر اساس تحلیل لیاپانوفی آورده شده است. مرجع [۳۰] به ارائه کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل برای سیستم‌های عملیات

عملیات از راه دور از دیدگاه واژه‌شناسی به انجام کاری در فاصله‌ای مشخص اطلاق می‌شود [۱] که بسته به کاربرد به دو صورت یک‌طرفه^۱ یا دوطرفه قابل پیاده‌سازی است. شکل ۱ طرح کلی عملیات از راه دور دوطرفه را با اجزاء تشکیل‌دهنده و چگونگی گردش سیگنال‌ها نشان می‌دهد. هر سیستم عملیات از راه دور دوطرفه از پنج جزء اصلی تشکیل می‌شود که عبارت‌اند از: کاربر انسانی، سیستم فرمانده، کانال ارتباطی، سیستم فرمانبر و محیط عملیاتی. به‌طور کلی، در چنین سیستم‌هایی کاربر انسانی نیرویی را به بازوی رباتیکی فرمانده وارد می‌کند و به این‌صورت بازوی فرمانده جابه‌جا می‌شود؛ این سیگنال (x_m) از طریق کانال ارتباطی عبور داده شده و به بازوی رباتیکی فرمانبر می‌رسد که باید از فرمانده تبعیت کرده و با جابه‌جایی و اعمال نیرو در محیط عملیاتی، کار دست‌وردا شده توسط فرمانده را اجرا کند. در این‌صورت، سیستم عملیات از راه دور، یک‌طرفه است. چنانچه بازوی رباتیکی فرمانبر دارای حسگر نیرو باشد و سیگنال‌های نیرو به سمت فرمانده ارسال شوند؛ سیستم عملیات از راه دور، دوطرفه است. سیگنال‌هایی که در مسیر رفت و برگشت از کانال ارتباطی عبور می‌کنند با تأخیرهایی مواجه هستند که حتی وجود مقدار کوچکی از آن‌ها می‌تواند عملکرد سیستم را مختل و گاهی اوقات منجر به ناپایداری سیستم گردد. به‌طور کلی دو هدف در طراحی ساختارهای کنترلی برای سیستم عملیات از راه دور مد نظر است که عبارت‌اند از: پایداری و شفافیت^۲. شفافیت در سیستم‌های عملیات از راه دور معادل با تحقق همزمان ردیابی نیرو^۳ و ردیابی موقعیت^۴ است. دستیابی به این اهداف هنگامی که مقدار تأخیر در کانال ارتباطی نامعین باشد به‌مراتب مشکل‌تر می‌شود. از دلایل وجود نامعینی در زمان تأخیر می‌توان به مواردی از قبیل فاصله بین فرمانده و فرمانبر و ازدحام داده‌ها^۵ اشاره کرد [۲].

از دیدگاه کاربردی موارد زیادی قابل ذکر است که اهمیت عملیات از راه دور را برجسته می‌کند. در کاربردهای فضایی، اکثر اکتشافات توسط ربات‌های راه دور صورت می‌پذیرد. در کاربرد دریایی، سیستم‌های عملیات از راه دور در اکتشاف نفت، سکوه‌های نفتی و خطوط لوله نفتی کاربرد دارد. در حوزه انرژی هسته‌ای، پاک‌سازی زباله سمی هسته‌ای توسط ربات‌های از راه دور انجام می‌شود [۳]. همچنین در حوزه پزشکی، بحث جراحی از راه دور^۶ موضوع تحقیقاتی روز دنیا می‌باشد و همچنان در حال تکامل است [۴]. از این‌رو، کنترل چنین سیستم‌هایی حائز اهمیت است.

تاکنون پژوهش‌های بسیاری در حوزه کنترل سیستم‌های عملیات از راه دور صورت پذیرفته است و هرکدام دارای ویژگی‌های خاصی بر مبنای پایداری و عملکرد هستند که از جمله می‌توان به روش‌های کنترلی مبتنی بر غیرفعال بودن [۵، ۶]، روش‌های کنترلی مبتنی بر متغیرهای موج [۷-۱۰]، کنترل تطبیقی [۱۱-۱۴]، روش‌های کنترلی

به‌منظور تضمین شفافیت کامل در سیستم دو شرط به‌طور همزمان بایستی برآورده شوند. شرط اول تحقق ردیابی موقعیت است، یعنی موقعیت سیستم فرمانبر از موقعیت سیستم فرمانده تبعیت کند. به‌عبارت دیگر طبق شکل ۲، سیگنال x_s بتواند سیگنال x_m را ردیابی کند.



شکل ۲: ساختار سیستم عملیات از راه دور دوطرفه

شرط دوم تحقق ردیابی نیرو است، یعنی نیرو در محیط عملیاتی از نیروی وارده توسط کاربر انسانی تبعیت کند. به بیانی دیگر طبق شکل ۲، سیگنال F_e بتواند سیگنال F_h را ردیابی کند. قابل ذکر است که این دو شرط باید در شرایطی محقق شوند که پایداری کل سیستم برقرار باشد. در بخش بعد کنترل‌کننده‌های محلی برای تضمین شفافیت و پایداری ارائه می‌شوند.

۳- طراحی کنترل‌کننده‌ها

در دو زیربخش بعدی، روال طراحی کنترل‌کننده‌های فرمانبر و فرمانده با جزئیات بیان می‌شوند.

۳-۱- کنترل‌کننده فرمانبر

بر اساس مطالب بخش قبلی، شرط اول وجود شفافیت در سیستم ردیابی موقعیت فرمانده توسط فرمانبر است. طبق شکل ۲، تابع تبدیل موقعیت از فرمانده تا فرمانبر به‌صورت زیر است:

$$\frac{x_s}{x_m} = \frac{C_s(z)G_s(z)}{1 + z_e(z)G_s(z) + C_s(z)G_s(z)} z^{-k} \quad (3)$$

همان‌طور که دیده می‌شود، تأخیر زمانی در مخرج تابع تبدیل حضور ندارد و لذا پایداری تابع تبدیل از تأخیر زمانی تأثیری نمی‌پذیرد. در این حالت می‌توان از روش‌های کنترل کلاسیک برای طراحی کنترل‌کننده فرمانبر استفاده کرد. در اینجا، کنترل‌کننده فرمانبر یک کنترل‌کننده تناسبی - مشتقی گسسته به‌صورت زیر است:

$$C_s(z) = k_p + k_d(1 - z^{-1}) \quad (4)$$

دلیل استفاده از کنترل گسسته برای فرمانبر، کنترل‌کننده پیش‌بین گسسته‌ای است که برای فرمانده مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

از راه دور فضایی می‌پردازد. در این روش کنترلی، تأخیر زمانی در کانال ارتباطی تا ۶ ثانیه هم در نظر گرفته شده و نویسندگان این پژوهش با ارائه طرحی پیش‌بین پایداری و عملکرد مناسب را محقق ساخته‌اند. اما در این پژوهش نامعینی به‌عنوان عاملی مهم در عملیات از راه دور در نظر گرفته نشده است.

این مقاله به ارائه روش کنترل پیش‌بین می‌پردازد که دارای ساختار نسبتاً ساده‌ای است. در این ساختار برای دستیابی همزمان به پایداری و شفافیت، دو کنترل‌کننده محلی، بنام‌های کنترل‌کننده فرمانده و فرمانبر، طراحی می‌شوند. کنترل‌کننده فرمانده بر مبنای کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل طراحی شده و هدف آن جبران زمان تأخیر مسیر رفت در کانال ارتباطی، تحقق ردیابی نیرو و حفظ پایداری سیستم است. از سوی دیگر، کنترل‌کننده فرمانبر یک کنترل‌کننده تناسبی - مشتقی ساده است که تحقق ردیابی موقعیت در سیستم را به‌عهده دارد. همچنین، در این ساختار از یک پیش‌بین اسمیت به‌منظور جبران اثرات تأخیر مسیر برگشت استفاده می‌شود. به‌طور خلاصه، در این مقاله اهداف زیر برآورده می‌شود:

- ۱- پایداری و شفافیت به‌طور همزمان تضمین می‌شوند.
- ۲- نامعینی در زمان تأخیر و محیط عملیاتی در نظر گرفته می‌شوند.
- ۳- تأخیرهای زمانی بزرگ در کانال ارتباطی در نظر گرفته می‌شوند.

ادامه مقاله بدین‌صورت است. در بخش ۲ معادلات عملیات از راه دور آورده می‌شود. طراحی کنترل‌کننده‌ها در بخش ۳ بیان می‌شود. بخش ۴ به پیش‌بین اسمیت و طراحی فیلتر پایین‌گذر اختصاص دارد. در بخش ۵، تحلیل پایداری مقاوم با استفاده از قضیه بهره کوچک آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی نیز در بخش ۶ نشان داده شده است.

۲- توصیف مسئله

دینامیک خطی یک سیستم عملیات از راه دور به‌صورت زیر است [۱]:

$$M_m \ddot{x}_m + B_m \dot{x}_m = F_m + F_h \quad (1)$$

$$M_s \ddot{x}_s + B_s \dot{x}_s = F_s - F_e \quad (2)$$

که در آن اندیس‌های m و s به‌ترتیب مبین فرمانده و فرمانبر هستند، x سیگنال موقعیت، M ماتریس اینرسی است که مثبت معین می‌باشد، B ماتریس میرایی است، F_h نیروی اعمالی توسط کاربر به فرمانده و F_e نیروی تماسی بین فرمانبر و محیط عملیاتی است. شکل ۲ ساختار کنترلی برای سیستم عملیات از راه دور دوطرفه را نشان می‌دهد [۱۵]. در این شکل، k و f به‌ترتیب مقادیر زمان تأخیر در مسیر رفت و برگشت، Z_e امپدانس محیط عملیاتی، G_s و G_m به‌ترتیب بیانگر توابع تبدیل فرمانده و فرمانبر و C_m و C_s به‌ترتیب کنترل‌کننده محلی فرمانده و کنترل‌کننده محلی فرمانبر را نشان می‌دهند.

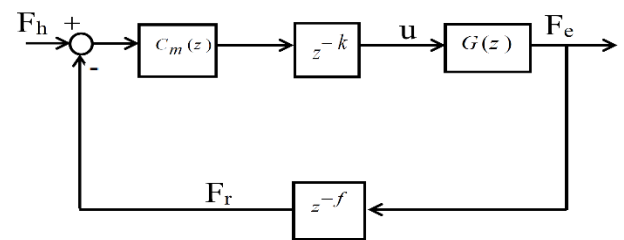
۲-۳- کنترل کننده فرمانده

وظایف کنترل کننده فرمانده عبارت‌اند از:

۱- اطمینان از پایداری سیستم حلقه بسته؛

۲- تضمین ردیابی نیرو در سیستم.

با دقت در شکل ۲ به‌وضوح دیده می‌شود که در سیستم‌های عملیات از راه دور تبادل سیگنال‌های نیرو و موقعیت به‌طور همزمان در حال انجام است.



شکل ۳: نمایش ساده‌شده شکل ۲ بر اساس سیگنال‌های نیرو

بحث مرتبط با ردیابی موقعیت در زیربخش قبلی صورت پذیرفت. حال برای طراحی کنترل کننده فرمانده که وظایف فوق را عهده‌دار است، سیستم را بر اساس سیگنال‌های نیرو ساده‌سازی می‌کنیم. با ساده‌سازی، شکل ۲ به‌صورت شکل ۳ در خواهد آمد که در آن:

$$G(z) = \hat{G}_s(z) \cdot G_m(z) \quad (5)$$

و

$$\hat{G}_s(z) = \frac{Z_e(z)C_s(z)G_s(z)}{1 + Z_e(z)G_s(z) + C_s(z)G_s(z)} \quad (6)$$

طبق شکل ۳، تابع تبدیل از F_h تا F_e به‌صورت زیر است:

$$T(s) = \frac{C_m(z) \cdot G(z) \cdot z^{-k}}{1 + C_m(z) \cdot G(z) \cdot z^{-(k+f)}} \quad (7)$$

با توجه به وجود تأخیر زمانی در مخرج تابع تبدیل رابطه (۷)، پایداری آن تحت تأثیر تأخیر زمانی است به‌طوری‌که تأخیری کوچک می‌تواند منجر به ناپایداری سیستم شود؛ بنابراین روش‌های کنترل کلاسیک نمی‌توانند برای کنترل سیستم به‌کار گرفته شود. بدین‌منظور در این مقاله، از کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل استفاده می‌کنیم. روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل به‌طور عام از طرح نشان داده‌شده در شکل ۴ تبعیت می‌کند [۳۱]. در ادامه این زیربخش، طرح کنترلی پیشنهادی را بر اساس این شکل توضیح می‌دهیم. گفتار ساده این روش کنترلی بدین‌صورت است: ورودی کنترل آینده را بر اساس ورودی‌های گذشته و خروجی‌های گذشته به‌گونه‌ای تعیین کنیم که خروجی پیش‌بینی به‌اندازه کافی به خروجی دلخواه نزدیک باشد. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود به مدلی از دستگاه^۷ نیاز است که همان تابع تبدیل رابطه (۵) است. این رابطه را می‌توان به‌صورت:

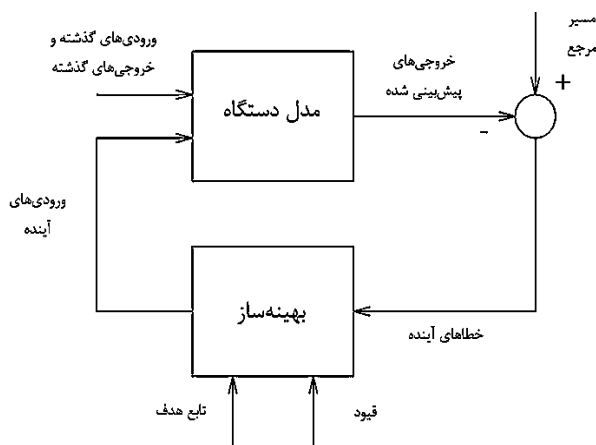
$$G(z) = \frac{B(z^{-1}) \cdot z^{-1}}{A(z^{-1})} \quad (8)$$

بیان کرد که در آن چندجمله‌ای‌های A و B به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a} \quad (9)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b} \quad (10)$$

که در آن، n_a و n_b تعداد جملات تأخیر یافته را به‌ترتیب برای چندجمله‌ای‌های A و B نشان می‌دهد. برای به‌دست آوردن ورودی کنترل که همان خروجی کنترل کننده فرمانده است، ابتدا باید تابع هزینه (۱۱) کمینه شود که این کار توسط بهینه‌ساز شکل ۴ صورت می‌پذیرد.



شکل ۴: ساختار پایه کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل [۳۱]

$$J = \sum_{k=N_1}^{N_2} [F_h(t+k) - F_{ep}(t+k)]^2 + \lambda \sum_{k=1}^{N_u} [\Delta u(t+k-1)]^2 \quad (11)$$

با شرط:

$$\Delta u(t+k) = 0, N_u \leq k \leq N_2 - 1 \quad (12)$$

که در آن، N_u حداکثر افق کنترل، N_1 حداقل افق پیش‌بینی و N_2 حداکثر افق پیش‌بینی است. F_{ep} پیش‌بینی سیگنال نیروی محیط عملیاتی، F_h نیروی اعمالی توسط کاربر، λ ضریب وزنی و $\Delta = 1 - z^{-1}$ در رابطه‌های بالا گام پیش‌بینی است.

برای به‌دست آوردن ورودی کنترل بایستی معادله دیوفانتین (۱۳) حل شود.

$$\Delta A(z^{-1})E_k(z^{-1}) + z^{-k}M_k(z^{-1}) = 1 \quad (13)$$

چندجمله‌ای E_k از مرتبه $k-1$ و چندجمله‌ای M_k از مرتبه n_a است. همان‌طور که در رابطه (۱۱) دیده می‌شود تابع هدف و به‌تبع آن ورودی کنترل، تابعی از پیش‌بینی سیگنال نیروی محیط عملیاتی نیز هست. پیش‌بینی این نیرو با افزودن سیگنال خطای فیلترشده بین

$$\Gamma = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N_2-1} & g_{N_2-2} & \dots & g_{N_2-N_u} \end{bmatrix}_{N_2 \times N_u} \quad (21)$$

کنترل‌کننده پیش‌بین عموماً در هر لحظه N_u محاسبه را انجام داده و آن را در بردار کنترل ذخیره می‌کند، اما برای اعمال به دستگاه فقط اولین محاسبه را مورد استفاده قرار داده و بقیه را حذف می‌کند. این فرایند برای هر لحظه تکرار می‌شود که خاصیت بازگشتی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل را نشان می‌دهد. با توجه به این مطلب اولین دنباله کنترلی از رابطه (۱۹) به صورت زیر قابل استخراج است:

$$u(t|t) = u(t-1|t-1) + H_1(F_h(t) - G(z^{-1})\Delta u(t-1|t-1)) - M(z^{-1})F_{ep}(t) \quad (22)$$

به عبارت دیگر داریم:

$$u(t|t) = \frac{H_1 F_h(t) - H_1 M(z^{-1}) F_{ep}(t)}{(1 + H_1 G(z^{-1}) z^{-1}) \Delta} \quad (23)$$

از (۲۳)، کنترل‌کننده فرمانده و همچنین پیش‌فیلتر عبارتند از:

$$C_m(z) = \frac{H_1 M(z^{-1})}{(1 - z^{-1})(1 + H_1 G(z^{-1}) z^{-1})} \quad (24)$$

$$W(z) = \frac{\sum_{i=1}^{N_2} h_i z^i}{H_1 M(z^{-1})} \quad (25)$$

۴- پیش‌بین اسمیت

پیش‌بین اسمیت یک جبران‌ساز کاملاً وابسته به مدل است و در سیستم‌های تأخیردار مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است [۳۲] و [۳۳]. در ادامه به نحوه جبران زمان تأخیر در مسیر برگشت و نامعنی‌های مربوط به زمان تأخیر و محیط عملیاتی می‌پردازیم. شکل ۵ ساختار کلی پیش‌بین اسمیت را نشان می‌دهد. در حالت نامی داریم:

$$G_n(z) = G(z) \quad (26)$$

$$f = \bar{f} \quad (27)$$

در این حالت، نیازی به فیلتر پایین‌گذر با بهره واحد نیست (قبلاً به آن اشاره‌ای داشتیم)؛ اما اگر در زمان تأخیر و دینامیک محیط عملیاتی نامعنی‌هایی وجود داشته باشد، نقش فیلتر پایین‌گذر $L(z)$ بر پایداری و عملکرد بسیار برجسته خواهد بود. پیش‌بین اسمیت و ساختار کلی کنترل برای این مقاله در شکل ۶ آورده شده است. طبق رابطه (۱۵)، اگر $\alpha > 1$ باشد، فیلتر ناپایدار شده و سیستم نیز به تبع آن ناپایدار خواهد شد. هرچه α به صفر نزدیک‌تر باشد، پاسخ سریع‌تر خواهد بود و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد پاسخ کندتر می‌شود. مشاهده می‌شود که بین پایداری و عملکرد مناسب باید مصالحه‌ای برقرار شود؛ بنابراین ضروری است $0 < \alpha < 1$ انتخاب شود به گونه‌ای که پاسخ‌ها مشخصه‌های مناسبی داشته باشند.

خروجی تأخیردار مدل و خروجی تأخیردار مدل دستگاه به خروجی مدل دستگاه حاصل می‌شود. قابل ذکر است که فیلتر مورد استفاده یک فیلتر پایین‌گذر بوده و در کنترل پیش‌بین مرسوم چنین چیزی وجود ندارد. روابط پیش‌بینی سیگنال نیروی محیط عملیاتی و فیلتر پایین‌گذر به صورت زیر است:

$$F_{ep}(t) = \hat{F}_e(t) + L(z)(F_e(t-f) - \hat{F}_e(t-f)) \quad (14)$$

$$L(z) = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}} \quad (15)$$

نقش $L(z)$ و ساختار جبران زمان تأخیر مسیر برگشت و همچنین تحلیل مقاوم در برابر نامعنی‌ها با جزئیات در بخش ۴ آورده شده است. با حل معادله دیوفانتین و روابط (۱۴) و (۱۵)، پیش‌بینی نیرو در محیط عملیاتی برای k گام جلوتر به صورت زیر خواهد بود [۳۱]:

$$\begin{aligned} \hat{F}_e(t+k) &= \bar{G}_k(z^{-1})\Delta u(t+k-1) \\ &+ z^k [G_k(z^{-1}) - \bar{G}_k(z^{-1})]\Delta u(t-1) \\ &+ M_k(z^{-1})F_{ep}(t) \end{aligned} \quad (16)$$

که در آن، $1 \leq k \leq N_2$.

$$G_k(z^{-1}) = E_k(z^{-1})B(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_{k-1+n_b} z^{1-k-n_b} \quad (17)$$

$$\bar{G}_k(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + \dots + g_{k-1} z^{1-k} \quad (18)$$

بنابراین، دنباله کنترلی یا همان خروجی کنترل‌کننده فرمانده به صورت:

$$\begin{bmatrix} u(t|t) \\ u(t+1|t) \\ \vdots \\ u(t+N_u-1|t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} u(t-1|t-1) + \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_{N_u} \end{bmatrix} (R(t) - G(z^{-1})\Delta u(t-1|t-1)) - M(z^{-1})F_{ep}(t) \quad (19)$$

به دست می‌آید. در رابطه (۱۹)، بردار $u(t+i|t)$ عبارت است از پیش‌بینی i -گام جلوتر برای نیروی محیط در زمان t و ماتریس H برابر است با:

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_{N_u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} (\Gamma^T \Gamma + \lambda I_{N_u \times N_u})^{-1} \Gamma^T \in \mathfrak{R}^{N_u \times N_2} \quad (20)$$

بررسی پایداری مقاوم استفاده می‌شود. طبق روابط ذکر شده در بخش‌های قبلی، کنترل‌کننده‌ها ابتدا بر مبنای اصول کنترل پیش‌بین (کنترل‌کننده فرمانده) و کنترل تناسبی - مشتقی (کنترل‌کننده فرمانبر) طراحی شده و سپس مقاوم بودن کل سیستم با شرط (۳۲) بررسی می‌شود. در صورت برآورده نشدن شرط (۳۲)، پارامتر فیلتر $(\alpha, L(z))$ ، باید مورد یک بازتنظیم ساده دستی واقع شود. انتخاب مقدار مناسب α (که بازه صحیح آن در بخش ۴ آورده شد) بستگی به مشخصه‌های عملکردی مد نظر کاربر دارد. ذکر این نکته ضروری است که نامعینی‌های موجود در زمان تأخیر و مدل‌سازی هر دو عملکرد سیستم عملیات از راه دور را تنزل می‌دهند؛ بنابراین، باید مصالحه‌ای بین عملکرد و نامعینی‌های اعمالی به سیستم برقرار شود تا پایداری نیز تضمین شود.

۶- شبیه‌سازی

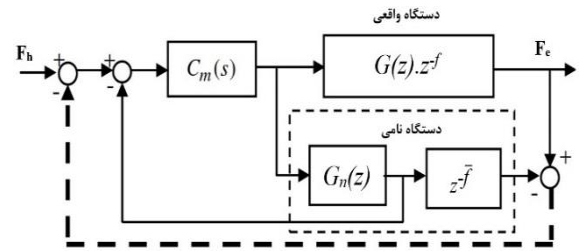
در این بخش برای ارزیابی ساختار کنترلی پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها در سه حالت مختلف انجام می‌شود. پارامترهای مربوط به سیستم‌های فرمانده و فرمانبر در جدول ۱ آورده شده‌اند. زمان نمونه‌برداری برابر با ۰/۱ ثانیه است. پارامترهای کنترل‌کننده تناسبی - مشتقی فرمانبر به صورت $K_d = 43$ و $K_d = 45$ و پارامترهای مرتبط با کنترل‌کننده فرمانده با استفاده از کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل عبارت‌اند از $\alpha = 0/9$ ، $\lambda = 0/12$ ، $N_u = 20$ و $N_2 = 50$. ذکر این نکته ضروری است که کلیه پارامترهای کنترل‌کننده‌ها در تمام حالت‌ها ثابت است.

حالت (۱): پاسخ‌های سیستمی با ۱ واحد تأخیر در مسیر رفت (۱۰۰ میلی ثانیه) و ۱ واحد تأخیر در مسیر برگشت بدون در نظر گرفتن نامعینی.

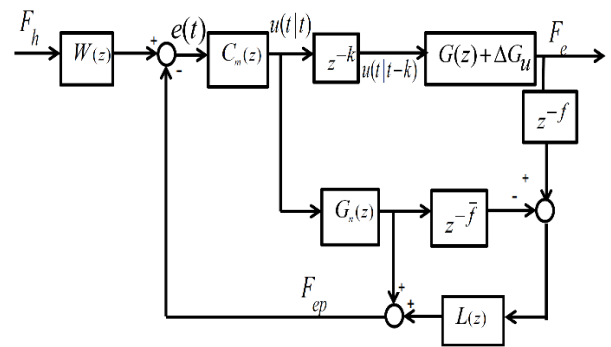
حالت (۲): پاسخ‌های سیستمی با ۱۰ واحد تأخیر در مسیر رفت (۱ ثانیه) و ۱۰ واحد تأخیر در مسیر برگشت با در نظر گرفتن نامعینی در زمان تأخیر و ۲ درصد نامعینی در دینامیک محیط عملیاتی.

حالت (۳): پاسخ‌های سیستمی با ۲۰ واحد تأخیر در مسیر رفت (۲ ثانیه) و ۲۰ واحد تأخیر در مسیر برگشت با در نظر گرفتن نامعینی در زمان تأخیر و ۲ درصد نامعینی در دینامیک محیط عملیاتی.

در شبیه‌سازی‌ها، سیگنال‌های پله، سینوسی و پالس توسط کاربر انسانی اعمال می‌شود. نتایج به صورت ردیابی نیرو، ردیابی موقعیت و پایداری مقاوم در شکل‌های ۷ تا ۱۸ آورده شده‌اند. خط‌چین‌های شکل‌های ۱۰، ۱۴ و ۱۸ مبین سمت راست رابطه (۳۲) یعنی $20 \log(1) = 0$ db است. می‌توان مشاهده نمود که پایداری و شفافیت در تمامی حالات برقرار است. در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ به ترتیب پاسخ پله، پاسخ سینوسی و پاسخ پالس برای ردیابی موقعیت و نیرو در حالت اول آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در شرایط وجود تأخیر زمانی اندک و عدم حضور نامعینی پاسخ‌ها بسیار هموار هستند. در شکل ۱۰، همان‌طور که مشاهده می‌شود شرط پایداری مقاوم در رابطه (۳۲) برآورده شده است.



شکل ۵: پیش‌بین اسمیت بدون فیلتر پایین‌گذر



شکل ۶: ساختار کلی سیستم

۵- پایداری مقاوم

به منظور تحلیل قوام سیستم کلی عملیات از راه دور، تابع تبدیل رابطه (۵) را به همراه نامعینی‌های محیط عملیاتی (ΔG_u) به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$G = G_n + \Delta G_u = \frac{B}{A} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{k_b} z^{-k_b}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{k_a} z^{-k_a}} \quad (28)$$

آنگاه تابع تبدیل از $u(t|t)$ تا F_{ep} به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{F_{ep}}{u(t|t)} = G_n(z) - G_n(z)L(z)z^{-f} + (G_n(z) + \Delta G_u)L(z)z^{-(k+f)} \quad (29)$$

برای سادگی کار، رابطه (۲۹) به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\frac{F_{ep}}{u(t|t)} = G_n(z) + L(z)\gamma \quad (30)$$

که در آن

$$\gamma = [(G_n(z) + \Delta G_u)z^{-(k+f)} - G_n(z)z^{-f}] \quad (31)$$

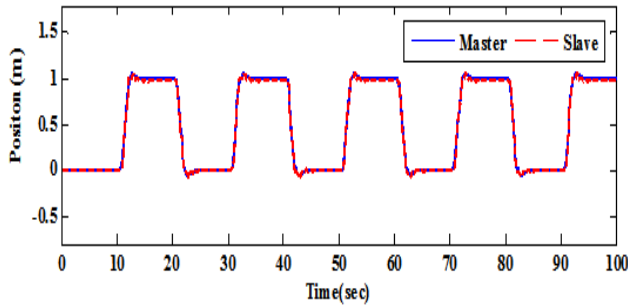
اولین جمله از رابطه (۳۰) همان دستگاه نامی است و جمله دوم مرتبط با تأخیر زمانی و نامعینی‌های مدل است. طبق قضیه بهره کوچک [۳۴]، برای پایداری باید شرط زیر برقرار باشد:

$$\left\| \frac{C_m(z)}{1 + C_m(z)G_n(z)} \right\|_{\forall \omega \in (0, \pi)} < 1 \quad (32)$$

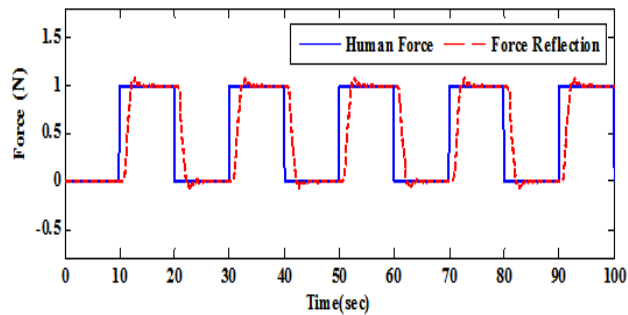
در واقع همان‌طور که مشاهده می‌شود نحوه طراحی کنترل‌کننده‌ها متأثر از شرط (۳۲) نیستند و از این شرط فقط برای

جدول ۱: پارامترهای سیستم‌های فرمانده و فرمانبر

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
M_m	۰/۴Kg	M_s	۱Kg
B_m	۳N/m	B_s	۰/۲N/m

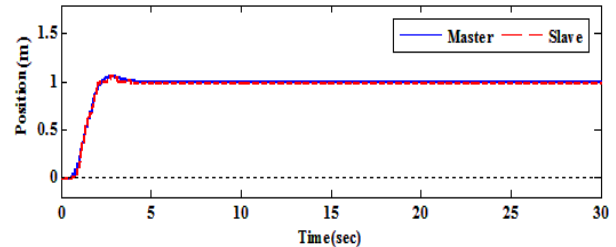


(الف)

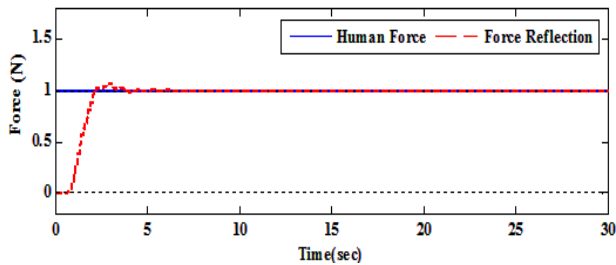


(ب)

شکل ۹: پاسخ‌های پالس برای حالت (۱)؛ (الف) ردیابی موقعیت، (ب) ردیابی نیرو



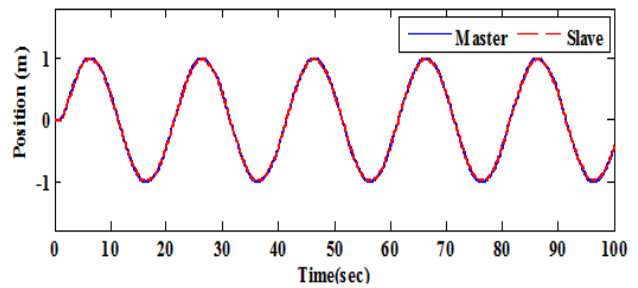
(الف)



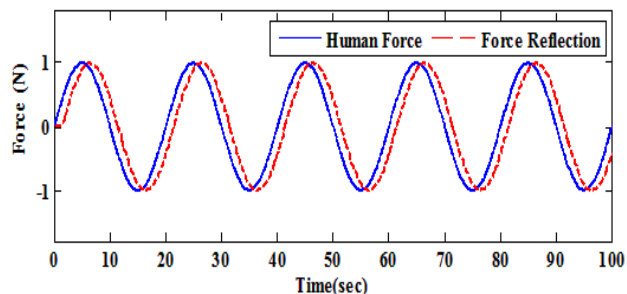
(ب)

شکل ۷: پاسخ‌های پله برای حالت (۱)؛ (الف) ردیابی موقعیت، (ب) ردیابی نیرو

در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب پاسخ پله، پاسخ سینوسی و پاسخ پالس ردیابی موقعیت و نیرو در حالت دوم آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در شرایط وجود تأخیر زمانی متوسط به همراه نامعینی در زمان تأخیر و ۲ درصد نامعینی در دینامیک محیط عملیاتی، پاسخ نسبتاً نرم و با فراجاهش همراه است. در شکل ۱۴، همان‌طور که مشاهده می‌شود شرط پایداری مقاوم در رابطه (۳۲) نیز برآورده شده است. شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ به ترتیب پاسخ پله، پاسخ سینوسی و پاسخ پالس ردیابی موقعیت و نیرو در حالت سوم را نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در شرایط وجود تأخیر زمانی بزرگ به همراه نامعینی در زمان تأخیر و ۲ درصد نامعینی در دینامیک محیط عملیاتی، پاسخ نه‌چندان نرم و با فراجاهش و نوسانات همراه است. اما علی‌رغم این موضوع، در شکل ۱۸، شرط پایداری مقاوم در رابطه (۳۲) برآورده شده است.

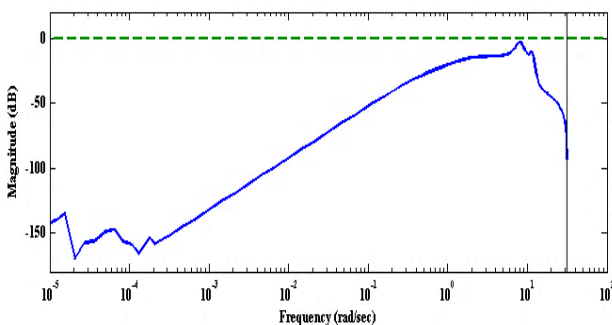


(الف)



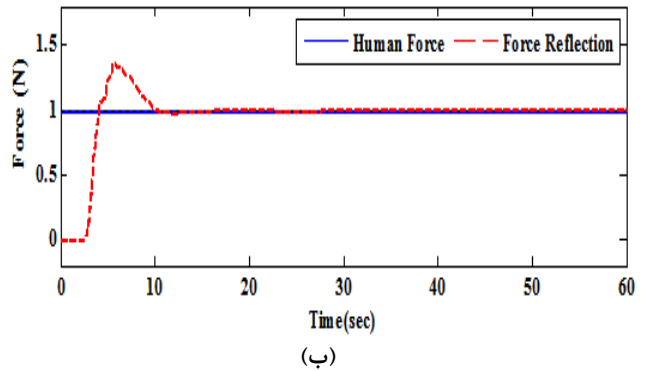
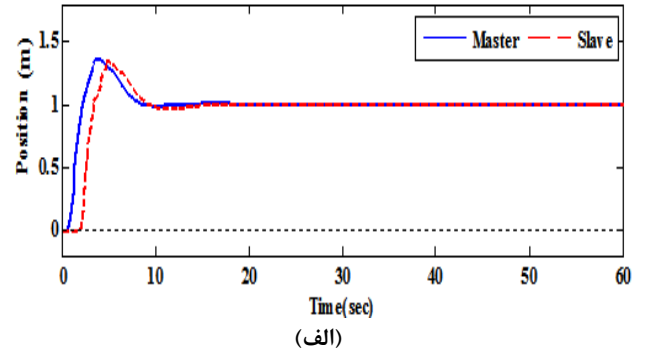
(ب)

شکل ۸: پاسخ‌های سینوسی برای حالت (۱)؛ (الف) ردیابی موقعیت، (ب) ردیابی نیرو

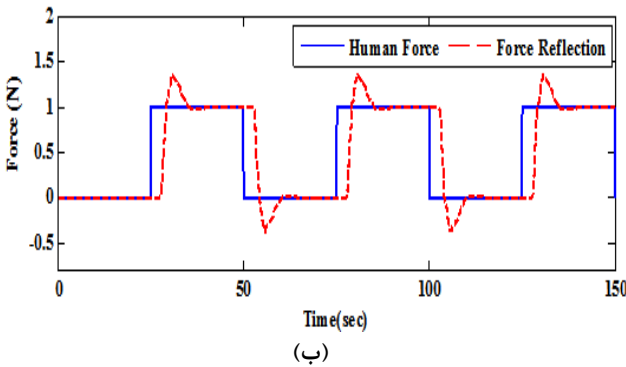
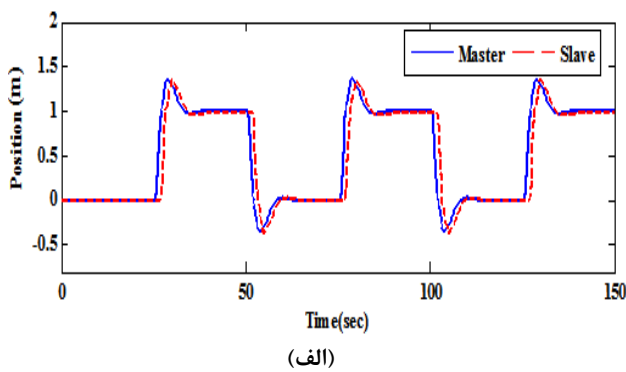


شکل ۱۰: برقراری شرط پایداری مقاوم برای حالت (۱)

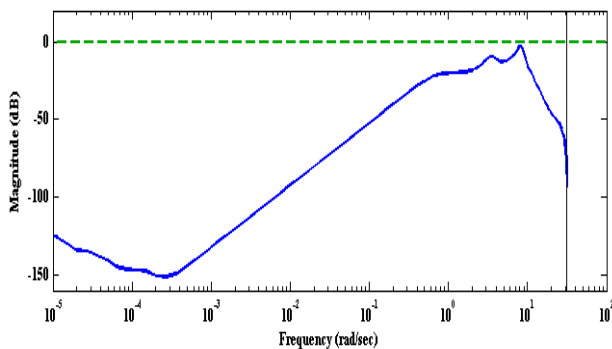
دور برای دستیابی به پایداری و شفافیت بود. بدین‌منظور دو کنترل‌کننده محلی به‌نام‌های کنترل‌کننده فرمانده و کنترل‌کننده فرمانبر طراحی گردید. شبیه‌سازی‌ها عملکرد مناسب ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد. دستاورد این مقاله در ارائه طرحی ساده در مواجهه با تأخیرهای بزرگ نامعین و نامعینی در محیط عملیاتی است درحالی‌که پژوهش‌های دیگر در صورت فراهم آوردن شفافیت و حفظ پایداری از درجه پیچیدگی بالایی برخوردار هستند یا ممکن است هر دو معیار شفافیت در آن‌ها برقرار نباشد. وجود فراجهدش در سیستم‌های عملیات از راه دور در کاربردهای خاص از جمله پزشکی از راه دور کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. از این‌رو، کار آتی در نظر گرفتن قیودی برای دستیابی به پاسخ‌های هموارتر است که به‌واسطه آن پاسخ‌ها از یک حد مجاز عبور نکنند.



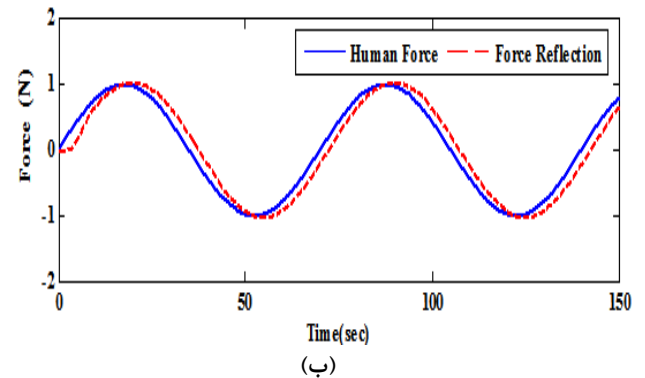
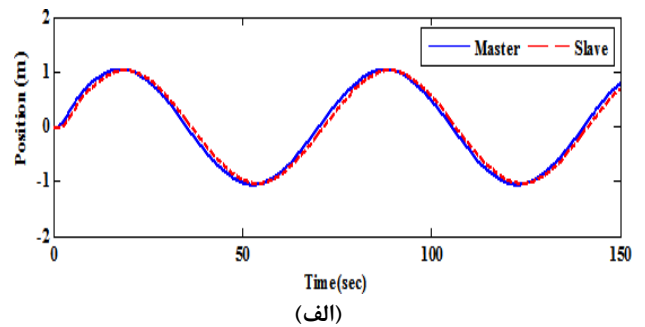
شکل ۱۱: پاسخ‌های پله برای حالت (۲): (الف) ردیابی موقعیت، (ب) ردیابی نیرو



شکل ۱۳: پاسخ‌های پالس برای حالت (۲): (الف) ردیابی موقعیت، (ب) ردیابی نیرو



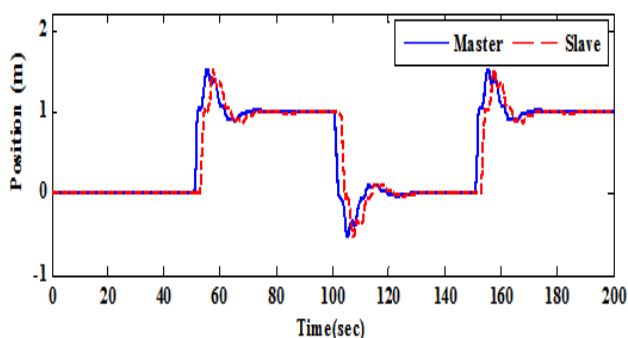
شکل ۱۴: برقراری شرط پایداری مقاوم برای حالت (۲)



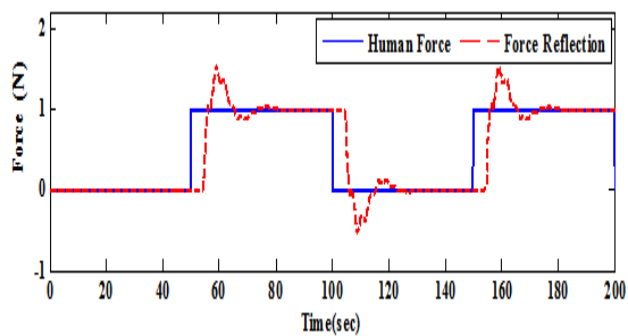
شکل ۱۲: پاسخ‌های سینوسی برای حالت (۲): (الف) ردیابی موقعیت، (ب) ردیابی نیرو

۷- نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله ارائه ساختار کنترلی برای سیستم‌های عملیات از راه

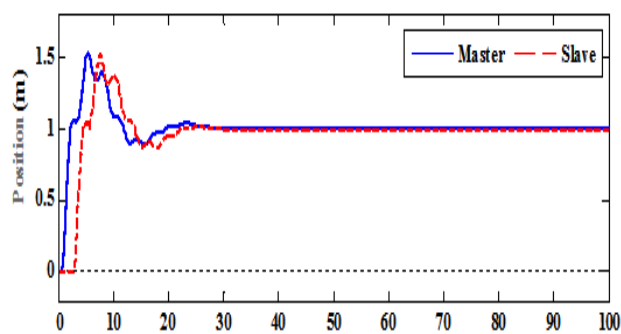


(الف)

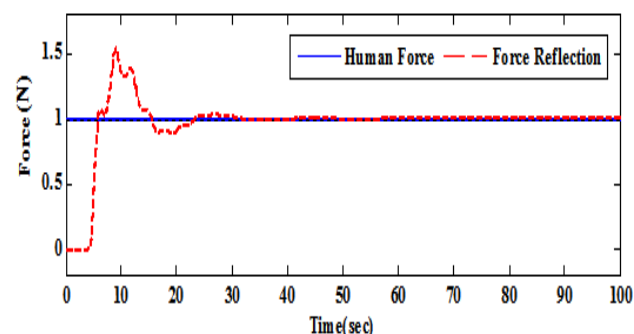


(ب)

شکل ۱۷: پاسخ‌های پالس برای حالت (۳): (الف) ردیابی موقعیت، (ب) ردیابی نیرو

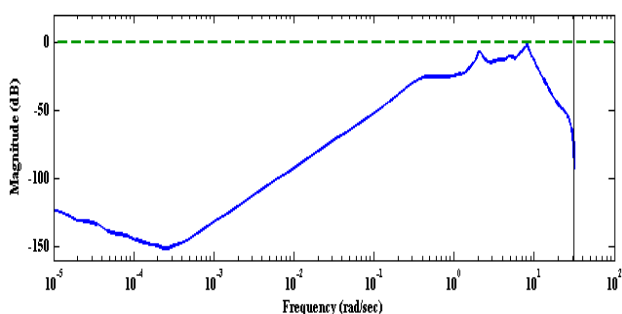


(الف)



(ب)

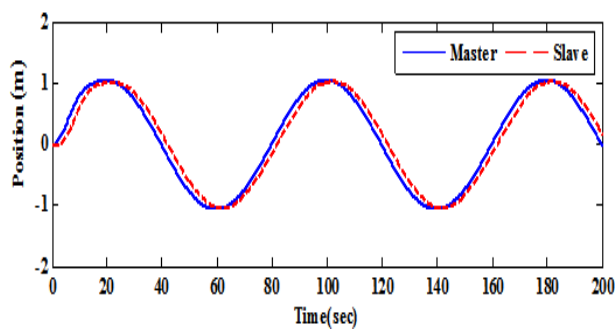
شکل ۱۵: پاسخ‌های پله برای حالت (۳): (الف) ردیابی موقعیت، (ب) ردیابی نیرو



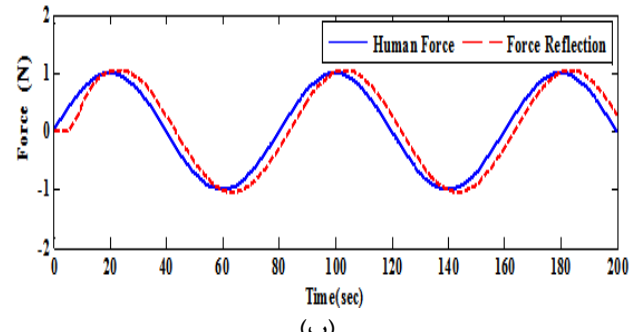
شکل ۱۸: برقراری شرط پایداری مقاوم برای حالت (۳)

مراجع

- [1] P. F. Hokayem and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation: an historical survey," *Automatica*, vol. 42, no. 12, pp. 2035-2057, 2006.
- [2] J. Mu, G. P. Liu and D. Rees, "Design of robust networked predictive control systems," *American Control Conference*, Portland, OR, USA, pp. 638-643, 2005.
- [3] J. Cui, S. Tosunoglu, R. Roberts, C. Moore and D. W. Repperger, "A review of teleoperation system control," *Proceedings of the Florida Conference on Recent Advances in Robotics*, FCRAR, Boca Raton, Florida, pp. 1-12, 2003.
- [4] R. F. Al-Rubaey. "Telesurgery: A review article," *Medical Journal of Babylon*, vol. 11, no. 3, pp. 1-10, 2014.



(الف)



(ب)

شکل ۱۶: پاسخ‌های سینوسی برای حالت (۳): (الف) ردیابی موقعیت، (ب) ردیابی نیرو

- IEEE Transactions on Haptics*, vol. 6, no. 2, pp. 229-241, 2013.
- [19] C. Ting, Y. Xiufen and G. Shuxiang, "A new robust controller in the network-based teleoperation system with force feedback," *International Conference on Information and Automation*, Heilongjiang, China. pp. 712-717, 2010.
- [۲۰] بدرالزمان حسینی، مهدی سجودی و عباس چترایی، «طراحی مشاهده‌گر مقاوم و کنترل‌گر فیدبک خروجی برای سیستم‌های چندعاملی دارای تأخیر بازه‌ای و متأثر از نامعینی و اغتشاش»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، ۱۳۹۵.
- [21] J. H. Lee, "Model predictive control: review of the three decades of development," *International Journal of Control Automation & Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 415-424, 2011.
- [۲۲] فاطمه پیروزمند، نعمت‌الله قهرمانی و محمدرضا عاروان، «طراحی کنترل پیش‌بین مقاوم با استفاده از نامساوی‌های ماتریسی خطی برای سیستم کنترل وضعیت ماهواره»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۴، شماره ۴، ۱۳۹۳.
- [23] S. Sirouspour and A. Shahdi, "Model predictive control for transparent teleoperation under communication time delay," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22, no. 6, pp. 1131-1145, 2006.
- [24] J. Sheng and M. W. Spong, "Model predictive control bilateral teleoperation systems with time delays," *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Sheraton Falls View, Niagara Falls, Ontario, Canada, New York, pp. 1877-1880, 2004.
- [25] Y. J. Pan, C. C. Wit and O. Senane, "Predictive controller design for bilateral teleoperation systems with time-varying delays," *IEEE Conference on Decision and Control the Atlantis*, Paradise Islands the Bahamas, USA, pp. 3521-3526, 2004.
- [26] T. Slama, D. Aubry, R. Oboe and F. Kratz, "Robust bilateral generalized predictive control for teleoperation systems," *Mediterranean Conference on Control and Automation*, Divani Caravel Hotel, Athens, Greece, pp. 1-6, 2007.
- [27] Z. Ghazi, A. Safavi and M. Salimifard, "Improving MPC based teleoperation systems by employing intelligent optimization algorithms," *IEEE International Conference on Control, Instrumentation and Automation*, Shiraz, Iran, pp. 670-675, 2011.
- [28] Y. Yang, F. Yang, J. Hua, H. Li, "Generalized predictive control for space teleoperation systems with Long time-varying delays," *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Seoul, South Korea, pp. 3057-3062, 2012.
- [29] A. Shahdi and S. Sirouspour, "Adaptive control of bilateral teleoperation with time delay," *International Journal of Intelligent Mechatronics and Robotics*, vol. 2, no. 1, pp. 1-27, 2012.
- [30] B. Zhang, G. Tang, H. Li and Y. Luo, "Predictive control of teleoperation rendezvous with large time delay," *IEEE International Conference on Control and Automation*, Hangzhou, China, pp. 896-901, 2013.
- [5] A. Jazayeri and M. Tavakoli, "A passivity criterion for sampled-data bilateral teleoperation systems," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 6, no. 3, pp. 363-369, 2013.
- [6] J. H. Ryu and J. H. Kim, "Stable and high performance telerobotic with time domain passivity control: reference energy following scheme," *IEEE International Conference on Advanced Robotics*, Seattle, WA, USA, pp. 782-787, 2005.
- [7] H. Ching and W. J. Book, "Internet-based bilateral teleoperation based on wave-variable with adaptive predictor and direct drift control," *Journal of Dynamics, Systems, Measurement, & Control*, vol. 128, no. 1, pp. 86-93, 2006.
- [8] Y. Yongqiang and P. X. Liu, "Improving Haptic Fidelity in Wave-variable-based Teleoperation Oriented to Telemedical Applications," *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, vol. 28, no. 8, pp. 2847-2855, 2009.
- [9] H. Li and K. Kawashima, "Achieving stability tracking in wave-variable-based teleoperation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 99, no. 5, pp. 1-9, 2013.
- [10] N. A. Tanner and G. Niemeyer, "Practical limitations of wave-variable controllers in teleoperation," *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, Singapore, pp. 25-30, 2004.
- [11] K. Hosseini-Suny, H. Momeni and F. Janabi-Sharifi, "Model reference adaptive control design for a teleoperation system with output prediction," *Journal of International Robotic Systems*, vol. 59, no. 3, pp. 319-339, 2010.
- [12] X. Liu and M. Tavakoli, "Adaptive control for linearly and nonlinearly parameterized dynamic uncertainties in bilateral teleoperation systems," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, pp. 1329-1334, 2011.
- [13] L. Chan, F. Naghdy and D. Stirling, "Application of adaptive controllers in teleoperation systems: a survey," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 44, no. 3, pp. 1-16, 2014.
- [14] S. Abiko and K. Yoshida, "Adaptive reaction control for space robotic applications with dynamic model uncertainty," *Journal of Advanced Robotics*, vol. 24, no. 8, pp. 1099-1126, 2010.
- [15] A. Alfi and M. Farrokhi, "A simple structure for bilateral transparent teleoperation systems with time delay," *ASME Journal of Dynamical Systems, Measurement & Control*, vol. 130, no. 4, pp. 44502-44509, 2008.
- [16] A. Alfi and M. Farrokhi, "Force reflecting bilateral Control of master-slave systems in teleoperation," *Journal of Intelligent Robotic Systems*, vol. 52, no. 2, pp. 209-232, 2008.
- [17] A. Alfi, A. Khosravi and A. Lari, "Swarm-based structure-specified controller design for bilateral transparent teleoperation systems via μ synthesis," *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, vol. 31, no. 1, pp. 111-136, 2014.
- [18] A. Haddadi and K. Hashtrudi-Zaad, "Robust stability of teleoperation systems with time delay: a new approach,"

- [33] F. Demir and W. W. Woo, "Feedback control over the chlorine disinfection process at a wastewater treatment plant using a Smith predictor, a method of characteristics and odometric transformation," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 2, no. 2, pp.1088-1097, 2014.
- [34] J. J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, Prentice-Hall, 1991.
- [31] E. F. Camacho and C. Bordons, *Model Predictive Control*, 2nd edition, London, Springer-Verlag, 2007.
- [32] L. D. Cicco, S. Mascolo and S. I. Niculescu, "Robust stability analysis of Smith predictor-based congestion control algorithms for computer networks," *Automatica*, vol. 47, no. 8, pp.1685-1692, 2011.

زیرنویس‌ها

¹ Unilateral

² Transparency

³ Force Tracking

⁴ Position Tracking

⁵ Data Congestion

⁶ Telesurgery

⁷ Plant