



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 15, No. 3, 2024
pp. 15-42
Research Paper

Four-channel Control of Master-slave Robotic System with User's Force Transfer during Obstacle Collision at the Remote Site based on Input-to-state Stability

Mohamadreza Satvati¹, Hossein Karimpour^{*2}, Keivan Torabi³, Mohammad Motaharifar⁴

¹ Phd Student, Mechanical Eng. Department, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Assistant Professor, Mechanical Eng. Department, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

³ Associate Professor, Mechanical Eng. Department, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

⁴ Assistant Professor, Mechanical Eng. Department, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract:

The possibility of transferring the sense and force of the user on the driver side to the follower robot has always been discussed in master/slave systems. It has gained special importance in recent research. In the present study, the control torque of the slave side is adjusted by transferring the user's force (with the haptic handle) from the master side to the slave robot. The proposed system is a four-channel approach where the position signal and force signal are transmitted to the slave on the master's side, and reciprocally, the position signal and the contact force of the environment on the slave reach the master's side. The input-to-state stability for the master-slave system is investigated with the proposed approach. The approach of this research, unlike the approach of many previous studies, does not require the acceleration of the joints to parameterize the robot's dynamics or control it. In this method, the amount of force/torque of the user's hand of the master robot will be directly involved in the control command of the slave robot. In this article, in addition to the four-channel system, a three-channel system is proposed. Both systems, in addition to following the path, can follow the user's will on the master's side when encountering unexpected obstacles and stopping joints. In addition to software simulation, experimental implementation has been done on a leader-follower system with haptic robots, which confirms the correctness of the proposed approach.

Keywords: Force transmission, Input-to-state stability, Master-Slave, Four-channel system, Tele-operation.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/ISEE.2024.138312.1637>

کنترل چهارکاناله سیستم رباتیکی راهبر - پیرو همراه با انتقال نیروی کاربر ربات راهبر در

شرایط برخورد ربات پیرو با مانع با رویکرد مبتنی بر پایداری ورودی به حالت

محمد رضا سطوتی^۱، حسین کریم پور^{۲*}، کیوان ترابی^۳، محمد مطهری فر^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

mohamadrezasatvati@yahoo.com

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

h.karimpour@eng.ui.ac.ir

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

k.torabi@eng.ui.ac.ir

۴- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

m.motaharifar@eng.ui.ac.ir

چکیده: امکان انتقال حس و میزان نیروی کاربر سمت راهبر به ربات پیرو در سیستم‌های راهبر - پیرو رباتیکی مورد توجه است. در پژوهش حاضر، گشتاور کنترلی سمت پیرو با انتقال نیروی کاربر (با دسته هپتیک) از سمت راهبر به پیرو تنظیم می‌شود. سیستم پیشنهادی یک رویکرد چهارکاناله است که در آن سیگنال موقعیت و سیگنال نیرو در سمت راهبر به پیرو منتقل می‌شوند و به طور متقابل، سیگنال موقعیت و نیروی محیط وارد بر پیرو به سمت کاربر می‌رسند. پایداری ورودی به حالت برای سیستم ترکیبی راهبر - پیرو با رویکرد پیشنهادی بررسی شده است. رویکرد این پژوهش، برخلاف رویکرد بسیاری از پژوهش‌های پیشین، به داشتن شتاب مفاصل برای پارامتری‌سازی دینامیک ربات یا کنترل آن نیاز ندارد. در این روش، مقدار نیرو/گشتاور دست کاربر ربات راهبر مستقیماً در فرمان کنترلی ربات پیرو دخیل است. در این مقاله، علاوه بر سیستم چهارکاناله، یک سیستم سه‌کاناله پیشنهاد شده است. هر دو سیستم می‌توانند علاوه بر پیروی از مسیر، هنگام برخورد با موانع و توقف مفاصل باز هم نیرو/گشتاور مدنظر فرد کاربر سمت راهبر را دنبال کنند و به این ترتیب، پیروی از نیرو/گشتاور فرد راهبر انجام می‌شود. رویکرد چهارکاناله پیشنهادی به اطلاعات قبلی درباره وجود یا عدم وجود مانع در مسیر ربات پیرو نیاز ندارد و پیروی موقعیت مفاصل و نیرویی ربات پیرو از راهبر را تحت هر شرایطی تضمین می‌کند. علاوه بر شبیه‌سازی نرم‌افزاری، اجرای تجربی روی یک سیستم راهبر - پیرو با ربات‌های هپتیک انجام شده است که صحت عملکرد رویکرد پیشنهادی را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: انتقال نیرو، پایداری ورودی به حالت، راهبر - پیرو، سیستم چهارکاناله، عملیات از راه دور.

۱- مقدمه

ربات راهبر^۱ و ربات پیرو^۲ و یک کانال ارتباطی برای انتقال سیگنال‌ها اجزای اصلی تشکیل‌دهنده سیستم‌های عملیات از راه دور^۳ هستند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای این سیستم‌ها محیط‌هایی است که کار در آن‌ها برای انسان خطرناک است، مانند محیط‌های سمی. این سیستم‌ها در سایت‌های هسته‌ای نیز کاربرد دارند؛ برای نمونه، برای تمیزکاری بخش‌هایی از صنایع هسته‌ای که حضور انسان در آن‌ها به خاطر حفظ سلامتی میسر نیست [۱]. از دیگر

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰

نام نویسنده مسئول: حسین کریم پور

نشانی نویسنده مسئول: ایران، اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده

فنی و مهندسی، گروه مکانیک

توسعه دادند و اثبات پایداری آن‌ها را نشان دادند. لیو^۹ و همکاران [۱۳] یک روش کنترلی مبتنی بر شبه‌تناسبی، مشتق‌گیر با معماری نوین را ارائه کردند که در آن، برخلاف معماری‌های سنتی، کنترل‌کننده هر دو ربات راهبر و پیرو در یک طرف کانال ارتباطی واقع شده است؛ یعنی سیگنال کنترلی مستقیماً از سمت محیط راهبر از طریق کانال ارتباطی به پیرو می‌رسد. به این صورت، نیازی نیست تا سیستم کنترلی به طور مستقیم در ربات پیرو اجرا شود و فقط سیگنال محاسبه‌شده کنترلی به طرف ربات پیرو ارسال می‌شود. نقطه‌ضعف این رویکرد را می‌توان انجام کل فرآیند کنترلی ربات پیرو در سمت راهبر دانست. در این شرایط، اگر کانال ارتباطی قطع شود، هیچ سیستمی برای حفظ پایداری در سمت ربات پیرو وجود نخواهد داشت.

هاتاناکا^{۱۰} و همکاران [۱۴] مفهومی جدید به نام شبکه رباتیک^{۱۱} را مطرح کردند؛ به این صورت که شبکه‌های ارتباطی این سیستم‌ها به صورت جداگانه بررسی می‌شوند. ویژگی انفعال روشی است که آن‌ها برای تحلیل سیستم خود از آن استفاده کردند. این رویکرد از ویژگی‌های ورودی - خروجی سیستم دینامیکی برای اثبات پایداری کل سیستم استفاده می‌کند [۱۵]. در این روش، مفروضاتی مانند انفعال تله‌وپراتورها (کاربر انسانی) وجود دارند. دو عنصر بسیار مهم در کنترل‌کننده‌های مبتنی بر انفعال روش‌های مبتنی بر تزریق میرایی^{۱۲} و پراکندگی^{۱۳} هستند. تزریق میرایی در واقع نوعی کنترل‌کننده تناسبی یا تناسبی - مشتق‌گیر است که انتخاب صحیح ضرایب آن به پایداری مجانبی سیستم منجر می‌شود [۱۶]. هرچند در روش‌های مبتنی بر انفعال محدودیت‌هایی وجود دارند، نمی‌توان از اهمیت آن‌ها در پیشرفت‌های حاصل‌شده در علم رباتیک چشم‌پوشی کرد. مفاهیمی جدید همچون نظریه شبکه، پسویتی و پراکندگی نقش کلیدی در پیشرفت‌های حوزه عملیات از راه دور داشتند. در این رویکرد، اثبات می‌شود هر کدام از بلوک‌های راهبر، پیرو و شبکه ارتباطی منفعل^{۱۴} هستند و به این ترتیب، پایداری کل سیستم تضمین می‌شود. با توجه به اینکه کنترل‌کننده‌های راهبر - پیرو از نیرو به سرعت منفعل هستند، می‌توان ناپایداری یک سیستم راهبر - پیرو را به ماهیت غیرمنفعل شبکه ارتباطی منوط دانست. مفهوم

کاربردهای نوینی که صنعت برای عملیات از راه دور پیدا کرده است ساخت رابط‌های لمسی مبتنی بر سیال مغناطیسی در کاربردهای ویژه پزشکی است. در چنین سیستم‌هایی، نیروی مقاومت سمت پیرو از طریق رابط لمسی اندازه‌گیری و به کاربر سمت راهبر منعکس می‌شود. کاربردهای سیستم‌های عملیات از راه دور رباتیکی در صنعت و پزشکی روز به روز در حال افزایش هستند [۲].

برای برقراری ارتباط میان ربات و محیط پیرو و راهبر در این سیستم‌ها، روش‌های دوکاناله، سه‌کاناله و چهارکاناله ارائه شده‌اند که شامل بازخورد نیرو - نیرو، موقعیت - نیرو، موقعیت و موقعیت - موقعیت می‌شوند. دو نوع کلاس‌بندی کلی برای این سیستم‌ها در مقاله‌های این حوزه ارائه شده‌اند. اول، کلاس‌بندی مبتنی بر تعداد کانال‌های ارتباطی و دوم، کلاس‌بندی مبتنی بر سیگنال‌های قابل کنترل در هر سمت [۵-۳]. شفافیت که به عنوان هماهنگی سینماتیکی و نیرویی میان ربات راهبر و پیرو تعریف می‌شود، در سیستم‌های عملیات از راه دور از اهمیتی ویژه برخوردار است. شفافیت در این سیستم‌ها به درک هرچه بهتر امیدانس محیط کاری ربات پیرو برای کاربر سمت راهبر کمک می‌کند. پایداری لیاپانوف موضوعی بااهمیت در همه مسائل کنترلی است [۷-۶]. تأخیرهای زمانی در سیستم‌های راهبر - پیرو یکی دیگر از چالش‌های این دسته از سیستم‌ها است. پژوهش‌هایی مختلف با ارائه رویکردهای مبتنی بر انفعال^{۱۵} یا پایداری ورودی به حالت^{۱۶} سعی در پاسخ به این چالش در این دسته از مسائل داشته‌اند. هرگاه عملیاتی که ربات پیرو باید در محیط خود انجام دهد پیچیده‌تر می‌شود، چالش‌های مسائل راهبر - پیرو بیشتر می‌شوند. معماری سیستم و رویکرد کنترلی باید به گونه‌ای باشد که بتواند به صورت هم‌زمان پاسخگوی تمام چالش‌ها از جمله تأخیر زمانی، اغتشاشات واردشده بر سیستم و تقلید شفاف ربات پیرو از راهبر باشد [۱۰-۸].

اورتگا^{۱۷} و همکاران [۱۱] روش‌های مبتنی بر کنترل شبه‌تناسبی - مشتق‌گیر^{۱۸} را توسعه دادند. این کنترل‌کننده‌ها در سیستم‌های راهبر - پیرو معمولاً با رویکرد پسویتی اثبات پایداری می‌شوند. هوا و لیو^{۱۹} [۱۲] نیز کنترل‌کننده‌های تناسبی، مشتق‌گیر را در حضور تأخیر زمانی کانال ارتباطی

پسیوتی بیان می‌کند کل انرژی ذخیره‌شده در سیستم از بالا به انرژی خارجی تزریق‌شده به سیستم محدود می‌شود [۱۴].

نظریهٔ رازومیخین تایپ^{۱۵} و رویکردهای مبتنی بر پایداری ورودی به حالت از دیگر روش‌های مهم در تحلیل و اثبات پایداری سیستم‌های دارای تأخیر زمانی هستند [۱۷]. در دههٔ گذشته، بررسی و مطالعهٔ سیستم‌های دارای تأخیر زمانی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. اگر نویزها، اغتشاشات و تأخیر زمانی از حد مجاز خود عبور کنند، می‌توانند به ناپایداری کل سیستم راهبر - پیرو منجر شوند [۱۸]. پولوشین و مارکز^{۱۶} [۹] بر اساس رویکردهای مبتنی بر پایداری ورودی به حالت کنترل‌کننده‌ای را برای سیستم‌های عملیات از راه دور ارائه کرده‌اند که ضمن مقاومت در برابر اغتشاشات خارجی، در برابر تأخیرهای زمانی سیستم نیز پایدار است. پایداری ورودی به حالت بیان می‌کند یک سیستم به صورت کلی^{۱۷} پایدار خواهد بود اگر در غیاب هر گونه ورودی خارجی پایدار مجانبی باشد و اگر مسیرهای آن سیستم به وسیلهٔ تابعی از اندازهٔ ورودی برای همهٔ زمان‌های به اندازهٔ کافی بزرگ محدود شده باشند [۱۹]. سونتاگ^{۱۸} [۲۰] در پژوهش خود رویکردهای مختلف و قضایای مرتبط با پایداری ورودی به حالت را بررسی کرده است. پولوشین و مارکز [۹] به وسیلهٔ شبیه‌سازی عددی پایداری روش کنترلی پیشنهادی خود را برای یک سیستم راهبر - پیرو نشان دادند. روش کنترلی آن‌ها مبتنی بر پایداری ورودی به حالت بود. آن‌ها روش خود را روی یک ربات دو درجه آزادی صفحه‌ای اجرا کردند. مقاومت در برابر تأخیرهای زمانی و عدم نیاز به فرضیات ویژه برای رفتار کاربر انسانی سمت راهبر و همچنین، اغتشاشات محیط پیرو از مزیت‌های رویکرد پیشنهادی آن‌ها در مقایسه با روش‌های مبتنی بر انفعال هستند. به این ترتیب، کافی است نیروی واردشده از طرف کاربر انسانی به ربات راهبر (دستهٔ هپتیک) دارای کران محدود باشد. روش تحلیل پایداری در این گونه رویکردها به این صورت است که ابتدا هر کدام از بلوک‌های راهبر و پیرو اثبات پایداری ورودی به حالت می‌شوند. سپس، با یافتن یک بهرهٔ کوچک^{۱۹}، پایداری کل

سیستم راهبر - پیرو اثبات می‌شود [۲۱]. مقاله‌هایی بسیار از جمله پژوهش معتمدی^{۲۰} و همکاران [۲۲] برای حفظ پایداری سیستم راهبر - پیرو از روش‌های مبتنی بر کنترل مود لغزشی بهره گرفتند. آن‌ها با اجرای روش کنترلی خود روی یک مثال یک درجه آزادی، کارآمدی آن را نشان دادند. بسیاری از پژوهش‌هایی که از روش مود لغزشی استفاده کرده‌اند در پیروی از مسیر مطلوب و دادن یک بازخورد قابل قبول از محیط پیرو به محیط کاربر موفق عمل کرده‌اند. هاسه و جزرنیک^{۲۱} [۲۳] یک کنترل‌کنندهٔ مود لغزشی را برای ربات‌های راهبر - پیرو طراحی کردند. در روش پیشنهادی آن‌ها، با انتخاب ضرایب مناسب، پدیدهٔ چترینگ^{۲۲} حذف شد؛ اما کنترل‌کننده‌های مود لغزشی دارای معایبی نیز هستند، از جمله تحریک جمله‌های دینامیکی فرکانس بالا در سیستم. مواردی دیگر از جمله ساییدگی و استهلاک موتورها نیز از دیگر علت‌های محدود شدن استفاده از کنترل‌کننده‌های مود لغزشی در صنعت هستند؛ اما باید دقت داشت روش‌های پایهٔ کنترل مود لغزشی مانند اسلوتین - لی^{۲۳} [۲۴] کمتر به چنین مشکلی دچار هستند. هرچند در روش آن‌ها یک سطح لغزش تعریف می‌شود، آن‌ها هیچ‌گاه نام کنترل مود لغزشی را روی سیستم کنترلی خود نگذاشتند. در مقابل، برخی از روش‌های جدیدتر مود لغزشی مانند مود لغزشی‌های ترمینال^{۲۴} [۲۵] برای روند اثبات پایداری ورودی به حالت سخت هستند و از آنجا که رویکرد پایداری ورودی به حالت یکی از مطمئن‌ترین روش‌ها برای پایداری سیستم‌های به هم پیوسته^{۲۵} است، بیشتر پژوهشگران این حوزه سعی می‌کنند پایداری سیستم خود را با این رویکرد تحلیل کنند. عرفانیان امیدوار و خلیقی فرد [۲۶] به منظور کنترل حرکت سه لینک از بازوی انسان در صفحه و با هدف کنترل مقاوم در برابر اغتشاشات خارجی و دینامیک مدل‌نشده از کنترل مود لغزشی بهره گرفتند. پولوشین و همکاران [۲۷] نشان دادند برای عملیات از راه دور، رویکردهای مبتنی بر پسیوتی برای مواردی که چند ربات پیرو وجود داشته باشند و ربات‌های پیرو نیز از نظر اندازه متفاوت باشند، گاهی قابل اعمال نیستند. تولید انرژی در شبکهٔ ارتباطی با تأخیرهای ارتباطی نامنظم یکی دیگر از مواردی است که رویکرد

پسیویتی را به چالش می کشد.

خانزاده^{۲۶} و همکاران [۲۸] یک روش همگام سازی تطبیقی جدید را برای یک سیستم عملیات از راه دور دارای یک راهبر و سه پیرو طراحی کردند. روش آن‌ها، با وجود عدم قطعیت مدل سازی، گشتاور محیطی و تأخیر زمانی به دنباله روی قابل قبولی برای ربات پیرو از راهبر منتج می شود. تجزیه و تحلیل پایداری لیاپانوف پایداری سیستم پیشنهادی آن‌ها را تضمین می کند. شیخ^{۲۷} و همکاران [۲۹] کنترل کننده غیرمتمرکز را برای سیستم های توان بخشی از راه دور در چارچوب سیستم های چندعاملی در حضور تأخیرهای متغیر زمانی بین کانال های ارتباطی عوامل پیشنهاد کردند. کنترل کننده غیرمتمرکز پیشنهادی آن‌ها بر اساس تخمین دینامیک هر عامل و همچنین، اطلاعات ارتباطی در حضور تأخیرهای متغیر زمانی بین عامل ها طراحی شده است. مزیت روش آن‌ها این است که در آن دینامیک هر عامل بدون محاسبه ماتریس رگرسور و با استفاده از نظریه تقریب تابعی بر اساس توابع پایه برآورد شده است.

کاربرمحور بودن^{۲۸} کنترل سیستم های راهبر - پیرو یکی دیگر از موضوع های جدیدتری است که در پژوهش های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۳۰]. آجودانی^{۲۹} و همکاران [۳۱] برای انتقال مهارت دست کاربر به ربات مفهومی نوین به نام تله - امیدانس^{۳۰} را در پژوهش های خود مطرح کرده اند. آن‌ها با ساخت یک رابط ماشین - انسان و روش های مبتنی بر هوش مصنوعی به کمک انتقال امیدانس باعث تقلید هرچه بهتر ربات پیرو از انسان کاربر سمت راهبر (ربات راهبر) شدند. برای کنترل دقیق ربات به صورت کاربرمحور، در پژوهشی دیگر، آجودانی [۳۲] دو مرجع جداگانه را برای سیستم عملیات از راه دور تعریف کرد. مرجع اول موقعیت مطلوب نقطه پایانی ربات را تعیین می کند و مرجع دیگر سفتی مطلوب نقطه پایانی را مشخص می کند. با توجه به اولویت زیاد پیروی دقیق از مسیر مطلوب، در پژوهش او از یک سیستم دقیق نوری برای انتقال میزان حرکت مدنظر از راهبر به ربات پیرو استفاده می شود. برای انتقال سفتی مدنظر دست کاربر به ربات پیرو، از پردازش سیگنال های الکترومایوگرافی استفاده شده است. از پردازش سیگنال های الکترومایوگرافی به عنوان مرجع

کنترل کننده امیدانس ربات پیرو استفاده می شود. برای این آموزش، از روش های هوش مصنوعی و شبکه عصبی استفاده شده است. آن‌ها کارآمدی روش خود را با انتقال ظرافت دست انسان به ربات در یک عملیات قرار دادن یک پین در حفره توسط ربات پیرو به صورت آنلاین نشان دادند. از محدودیت های این روش می توان به گران قیمت بودن تجهیزات استفاده شده و نیاز به انجام مرحله آموزش برای هر عملیات مختلف اشاره کرد. برای مثال، اگر ربات بخواهد در آزمایشی دیگر توبی را بگیرد، دیگر نتایج پردازش سیگنال الکترومایوگرافی مرحله قبل صادق نخواهد بود؛ یعنی به آموزش مجدد شبکه عصبی با انجام آزمایش های آموزشی جدید نیاز است.

لارنس^{۳۱} [۳۳] نشان داد استفاده صحیح از هر چهار کانال ممکن ارتباطی در سیستم های راهبر - پیرو (سیستم چهارکاناله) از اهمیتی بسیار زیاد برای انتقال همزمان شرایط محیط ربات پیرو به کاربر و امیدانس کاربر به ربات پیرو برخوردار است. ایجاد مصالحه میان دو مفهوم شفافیت و پایداری در مسائل عملیات از راه دور چالش همیشگی این دسته از پژوهش ها است [۳۴]. در تمامی پروتکل های ارتباطی داده نگار کاربر^{۳۲} یا اینترنت، برای برقراری ارتباط بین راهبر و پیرو، نیاز به ایجاد مصالحه میان شفافیت و پایداری وجود دارد. در برخی از پژوهش ها، برای حفظ پایداری یا مرتبط کردن رویکرد کنترلی با سیگنال های الکترومایوگرافی، کمتر کردن تعداد کانال های ارتباطی از چهار به دو در دستور کار قرار گرفته است [۳۵]. لیو و توکلی^{۳۳} [۳۶] یک کنترل کننده مبتنی بر دینامیک معکوس را در چارچوب معماری چهارکاناله پیشنهاد کردند. طبیعی است، در رویکردهای مبتنی بر دینامیک معکوس، شتاب مفاصل برای محاسبات مربوط به کنترل کننده لازم است؛ اما رویکرد های مبتنی بر اسلوتین - لی که در پژوهش حاضر مورد توجه قرار گرفته اند، به شتاب مفاصل و دینامیک معکوس گفته شده نیاز ندارند.

پژوهش حاضر با ارائه یک سیستم کامل چهارکاناله اراده و نیروی دست کاربر را به ربات پیرو انتقال می دهد. در این پژوهش، نخست، با توجه به مزایای سیستم چهارکاناله، ضمن حفظ حداکثر کانال های ارتباطی به منظور شفافیت

بیشتر، روند اثبات پایداری ورودی به حالت نیز بحث شده است. اجرای رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش‌های مشابهی که قصد انتقال امپدانس از کاربر سمت راهبر به ربات پیرو را دارند کم‌هزینه‌تر است؛ زیرا فقط نیاز است حدودی از گشتاور/نیرو دست کاربر ربات راهبر (دسته هپتیک) معلوم یا قابل اندازه‌گیری باشد. رویکرد پیشنهادی مقاله حاضر محدوده کاربردی بیشتری خواهد داشت؛ زیرا همانند بسیاری از کارهای مشابه، به آموزش‌های چندباره شبکه عصبی نیاز ندارد و فقط کافی است تا تخمینی از اراده و نیرو دست کاربر در دسترس باشد. همچنین، در روش پیشنهادی، نیازی به داشتن شتاب مفاصل برای پارامتری‌سازی دینامیک ربات و کنترل آن وجود ندارد.

جدول (۱) خلاصه‌ای از روش‌های کنترلی و معماری‌های پیشنهادی پژوهش‌های پیشین را ارائه می‌کند.

جدول (۱): خلاصه‌ای از روش‌های کنترلی و معماری‌های

پیشنهادی پژوهش‌های پیشین

پژوهشگران و سال پژوهش	نوع معماری و کنترل
کولگات ^{۳۴} ، ۱۹۹۳ [۳۷]	دوکاناله با دینامیک خطی، کنترل امپدانس
لی، ۲۰۰۳ [۳۸]	دوکاناله با دینامیک خطی (بحث بسیار محدود برای غیرخطی)، پسوییتی
یوکوکوجی و یوشیکاوا ^{۳۵} ، ۱۹۹۴ [۶]	دوکاناله، خطی متمرکز بر مانورپذیری
توکلی، ۲۰۱۱ [۳۶]	چهارکاناله، غیرخطی کنترل دینامیک معکوس
لاقی ^{۳۶} ، ۲۰۲۰ [۳۵]	دوکاناله، غیرخطی بدون بازخورد نیرو

وجه تمایز پژوهش حاضر با مقاله‌های مشابه را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- ❖ عدم تمرکز سیستم روی مدل‌های بسیار ویژه (مانند ربات جراح) و امکان توسعه کاربرد آن برحسب ضرورت
- ❖ کاربرمحور بودن سیستم عملیات از راه دور رباتیکی پیشنهادشده

- ❖ حفظ بهترین شفافیت میان راهبر و پیرو با سیستم چهارکاناله ارائه شده
 - ❖ عدم نیاز به کاهش تعداد کانال‌ها برای حفظ پایداری
 - ❖ توسعه کنترل‌کننده سمت پیرو بر اساس روش مبتنی بر اسلوتین - لی برای تطبیق‌پذیری و مقاومت بیشتر
 - ❖ ارائه رویکرد سه‌کاناله در کنار رویکرد چهارکاناله به منظور مقایسه پیروی از نیرو و اراده فرد کاربر سمت راهبر هنگام برخورد با موانع
 - ❖ اضافه کردن ترمی برای انتقال نیرو و اراده کاربر سمت راهبر به فرمان کنترلی سمت پیرو مبتنی بر اسلوتین - لی
 - ❖ عدم نیاز به دانش قبلی برای اطلاع از وجود یا عدم وجود موانع در مسیر ربات پیرو و تضمین پیروی موقعیت مفاصل و پیروی نیرویی تحت هر شرایطی
 - ❖ توسعه روش‌ها و قضایای پایداری ورودی به حالت برای سیستم‌های غیرخطی
 - ❖ پارامتری‌سازی دینامیک ربات و کنترل آن بدون نیاز به داشتن شتاب مفاصل
- جدول (۲) مقایسه رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر با مقاله‌های مشابه پیشین را ارائه می‌کند.

جدول (۲): مقایسه رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر با

مقاله‌های مشابه پیشین

مقاله حاضر	توکلی، ۲۰۱۱ [۳۶]	مطهری‌فر و تقی‌راد ^{۳۷} ، ۲۰۲۰ [۳۹]	معیار مقایسه
غیرخطی	خطی	غیرخطی	نوع دینامیک
بله	بله	خیر	دسترسی به مقدار نیرو و اراده فرد کاربر ربات راهبر در کنترل سمت پیرو
چهارکاناله	چهارکاناله	دوکاناله	نوع معماری
خیر، بدون نیاز به اندازه‌گیری شتاب مفاصل	بله، مبتنی بر دینامیک معکوس	بله	نیاز به اندازه‌گیری شتاب زاویه‌ای مفاصل برای انجام فرآیند کنترل

بخش دوم معادلات حاکم بر سیستم‌های رباتیکی عملیات از راه دور را نشان می‌دهد. بخش سوم مقدمات مورد نیاز برای تحلیل پایداری ورودی به حالت سیستم‌های غیرخطی و تعاریف مربوط به سیستم‌های آشکاری^{۳۸} و به‌هم‌پیوسته^{۳۹} را بیان می‌کند. بخش چهارم به طراحی کنترل‌کننده اختصاص دارد. در بخش پنجم اثبات پایداری سیستم بحث می‌شود و نتایج شبیه‌سازی‌ها در بخش ششم بیان می‌شوند. بخش هفتم بستر تجربی و نتایج اجرای عملی کار روی یک سیستم راهبر - پیرو واقعی (ربات هپتیک) را بیان می‌کند.

۲- توصیف سیستم

سیستم‌های رباتیکی عملکرد از راه دور، یا به اصطلاح انگلیسی تله‌اوپریشن، دارای بخش‌هایی مختلف هستند. بخش اول قسمت راهبر را تشکیل می‌دهد و بخش دوم قسمت پیرو را. کانال ارتباطی بخشی دیگر است که وظیفه انتقال سیگنال‌ها و ارتباطگیری میان این دو بخش را به عهده دارد. در بیشتر پژوهش‌های پیشین، از بستر اینترنت یا داده‌نگار کاربر به عنوان پروتکل ارتباطی میان دو ربات استفاده شده است. سیستم کنترلی طراحی شده باید ربات پیرو را مجاب کند تا از حرکات ربات راهبر تقلید کند. داشتن احساس نزدیک به واقعیت از محیط پیرو برای کاربر سمت راهبر یکی از حیاتی‌ترین موضوع‌ها در کنترل سیستم‌های عملیات از راه دور است. معادلات حاکم بر سیستم راهبر - پیرو به فرم زیر هستند؛ ربات‌ها در استخراج این معادلات به صورت تمام فعال هستند و مفاصل نیز به فرم چرخشی فرض شده‌اند [۹]:

(ب) برای فرمت سه‌کاناله ارائه شده است. در معادلات (۱) و (۲)، q نشان‌دهنده موقعیت مفاصل است. مشتق اول آن نسبت به زمان نشان‌دهنده سرعت مفصل چرخشی ربات و مشتق دوم آن نسبت به زمان نیز شتاب چرخشی مفصل را نشان می‌دهد. در بالای ترم‌هایی که با تأخیر از یک سمت به سمت دیگر منتقل می‌شوند، علامت Λ وجود دارد. در شبیه‌سازی‌های این پژوهش، برای بررسی پایداری سیستم در حضور تأخیرهای زمانی، مقدار تأخیر ثابت $\delta > 0$ در نظر گرفته شده است. ترم F_h گشتاور/نیروی تعاملی دست کاربر (معمولاً انسانی) و ربات راهبر است. اغتشاشات خارجی وارد بر ربات پیرو از سمت محیط نیز با ترم F_e نشان داده می‌شوند. تلاش‌های کنترلی با نماد τ نشان داده شده‌اند. به ترتیب، $H(q)$ و $C(q, \dot{q})\dot{q}$ و $G(q)$ معرف ماتریس اینرسی، بردار کوریولیس و بردار نیروهای گرانشی وارد بر ربات است. رویکرد و نگاه اصلی این مقاله نشان دادن کارآمدی فرمان کنترلی پیشنهادی برای فرمت چهارکاناله است؛ اما به منظور قیاس، یک فرمت سه‌کاناله در کنار آن ارائه شده است. در نهایت، نشان داده می‌شود هر دو رویکرد چهارکاناله و سه‌کاناله در پیروی نیرویی هنگام برخورد ربات پیرو با موانع موفق هستند. باید دقت کرد این پژوهش هیچ ادعایی درباره کنترل هیبرید ربات ندارد، بلکه کنترل ربات را به دو حالت تقسیم می‌کند. حالت اول حرکت آزادانه ربات است؛ یعنی زمانی که ربات پیرو با هیچ مانعی برخورد ندارد و مفاصل آزادانه حرکت می‌کنند و حالت دوم زمانی است که ربات با مانعی برخورد دارد یا به عبارت دیگر، مفاصل گیر می‌کنند. در این حالت، نشان داده خواهد شد با رویکرد پیشنهادی، زمانی که ربات پیرو در پیروی از مسیر مطلوب راهبر ناکام می‌ماند، پیروی از نیروی دست کاربر سمت راهبر را آغاز می‌کند و همان نیرویی را که کاربر دسته هپتیک راهبر اراده کرده است به مانع وارد می‌کند. اثبات پایداری ورودی به حالت در کنار انجام آزمایش تجربی انجام شده است

۲- توصیف سیستم

سیستم‌های رباتیکی عملکرد از راه دور، یا به اصطلاح انگلیسی تله‌اوپریشن، دارای بخش‌هایی مختلف هستند. بخش اول قسمت راهبر را تشکیل می‌دهد و بخش دوم قسمت پیرو را. کانال ارتباطی بخشی دیگر است که وظیفه انتقال سیگنال‌ها و ارتباطگیری میان این دو بخش را به عهده دارد. در بیشتر پژوهش‌های پیشین، از بستر اینترنت یا داده‌نگار کاربر به عنوان پروتکل ارتباطی میان دو ربات استفاده شده است. سیستم کنترلی طراحی شده باید ربات پیرو را مجاب کند تا از حرکات ربات راهبر تقلید کند. داشتن احساس نزدیک به واقعیت از محیط پیرو برای کاربر سمت راهبر یکی از حیاتی‌ترین موضوع‌ها در کنترل سیستم‌های عملیات از راه دور است. معادلات حاکم بر سیستم راهبر - پیرو به فرم زیر هستند؛ ربات‌ها در استخراج این معادلات به صورت تمام فعال هستند و مفاصل نیز به فرم چرخشی فرض شده‌اند [۹]:

$$H_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + G_m(q_m) = F_h + \hat{F}_e + \tau_m \quad (1-الف)$$

$$H_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + G_m(q_m) = F_h + \tau_m \quad (1-ب)$$

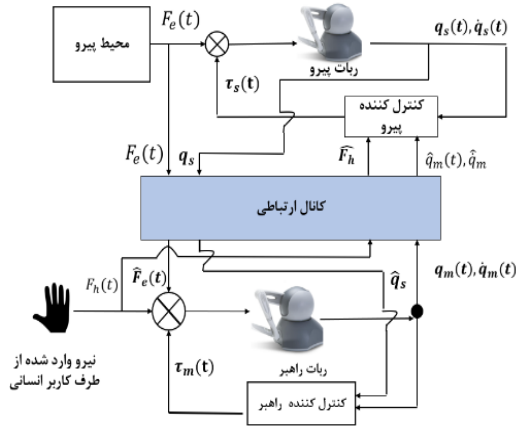
$$H_s(q_s)\ddot{q}_s + C(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s + G(q_s) = F_e + \tau_s \quad (2)$$

برای سیستم چهارکاناله، نیرویی که از طرف کاربر (معمولاً انسانی) به ربات راهبر وارد می‌شود به صورت زیر مدل می‌شود [۳۹]:

$$F_h = f_h^* - B_h \dot{q}_m - K_h q_m \quad (3)$$

معادله (۱-الف) برای سیستم چهارکاناله و معادله (۱-ب)

شکل (۱) مدل شماتیک رویکرد چهارکاناله پیشنهادی برای کنترل این سیستم را نشان می‌دهد.



شکل (۱): رویکرد چهارکاناله پیشنهادی برای کنترل سیستم راهبر - پیرو رباتیکی

در دهه‌های گذشته، عملیات از راه دور (تله‌اوپریشن) چالش‌هایی زیاد را برای هر دو حوزه رباتیک و کنترل ایجاد کرده است. زمانی که از پیشوند (تله) استفاده می‌شود، به این معنا است که دست‌کم یک ربات راهبر و یک ربات پیرو وجود دارند که با یکدیگر فاصله‌ای نسبتاً زیاد دارند؛ به این صورت که ربات پیرو باید حرکات ربات راهبر را تقلید کند. برای بهبود عملکرد سیستم‌های عملیات از راه دور، بازخوردهایی همچون صوتی، تصویری و لمسی کارآمد هستند [۳]. داشتن بازخورد نیرو از محیط پیرو به راهبر می‌تواند احساسی واقعی‌تر را برای کاربر از شرایط محیط کاری ربات پیرو ایجاد کند. در این پژوهش، با ارائه یک رویکرد نوین چهارکاناله، نیرو/گشتاور کاربر سمت راهبر نیز از طریق کانال ارتباطی به ربات پیرو منعکس می‌شود تا از این طریق، سیستم کاربرمحور شود و بتواند انتقال اراده و سفتی مدنظر از راهبر به پیرو را انجام دهد؛ ولی برخلاف پژوهش آجودانی و همکاران [۳۱]، به کاهش تعداد کانال‌های ارتباطی نیاز نیست و اثبات پایداری ورودی به حالت برای کنترل‌کننده پیشنهاد شده ارائه خواهد شد.

در پژوهش حاضر، چهار کانال ارتباطی به صورت زیر تشریح می‌شوند:

الف) کانال موقعیت (q_m): این کانال تضمین می‌کند

که در آن نیرویی برون‌زا است که توسط کاربر بر ربات راهبر اعمال می‌شود و B_h و K_h ماتریس‌های ثابت مثبت معینی هستند که ضریب دمپینگ و سفتی کاربر ربات راهبر را نشان می‌دهند. لازم به توضیح است، f_h^* بخش فعال نیروی دست کاربر را نشان می‌دهد که در این پژوهش با توابع سینوسی مدل‌سازی شده است و ترم $-B_h \dot{q}_m - K_h q_m$ بخش پسو نیروی واردشده از طرف دست کاربر بر ربات هپتیک را نشان می‌دهد. ترم F_h از طریق یک کانال ارتباطی برای ربات پیرو ارسال می‌شود. نحوه مدل‌سازی F_h برای معماری سه‌کاناله نیز در بخش ۶ ارائه شده است.

دو ویژگی بسیار کاربردی در استخراج دینامیک حاکم بر ربات‌ها مطابق [1] وجود دارند:

ویژگی ۱: ماتریس اینرسی $H(q)$ مثبت معین و متقارن است.

ویژگی ۲: عبارت $\dot{H} - 2C$ پاد متقارن است.

در توضیح ویژگی ۲، باید این نکته بیان شود که انتخاب ماتریس C برحسب روش‌های مختلف یکسان نیست؛ اما یکی از روش‌های معروف و کاربردی برای مسائل رباتیک فرم کرسیتوفل برای ماتریس C است که در اینجا نیز از همین رویکرد برای محاسبه این ماتریس استفاده شده است و ویژگی ۲ در این شرایط صادق است؛ بنابراین، $q_i^T (\dot{H} - 2C) q_i = 0$ است که در آن $i = m, s$ است.

ویژگی ۳: سمت چپ معادلات (۱) و (۲) را می‌توان به فرم پارامترهای فیزیکی به صورت زیر نوشت:

$$H_i(q_i) \ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i) \dot{q}_i + G_i(q_i) = Y_i(q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i) \theta_i \quad (4)$$

که در آن Y_i رگرسور و θ_i بردار پارامترهای فیزیکی است. در این روابط نیز $i = m, s$ که به ترتیب بیانگر ربات راهبر و ربات پیرو هستند. همچنین، این فرمول‌بندی می‌تواند به فرم رگرسور اسلوتین - لی به فرمت زیر نیز تعمیم داده شود:

$$H_i(q_i) \varphi_{1,i} + C_i(q_i, \dot{q}_i) \varphi_{2,i} + G_i(q_i) = Y_i(\varphi_{1,i}, \varphi_{2,i}, q_i, \dot{q}_i) \theta_i \quad (5)$$

۲۲ کنترل چهارکاناله سیستم رباتیکی راهبر - پیرو همراه با انتقال نیروی کاربر ربات راهبر در شرایط برخورد ربات

بخش های بعدی برای اثبات پایداری کل سیستم استفاده شود.

سیستم دینامیکی غیرخطی دلخواهی به فرم زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (6)$$

در این سیستم، x متغیر حالت سیستم و u ورودی سیستم دینامیکی است. چند تعریف که در ادامه مورد نیاز هستند در این بخش ارائه می شوند.

تعریف ۱ (توابع کلاس K) [۱۹]: γ یک تابع کلاس K خواهد بود، اگر پیوسته باشد، اکیداً صعودی باشد و $\gamma(0) = 0$

تعریف ۲ (توابع کلاس K_∞) [۱۹]: تابع γ یک تابع کلاس K_∞ خواهد بود، اگر کلاس K باشد و $\gamma(s) \rightarrow \infty$ زمانی که $s \rightarrow \infty$.

در ادامه، تابع لیاپانوف پایدار ورودی به حالت (ISS) و شرایط پایداری ورودی به حالت سیستم های آبخاری و به هم پیوسته (مرکب) بیان می شوند.

۳-۱-۳-۱-۳ تابع لیاپانوف ISS

یکی از مدرن ترین و کاربردی ترین مفاهیم و رویکردهای اثبات پایداری ورودی به حالت زمانی حاصل می شود که مفاهیم سنتی تابع لیاپانوف با مفاهیمی جدیدتر و مدرن تر مانند توابع اتلاف^۴ ترکیب می شوند؛ به این ترتیب، نامعادلاتی جدید حاصل می شوند که برای اثبات پایداری ورودی به حالت استفاده می شوند.

اگر بتوان یک تابع ذخیره سازی یا انرژی مانند $V(x)$ یافت که در آن $V(0) = 0$ و $V(x) > 0$ ($x \neq 0$)، در این صورت، اگر مشتق تابع لیاپانوف شرط زیر را داشته باشد، می توان تابع لیاپانوف ISS را به آن اطلاق کرد [۱۹]:

$$\nabla V(x) \cdot f(x, u) \leq \theta(\|u\|) - \alpha(\|x\|) \quad (7)$$

که در آن θ و α توابع کلاس K_∞ هستند.

ربات پیرو از دستورات حرکتی ربات راهبر پیروی کند که به این ترتیب، در کنترل سیستم رباتیکی راهبر - پیرو شرکت می کند.

ب) کانال نیرو (F_e): این کانال بازخورد نیروی ربات پیرو را به ربات راهبر ارائه می دهد که باعث واقع گرایی بهتر برای کاربر سمت ربات راهبر از شرایط محیطی ربات پیرو می شود. این کانال به شفافیت هرچه بهتر سیستم کمک می کند.

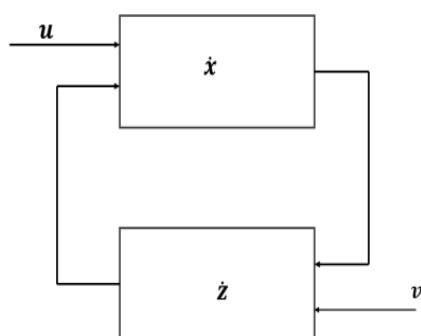
پ) کانال موقعیت بازگشتی از سمت پیرو (q_s): این کانال بازخورد موقعیت ربات پیرو را به سمت راهبر ارائه می دهد که می تواند آگاهی از موقعیت را بهبود بخشد و به این ترتیب، در کنترل سیستم راهبر - پیرو مؤثر است.

ت) کانال بازخورد نیرو (F_h): این کانال بازخورد نیروی وارد شده از طرف کاربر به ربات راهبر را به ربات پیرو ارائه می دهد که با توجه به حضور این ترم در فرمان کنترلی سمت پیرو در رویکرد پیشنهادی، می تواند پایداری و استحکام عملیات را بهبود بخشد.

۳- پایه های ریاضی

با مدل سازی سیستم های رباتیکی راهبر - پیرو به فرم معادلات دیفرانسیل همراه با تأخیر زمانی، امکان بررسی پایداری این سیستم ها در حضور کنترل کننده ها با روش های مبتنی بر پایداری لیاپانوف وجود دارد. رویکردهایی مختلف برای بررسی پایداری سیستم های راهبر - پیرو در قالب روش های لیاپانوف وجود دارند. مهم ترین آن ها رویکردهای مبتنی بر انفعال و پایداری ورودی به حالت هستند. رویکردهای مبتنی بر پایداری ورودی به حالت می توانند گزینه ای مناسب و مطمئن برای اثبات پایداری این سیستم های غیرخطی باشند؛ زیرا سونتاک [۲۰] قضایایی کامل را برای روش ها و شرایط اثبات پایداری سیستم های به هم پیوسته در پژوهش های خود ارائه کرده است.

در حقیقت، رویکردهای مبتنی بر پایداری ورودی به حالت پلی برای ایجاد ارتباط بین رویکردهای ورودی/خروجی و معادلات فضای حالت هستند. برای این منظور، مقدماتی در این بخش ارائه شده اند تا از آن ها در



شکل (۳): سیستم مرکب دارای بازخورد دوطرفه [۲۰]

قضیه بهره کوچک برای تعمیم روند اثبات پایدار ورودی به حالت برای سیستم‌های به هم پیوسته به کار می‌رود.

قضیه ۲ (پایداری ISS فرم دارای بازخورد معادلات به هم پیوسته) [۲۰]: سیستم مرکب شکل (۳) را در نظر بگیرید که در آن بازخورد دوطرفه وجود دارد. در این سیستم، u و v ورودی‌های سیستم مرکب در نظر گرفته می‌شوند.

معادلات هر کدام از این زیرسیستم‌ها به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= g(z, x, v) \\ \dot{x} &= f(x, z, u) \end{aligned} \quad (9)$$

اگر سیستم به هم پیوسته شرایط زیر را داشته باشد، آنگاه پایدار ورودی به حالت (ISS stable) خواهد بود:

۱- هر یک از زیرسیستم‌های \dot{x} و \dot{z} خودشان پایدار ورودی به حالت باشند، زمانی که (z, u) و (x, v) به عنوان ورودی‌های آن‌ها در نظر گرفته شوند. باید در نظر داشت، در این شرایط، γ_1 و γ_2 بهره‌های زیرسیستم‌های x و z هستند.

۲- در این شرایط بهره کوچک کل سیستم به صورت $\rho \in K_\infty$ باشد که در آن $(\gamma_1 + \rho)o(\gamma_2 + \rho) \leq r$ و $r \geq 0$

با مدل‌سازی سیستم‌های راهبر - پیرو به صورت معادلات دیفرانسیلی به هم پیوسته، از این قضایا برای اثبات روند پایدار استفاده می‌شود.

۳-۲- توسعه رویکرد پایداری ورودی به حالت برای سیستم‌های آبخاری و به هم پیوسته

داشتن شرط (۷) در معادله اتلافی که برای یک سیستم توصیف می‌شود، ابزاری بسیار مناسب را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد تا مشابه رویکردهای لیپانوف سنتی، پایداری سیستم‌های آبخاری و به هم پیوسته را اثبات کنند. یافتن تابع لیپانوف گفته شده، مطابق قضایایی که در ادامه بیان می‌شوند، شرط لازم و کافی برای اثبات ISS بودن سیستم است.

قضیه ۱ (شرط ISS بودن سیستم‌های آبخاری) [۲۰]: در سیستم‌های آبخاری، u به عنوان ورودی سیستم \dot{x} و x به عنوان ورودی سیستم \dot{z} دیده می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= f(z, x) \\ \dot{x} &= g(x, u) \end{aligned} \quad (8)$$

در این سیستم‌های دینامیکی، $f(0,0) = 0$ و $g(0,0) = 0$. زمانی که معادله \dot{x} پایدار ورودی به حالت باشد و معادله \dot{z} نیز پایدار ورودی به حالت باشد، با در نظر گرفتن x به عنوان ورودی سیستم z ، کل سیستم آبخاری پایدار ورودی به حالت خواهد بود. شکل ۲ نیز یک سیستم آبخاری را به تصویر می‌کشد.

در ادامه، چگونگی توسعه این قضیه برای سیستم‌های به هم پیوسته نیز ارائه خواهد شد. در سیستم‌های آبخاری، یکی از زیرسیستم‌ها هیچ ورودی خارجی دیگری ندارد و این روند اثبات پایداری ورودی به حالت را ساده‌تر می‌کند؛ ولی در سیستم‌های به هم پیوسته (مرکب)، هر دو زیرسیستم می‌توانند ورودی‌های خارجی داشته باشند.



شکل (۲): سیستم آبخاری [۲۰]

$$\begin{aligned} \tau_s = & H_s(q_s) \Lambda_s(\dot{q}_m - \dot{q}_s) \\ & + C_s(q_s, \dot{q}_s) \Lambda_s(q_m \\ & - q_s) + G_s(q_s) - K_s(\dot{q}_s \\ & + \Lambda_s(q_s - q_m)) \\ & + MEF_h \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن K و E ماتریس‌های قطری با درایه‌های مثبت هستند، M ماتریسی متقارن با درایه‌های مثبت است. سایر ترم‌های مربوط به آن در ادامه معرفی خواهند شد. ماتریس A یک ماتریس قطری با درایه‌های مثبت است. تفاوت اصلی این کنترل‌کننده با [۴۰] در این است که نیرو و اراده فرد کاربر دسته هپتیک سمت راهبر نیز در میزان تلاش کنترلی اعمال شده به پیرو کاملاً مؤثر و دخیل است؛ به این ترتیب، معماری سیستم کنترلی کاربرمحور خواهد شد. با این توصیف، مطابق مدل چهارکاناله ارائه شده، به کاهش تعداد کانال‌های ارتباطی برای حفظ پایداری نیازی نیست.

در ادامه، کنترل‌کننده سمت پیرو به حالت رگرسور خطی سازی دینامیک ربات مبتنی بر کنترل‌کننده ارائه شده تعمیم می‌یابد:

$$\begin{aligned} & H_s(q_s) \Lambda_s(\dot{q}_m - \dot{q}_s) \\ & + C_s(q_s, \dot{q}_s) \Lambda_s(q_m - q_s) + G_s(q_s) \\ & - K_s(\dot{q}_s + \Lambda_s(q_s - q_m)) + MEF_h \quad (12) \\ & = Y_{cs}(q_s, \dot{q}_s, q_m, \dot{q}_m) \theta_s - K_s(\dot{q}_s \\ & + \Lambda_s(q_s - q_m)) + MEF_h \end{aligned}$$

رگرسور خطی سازی دینامیکی برای بهبود عملکرد در برابر عدم قطعیت‌های سیستم دینامیکی استفاده می‌شود تا کنترل‌کننده سمت پیرو بتواند در برابر نامعینی‌های سیستم عملکردی مناسب داشته باشد. در رابطه (۱۲)، ترم Y_{cs} رگرسور ربات پیرو (تابع شناخته شده مختصات تعمیم یافته) و θ_s بردار پارامترهای ربات پیرو (تخمین‌های متغیر زمانی پارامترهای اینرسی p - بعدی ثابت) است. با توجه به آنکه

$$H_s(q_s) \Lambda_s(\dot{q}_m - \dot{q}_s) + C_s(q_s, \dot{q}_s) \Lambda_s(q_m - q_s) + G_s(q_s)$$

هیچ ترمی مبتنی بر شتاب وجود ندارد، دینامیک خطی سازی شده مبتنی بر این کنترل‌کننده ارائه شده نیز به ترم دارای شتاب نیازی ندارد؛ این در شرایطی است که در پژوهش‌های مشابه [۲۴ و ۳۹]، به ترم‌های شتاب برای محاسبات و خطی سازی نیاز است.

۴- طراحی کنترل‌کننده

در پژوهش حاضر، روند طراحی کنترل‌کننده‌ها به گونه‌ای انجام شده است که کامل‌ترین شفافیت با داشتن یک معماری چهارکاناله در کنار حفظ پایداری کل سیستم انجام شود. سناریوی طراحی شده در سیستم راهبر - پیرو به این صورت است که موقعیت مفصل ربات هر سمت موقعیت مطلوب طرف دیگر محسوب می‌شود. باید دقت کرد، نوع سناریوهای مطلوب در سیستم‌های عملیات از راه دور با توجه به نوع کاربردی که دارند تعیین می‌شود. برای مثال، در پژوهش‌های [۱ و ۸]، سناریوی مطرح شده به این صورت است که وظیفه کنترل‌کننده ربات راهبر فقط ISS ساختن دسته هپتیک (ربات راهبر) سمت کاربر نسبت به ورودی دست و بازخورد اغتشاشات محیطی است که از سمت پیرو می‌رسد؛ ولی در پژوهش‌هایی دیگر مانند [۳۹]، با توجه به کاربرد ویژه پزشکی، سیستم عملیات از راه دور به گونه‌ای طراحی شده است که در آن موقعیت ربات هر سمت مسیر مطلوب ربات دیگر باشد؛ بنابراین، در طراحی سیستم‌ها و چندکاناله بودن ارتباط، موضوع‌هایی همچون سناریوی مطلوب باید در نظر گرفته شوند. در اینجا، برای انتقال کامل شفافیت سیستم چهارکاناله طراحی شده است. در ادامه، جزئیات کنترل‌کننده هر سمت مطرح می‌شود.

۴-۱- کنترل‌کننده سمت راهبر

برای کنترل‌کننده سمت راهبر، قانون کنترلی زیر در نظر گرفته می‌شود تا معادله (۱) را پایدار ورودی به حالت سازد:

$$\begin{aligned} \tau_m = & H_m(q_m) \Lambda_m(\dot{q}_s - \dot{q}_m) + \\ & C_m(q_m, \dot{q}_m) \Lambda_m(q_s - q_m) + G_m(q_m) - \\ & K_m(\dot{q}_m + \Lambda_m(q_m - q_s)) \end{aligned} \quad (10)$$

که در آن Λ_m و K_m ماتریس‌های قطری با درایه‌های دلخواه مثبت هستند. باید دقت کرد، اندیس m نشان‌دهنده ربات راهبر و اندیس s نشان‌دهنده ربات پیرو است.

۴-۲- کنترل‌کننده سمت پیرو

برای کنترل ربات پیرو، کنترل‌کننده‌ای بدون نیاز به داشتن اطلاعات شتاب مفاصل پیشنهاد شده است:

علامت است. همچنین، قانون تطبیقی زیر برای محاسبه مقدار تخمین زده شده محدود نامعین θ استفاده می شود:

$$\hat{\theta} = \mathfrak{t} \|e^T Y_i\| \quad (16)$$

که در آن \mathfrak{t} بهره تطبیق پذیری است. جزئیات روند اثبات پایداری در بخش پنجم شرح می شود.

۵- آنالیز پایداری ورودی به حالت برای سیستم چهارکاناله

با توجه به رویکرد اصلی این پژوهش، اثبات پایداری برای سیستم چهارکاناله انجام می شود. اثبات پایداری ورودی به حالت برای فرمت سه کاناله در پژوهش های آتی ارائه خواهد شد. در این بخش، آنالیز و اثبات پایداری ورودی به حالت برای دو زیرسیستم انجام می شود.

ادعای ۱: زیرسیستم حلقه بسته (۱-الف) تحت کنترل کننده ارائه شده (۱۰)، پایدار ورودی به حالت نسبت به متغیرهای حالت $(q_m^T, \dot{q}_m^T)^T$ و ورودی $(q_s^T, F_h + F_e)$ است.

اثبات: با تعریف متغیرهای کمکی به صورت $\tilde{q}_m \triangleq q_m - q_s$ و $e_m \triangleq \dot{q}_m + \Lambda_m \tilde{q}_m$ و بعد از قرار دادن قانون کنترلی (۱۰) در زیرسیستم حلقه بسته سمت راهبر، یعنی معادله (۱-الف)، معادله به فرمت زیر خواهد رفت:

$$\begin{aligned} H_m(q_m)\ddot{\tilde{q}}_m + C_m(q_m, \dot{\tilde{q}}_m)\dot{\tilde{q}}_m - \\ H_m\Lambda_m(\dot{q}_s - \dot{q}_m) - C_m\Lambda_m(q_s - q_m) + \\ K_m(\dot{\tilde{q}}_m + \Lambda_m(q_m - q_s)) = F_h + F_e \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} H_m(q_m)(\ddot{\tilde{q}}_m - \Lambda_m(\dot{q}_s - \dot{q}_m)) + \\ C(q_m, \dot{\tilde{q}}_m)(\dot{\tilde{q}}_m - \Lambda_m(q_s - q_m)) + \\ K_m(\dot{\tilde{q}}_m + \Lambda_m(q_m - q_s)) = F_h + F_e \end{aligned} \quad (18)$$

و در نهایت، به فرمت زیر در خواهد آمد:

$$\begin{aligned} H_m(q_m)\dot{e}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)e_m + \\ K_m e_m = F_h + F_e \end{aligned} \quad (19)$$

$$\dot{\tilde{q}}_m = -\Lambda_m \tilde{q}_m + e_m - \dot{q}_s \quad (20)$$

Λ_m پاسخ یکتای معادله زیر است؛ به طوری که

۴-۳- توسعه کنترل کننده پیرو به فرم مقاوم و

تطبیق پذیر

سیستم های راهبر - پیرو باید دارای مقاومت و تطبیق پذیری هم زمان باشند تا عملکردی قابل اطمینان را در برابر اغتشاشات خارجی یا اختلالات موجود در دینامیک لحظه ای سیستم داشته باشند.

رویکرد پیشنهادی در برابر اغتشاشات خارجی مقاوم است؛ یعنی تضمین می کند عملکرد سیستم حتی در صورت وجود تغییرات یا خطاهای غیرمنتظره حفظ شود. این سیستم همچنین تطبیق پذیر است؛ یعنی خود را با شرایط در حال تغییر وفق می دهد. برای این منظور، در بخش شبیه سازی، تمام پارامترهای دینامیکی به میزان ۲۰ درصد از مقادیر اسمی خود در کنترل کننده مختل می شوند تا به این ترتیب، وضعیت مقاومت رویکرد پیشنهادی در شبیه سازی سنجیده شود.

می توان کنترل کننده (۱۲) را به فرم مقاوم و تطبیق پذیر نیز توسعه داد؛ بنابراین، به فرم زیر بازنویسی می شود:

$$\begin{aligned} \hat{H}_s(q_s)\Lambda_s(\dot{q}_m - \dot{q}_s) \\ + \hat{C}_s(q_s, \dot{q}_s)\Lambda_s(q_m - q_s) + \hat{G}_s(q_s) \\ - K_s(\dot{q}_s + \Lambda_s(q_s - q_m)) + MEF_h \quad (13) \\ = Y_{cs}(q_s, \dot{q}_s, q_m, \dot{q}_m)\hat{\theta}_s - K_s(\dot{q}_s \\ + \Lambda_s(q_s - q_m)) + MEF_h \end{aligned}$$

که در آن علامت $(\hat{\cdot})$ نشان دهنده اطلاعات تخمینی است و $\hat{\theta} \triangleq \theta_0 + \delta\theta$ برقرار است که در آن θ_0 یک بردار پارامترسازی نامی و ثابت است و $\delta\theta$ یک ترم کنترلی اضافی است. در اینجا، $\tilde{\theta} \triangleq \theta_0 - \theta$ برقرار است که نامعینی های پارامتری را بیان می کند. همچنین، نامساوی زیر نیز مفروض است:

$$\|\theta - \theta_0\| \leq \theta \quad (14)$$

که بیانگر آن است که نامعینی پارامتری سیستم با $\theta \geq 0$ محدود می شود؛ در نتیجه، ترم کنترلی اضافی $\delta\theta$ به فرم زیر طراحی می شود:

$$\delta\theta = -\theta \operatorname{sgn}(Y_i^T e) \quad (15)$$

که در آن $e = \dot{q}_s + \Lambda_s \tilde{q}_s$ و $\operatorname{sgn}(\cdot)$ بیانگر تابع

$$\frac{d}{dt}(\tilde{q}_m^T P_m \tilde{q}_m) = -\tilde{q}_m^T (\Lambda_m^T P_m + P_m \Lambda_m) \tilde{q}_m + 2e_m^T P_m \tilde{q}_m - 2\dot{q}_s^T P_m \tilde{q}_m \quad (29)$$

$$\frac{d}{dt}(\tilde{q}_m^T P_m \tilde{q}_m) = -\|\tilde{q}_m\|^2 + 2(P_m^T e_m)^T \tilde{q}_m - 2(P_m^T \dot{q}_s)^T \tilde{q}_m \quad (30)$$

با بازنویسی مشتق تابع لیپانوف، رابطه زیر حاصل خواهد شد:

$$\frac{d}{dt}(V_m) = e_m^T H \dot{e}_m + \frac{1}{2} e_m^T \dot{H} e_m + \epsilon_0 (-\|\tilde{q}_m\|^2 + 2(P_m^T e_m)^T \tilde{q}_m - 2(P_m^T \dot{q}_s)^T \tilde{q}_m) \quad (31)$$

با توجه به رابطه (۱۹) و رابطه زیر:

$$F_{ext} = F_h + F_e \quad (32)$$

در نهایت، رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$\frac{d}{dt}(V_m) = e_m^T H H^{-1} (-C_m e_m - K_m e_m + F_{ext}) + \frac{1}{2} e_m^T \dot{H} e_m + \epsilon_0 (-\|\tilde{q}_m\|^2 + 2(P_m^T e_m)^T \tilde{q}_m - 2(P_m^T \dot{q}_s)^T \tilde{q}_m) \quad (33)$$

که بعد از ساده‌سازی مشتق به شکل زیر در می‌آید:

$$\frac{d}{dt}(V_m) = e_m^T \left(\frac{1}{2} \dot{H} - C_m \right) e_m - e_m^T K_m e_m + e_m^T F_{ext} + \epsilon_0 (-\|\tilde{q}_m\|^2 + 2(P_m^T e_m)^T \tilde{q}_m - 2(P_m^T \dot{q}_s)^T \tilde{q}_m) \quad (34)$$

واضح است، $\lambda_{\min}(K_m)$ وجود دارد؛ به طوری که:

$$-e_m^T K_m e_m \leq -\lambda_{\min}(K_m) \|e_m\|^2 \quad (35)$$

از طرف دیگر، با استفاده از ویژگی شماره ۲ که در بخش معادلات دینامیکی سیستم مطرح شد و نامساوی یانگ که در ادامه بیان می‌شود، روند اثبات کامل می‌شود.

نامساوی یانگ بیان می‌کند برای هر ماتریس دلخواه x و y ، نامساوی زیر برقرار است [۴۱]:

$$x^T y \leq \frac{\Psi}{2} \|x\|^2 + \frac{1}{2\Psi} \|y\|^2 \quad (36)$$

که در آن مقدار حقیقی مثبت است. نامساوی

$$P_m = P_m^T > 0$$

$$\Lambda_m^T P_m + P_m \Lambda_m = I \quad (21)$$

تابع منتخب برای *ISS-Lyapunov* برای زیرسیستم راهبر تحت کنترل‌کننده ارائه شده به صورت زیر خواهد بود:

$$V_m(\tilde{q}_m, e_m) = \frac{1}{2} e_m^T H_m(q_m) e_m + \epsilon_0 \tilde{q}_m^T P_m \tilde{q}_m \quad (22)$$

باید توجه کرد، $\epsilon_0 > 0$ و ثابت است. در ادامه، به کمک ویژگی شماره ۲ که در بخش دوم بیان شد، اثبات خواهد شد تابع لیپانوف گفته شده شرایط تابع لیپانوف *ISS* را دارد و زیرسیستم راهبر در حضور کنترل‌کننده (۱۰) پایدار ورودی به حالت خواهد بود؛ به این ترتیب، از تابع لیپانوف نسبت به زمان مشتق گرفته می‌شود:

$$\frac{d}{dt} V_m = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} e_m^T H_m(q_m) e_m \right) + \frac{d}{dt} (\epsilon_0 \tilde{q}_m^T P_m \tilde{q}_m) \quad (23)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} e_m^T H_m(q_m) e_m \right) = \frac{1}{2} (e_m^T H \dot{e}_m^T + e_m^T \dot{H}_m e_m + \dot{e}_m^T H_m e_m) \quad (24)$$

بنابراین:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} e_m^T H_m(q_m) e_m \right) = e_m^T H \dot{e}_m + \frac{1}{2} e_m^T \dot{H} e_m \quad (25)$$

در ادامه:

$$\frac{d}{dt} (\tilde{q}_m^T P_m \tilde{q}_m) = \dot{\tilde{q}}_m^T P_m \tilde{q}_m + \tilde{q}_m^T P_m \dot{\tilde{q}}_m \quad (26)$$

باید توجه داشت:

$$\dot{\tilde{q}}_m^T = -\tilde{q}_m^T \Lambda_m^T + e_m^T - \dot{q}_s^T \quad (27)$$

در نتیجه:

$$\frac{d}{dt} (\tilde{q}_m^T P_m \tilde{q}_m) = (-\tilde{q}_m^T \Lambda_m^T + e_m^T - \dot{q}_s^T) P_m \tilde{q}_m + \tilde{q}_m^T P_m (-\Lambda_m \tilde{q}_m + e_m - \dot{q}_s) \quad (28)$$

و در نهایت، عبارت زیر حاصل می‌شود:

گفته شده برای تمام ترم‌هایی که در عبارت (۳۱) وجود دارند به شکل زیر برقرار است:

$$(P_m^T e_m)^T \tilde{q}_m \leq \left(\frac{\epsilon_1}{2}\right) \|P_m^T e_m\|^2 + \left(\frac{1}{2\epsilon_1}\right) \|\tilde{q}_m\|^2 \quad (37)$$

و

$$(P_m^T \dot{q}_s)^T \tilde{q}_m \leq \left(\frac{\epsilon_2}{2}\right) \|P_m^T \dot{q}_s\|^2 + \left(\frac{1}{2\epsilon_2}\right) \|\tilde{q}_m\|^2 \quad (38)$$

$$\dot{V} \leq -\eta_1 \|e_m\|^2 - \eta_2 \|\tilde{q}_m\|^2 + \eta_3 \|F_{ext}\|^2 + \eta_4 \|\dot{q}_s\|^2 \quad (43)$$

که در آن $\eta_i > 0$. با توجه به اینکه این عبارت در قالب (۷) قرار گرفته است و تمام ثابت‌های مورد نیاز مطابق (۴۲) یافت شده‌اند، روند اثبات پایداری ISS سمت راهبر تکمیل می‌شود و این زیرسیستم با قانون کنترلی (۱۰) نسبت به متغیرهای حالت $(q_m^T, \dot{q}_m^T)^T$ و ورودی $(q_s^T, F_h + F_e)$ ISS است.

به همین ترتیب:

$$e_m^T F_{ext} \leq \frac{\epsilon_3}{2} \|e_m\|^2 + \frac{1}{2\epsilon_3} \|F_{ext}\|^2 \quad (39)$$

ادعا ۲: زیرسیستم پیرو (۲) تحت قانون کنترلی (۱۱)، پایدار ورودی به حالت نسبت به متغیرهای حالت $(q_s^T, \dot{q}_s^T)^T$ و ورودی‌های (q_m^T, F_e) است.

بقیه ترم‌ها نیز می‌توانند با متغیرهای دیگر به همین صورت اعمال شوند؛ در نتیجه:

$$\dot{V} \leq \left(-\lambda_{\min}(K_m) + \frac{\epsilon_3}{2}\right) \|e_m\|^2 + \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_1} - \frac{\epsilon_0}{\epsilon_2} - \epsilon_0\right) \|\tilde{q}_m\|^2 + \frac{1}{2\epsilon_3} \|F_{ext}\|^2 + \epsilon_0 \epsilon_1 \|P_m^T e_m\|^2 + \epsilon_0 \epsilon_2 \|P_m^T \dot{q}_s\|^2 \quad (40)$$

اثبات: با تعریف متغیرهای کمکی به صورت $\tilde{q}_s \triangleq q_s - q_m$ و قرار دادن قانون کنترلی (۱۱) در زیرسیستم حلقه بسته سمت پیرو، یعنی معادله (۲)، معادله به فرمت زیر خواهد رفت:

$$H_s(q_s)(\dot{q}_s - \Lambda_s(\dot{q}_m - \dot{q}_s)) + C(\dot{q}_s - \Lambda_s(q_m - q_s)) + K_s(\dot{q}_s + \Lambda_s(q_s - q_m)) = F_e + MEF_h \quad (44)$$

$$H_s(q_s)\dot{e}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)e_s + K_s e_s = MEF_h + F_e \quad (45)$$

$$\dot{\tilde{q}}_s = -\Lambda_s \tilde{q}_s + e_s - \dot{q}_m \quad (46)$$

برای اثبات پایداری ورودی به حالت، M ثابت فرض شده است؛ ولی اگر $M = \tilde{H}_s$ باشد، با توجه به محدود بودن ماتریس اینرسی از یک کران بالا و پایین و محدود بودن نیروی ورودی دست انسان F_h ، می‌توان همین روند اثبات پایداری را با تغییرات جزئی دنبال کرد.

بنابراین، با توضیحات ارائه شده، حاصل جمع ترم‌های سمت راست (۴۵) به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$F_e + MEF_h = \tau_d \quad (47)$$

که به نحوی می‌توان آن را کل اغتشاشات یا ورودی سیستم (۴۵) در نظر گرفت. تابع لیاپانوف زیر برای سیستم در نظر گرفته می‌شود:

با در نظر گرفتن $\epsilon_0 \epsilon_1 \|P_m^T e_m\|^2 = \gamma \|e_m\|^2$ و $\epsilon_0 \epsilon_2 \|P_m^T \dot{q}_s\|^2 = \zeta \|\dot{q}_s\|^2$ در آن $\gamma, \zeta > 0$ فرم زیر حاصل خواهد شد:

$$\dot{V} \leq \left(-\lambda_{\min}(K_m) + \frac{\epsilon_3}{2} + \gamma\right) \|e_m\|^2 + \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_1} - \frac{\epsilon_0}{\epsilon_2} - \epsilon_0\right) \|\tilde{q}_m\|^2 + \frac{1}{2\epsilon_3} \|F_{ext}\|^2 + \zeta \|\dot{q}_s\|^2 \quad (41)$$

بنابراین، $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ که همگی بزرگ‌تر از صفر هستند، وجود خواهند داشت و فرم قالب (۷) حاصل شود. برای درک شفاف‌تر و بهتر، کلیه ضرایب بهره مرتبط با (۴۱) به شرح زیر محاسبه شده‌اند:

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{\lambda_{\min}^2(k_m)}{8} \\ \epsilon_1 &= \frac{1}{\lambda_{\min}(k_m)} \\ \epsilon_2 &= \frac{1}{2\lambda_{\min}(k_m)} \\ \epsilon_3 &= \lambda_{\min}(k_m) \end{aligned} \quad (42)$$

۲۸ کنترل چهارکاناله سیستم رباتیکی راهبر - پیرو همراه با انتقال نیروی کاربر ربات راهبر در شرایط برخورد ربات

با توجه به روابط (۱۴) تا (۱۶) و نحوه تعریف ترم تطبیق پذیری δ ، دو ترم آخر با یکدیگر ساده می شوند و همان فرم (۴۵) حاصل می شود که مؤید پایداری ورودی به حالت سیستم در حضور کنترل کننده است.

ادعای ۴: سیستم به هم پیوسته راهبر - پیرو توصیف شده با معادلات (۱-الف) و (۲) با فرمان های کنترلی (۱۰) و (۱۱) یا (۱۳) پایدار ورودی به حالت خواهد شد.

اثبات: پایداری کلی حلقه بسته را می توان با استفاده از تکنیک بهره کوچک تحلیل کرد. ادعای شماره ۱ و ادعای شماره ۲ نشان می دهند زیرسیستم راهبر و زیرسیستم پیرو به ترتیب نسبت به متغیرهای حالت $(q_m^T, \dot{q}_m^T)^T$ ، $(q_s^T, \dot{q}_s^T)^T$ و ورودی های $(q_s^T, F_h + F_e)$ ، (q_m^T, F_e) پایداری ورودی به حالت هستند؛ به این ترتیب، در شرایط بهره کوچک، $\gamma_1 \gamma_2 < 1$ سیستم دینامیکی در مفهوم *ISS* پایدار است [۱۹، ۲۱ و ۳۹]. با توجه به اینکه هر کدام از زیرسیستم های راهبر و پیرو مطابق ادعای ۱، ادعای ۲ و ادعای ۳، اثبات پایداری ورودی به حالت شدند، مطابق قضیه ۲، $\rho(\gamma_1 + \rho) \leq \rho(\gamma_2 + \rho)$ یافت می شود و کل سیستم مرکب پایدار ورودی به حالت خواهد بود.

۶- نتایج شبیه سازی

در این بخش، با انجام شبیه سازی کامپیوتری در نرم افزار سیمولینک متلب^۱، کارآمدی رویکردهای پیشنهادی سنجیده می شود. برای بررسی کارآمدی رویکرد پیشنهادی، در این قسمت دو مثال متفاوت شبیه سازی شده اند. مثال اول یک ربات دولینکی ساده با فرض دانستن دینامیک دقیق و کنترل آن است. در ادامه (به عنوان مثال دوم) برای نشان دادن کارآمدی کنترل تطبیق پذیر ارائه شده در بخش (۴-۳)، مثالی هم از شبیه سازی کنترل کننده مبتنی بر پارامتری سازی خطی دینامیک ربات برای یک ربات سه درجه آزادی *Haptic Omni* مطرح شده است. به این صورت برای حالتی هم که در دینامیک سیستم نامعینی وجود دارد، کارآمدی روش بررسی شده باشد.

به منظور بررسی مقاومت رویکرد پیشنهادی، تمام

$$V(\tilde{q}_s, e_s) = \frac{1}{2} e_s^T H_s(q_s) e_s + \epsilon_0 \tilde{q}_s^T P_s \tilde{q}_s \quad (۴۸)$$

ادامه روند اثبات پایداری ورودی به حالت دقیقاً مشابه مرحله قبل خواهد بود و بنابراین، روند اثبات تکمیل می شود. که در نهایت، با جای گذاری نامساوی ها و استفاده از نامساوی یانگ [۴۱]، چنین عبارتی برای مشتق تابع لیاپانوف حاصل خواهد شد:

$$\dot{V} \leq -(\eta_5) \|e_s\|^2 - (\eta_6) \|\tilde{q}_s\|^2 + \eta_7 \|\tau_d\|^2 + \eta_7 \|\dot{q}_m\|^2 \quad (۴۹)$$

که در آن $\eta_i > 0$. با توجه به اینکه این عبارت در قالب (۷) قرار می گیرد و تمام ثابت های مورد نیاز برای آن یافت می شوند، روند اثبات پایداری *ISS* سمت راهبر تکمیل می شود و این زیرسیستم با قانون کنترلی (۱۱) نسبت به متغیرهای حالت $(q_s^T, \dot{q}_s^T)^T$ و ورودی (q_m^T, F_e) *ISS* است.

ادعا ۳: زیرسیستم پیرو (۲) تحت قانون کنترلی مقاوم تطبیق پذیر (۱۳)، پایدار ورودی به حالت نسبت به متغیرهای حالت $(q_s^T, \dot{q}_s^T)^T$ و ورودی های (q_m^T, F_e) است.

اثبات: با قرار دادن قانون کنترلی (۱۳) در زیرسیستم پیرو (۲)، فرم زیر حاصل خواهد شد:

$$H_s(q_s) \dot{e}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s) e_s + K_s e_s = Y_{cs}(q_s, \dot{q}_s, q_m, \dot{q}_m) (\hat{\theta}_i - \theta) + \tau_d \quad (۵۰)$$

با تعریف تابع لیاپانوف به فرم زیر:

$$V(\tilde{q}_s, e_s) = \frac{1}{2} e_s^T H_s(q_s) e_s + \epsilon_0 \tilde{q}_s^T P_s \tilde{q}_s + \frac{1}{2} \xi^{-1} \theta^2 \quad (۵۱)$$

اگر مشتق تابع لیاپانوف را محاسبه کنیم، عبارتی مشابه (۴۹) به همراه چند ترم جدید حاصل می شود:

$$\dot{V} \leq -(\eta_5) \|e_s\|^2 - (\eta_6) \|\tilde{q}_s\|^2 + \eta_7 \|\tau_d\|^2 + \eta_7 \|\dot{q}_m\|^2 + e_s^T Y(\hat{\theta}_i - \theta) + \xi^{-1} \dot{\theta} \theta \quad (۵۲)$$

نیرو/گشتاور دست فرد به صورت توابع سینوسی مدل‌سازی شده است. این نوع مدل‌سازی در پژوهش‌های مشابه نیز در نظر گرفته شده است. اغتشاشات خارجی به صورت تابع نویز سفید^{۴۲} برای سیستم در نظر گرفته شده‌اند. این اغتشاشات ممکن است از نوع نیروی خارجی باشند که ربات پیرو با آن باید رویارویی داشته باشد یا از نوع دینامیک‌های مدل‌نشده ربات پیرو مانند اصطکاک.

برای بررسی وضعیت عملکرد رویکرد کنترلی پیشنهادی در حضور تأخیر زمانی، در تمام شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، تأخیر زمانی از بلوک راهبر به بلوک پیرو در نظر گرفته شده است؛ یعنی سیگنال‌های ارسالی هم از طرف راهبر به پیرو و هم از طرف پیرو به راهبر دارای تأخیر زمانی ثابت $\delta > 0$ هستند؛ به این ترتیب، نشان داده می‌شود رویکرد پیشنهادی در مقابل تأخیرهای زمانی نیز مقاومت لازم را دارد. شبیه‌سازی در محیط سیمولینک متلب انجام شده است.

۶-۱-۱-۱- برای حالت نیروی ضعیف کاربر

در این حالت، نیروی دست کاربر به صورت $f_h^* = \begin{bmatrix} 8\sin(0.5t) \\ 5\sin(0.5t + 1) \end{bmatrix}$ در نظر گرفته شده است. در ادامه، نمودارهای مربوط به پیروی ربات پیرو از مسیر مطلوب راهبر نشان داده می‌شوند.

رنگ آبی نشان‌دهنده موقعیت مفصل راهبر و رنگ قرمز نشان‌دهنده موقعیت مفصل پیرو است. در شکل (۵)، تلاش‌های کنترلی این حالت نیز برای مفاصل ربات پیرو گزارش شده‌اند.

پارامترهای دینامیکی به میزان ۲۰ درصد از مقادیر اسمی خود در کنترل‌کننده مختل می‌شوند تا به این ترتیب، وضعیت مقاومت رویکرد پیشنهادی در شبیه‌سازی سنجیده شود.

۶-۱-۱- ربات دو درجه آزادی با فرض دانستن دینامیک دقیق ربات

در این بخش، با انجام شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، کارآمدی رویکرد پیشنهادی سنجیده می‌شود. در این پژوهش، فرض شده است هر دو ربات راهبر و پیرو دو درجه آزادی هستند و دینامیک مشابه و ویژگی‌های فیزیکی و جرمی یکسانی دارند.

$$H(q) = \begin{bmatrix} H_{11} & l_2^2 m_2 + l_1 l_2 m \cos(q_2) \\ l_2^2 m_2 + l_1 l_2 m \cos(q_2) & l_2^2 m_2 \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} d_{11} & -l_1 l_2 m_2 \sin(q_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ l_1 l_2 \sin(q_2) \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} g(m_2 l_2 \sin(q_1 + q_2) + (m_1 + m_2) l_1 \sin(q_1)) \\ g m_2 l_2 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (55)$$

لازم به توضیح است که

$$H_{11} = (2l_1 \cos(q_2) + l_2) l_2 m_2 + l_2^2 (m_1 + m_2)$$

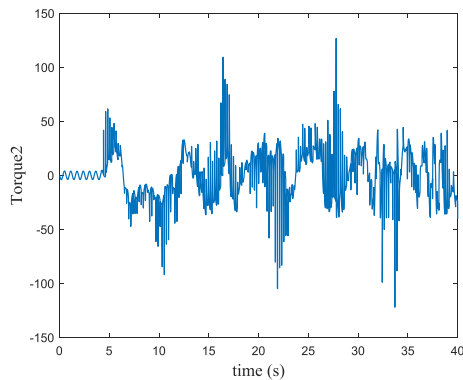
و

$$d_{11} = -l_1 l_2 m_2 \sin(q_2) \dot{q}_2$$

می‌باشند.

برای اطمینان از عملکرد صحیح سیستم کنترلی در انتقال امیدانس و اراده فرد، دو آزمایش متفاوت طراحی شده‌اند. در شبیه‌سازی اول، نیروی دست در مود ضعیف‌تر مدل‌سازی می‌شود و در آزمایش دوم، مود قوی‌تری برای نیرو/گشتاور دست فرد فرض می‌شود. بخش فعال

۳۰ کنترل چهارکاناله سیستم رباتیکی راهبر - پیرو همراه با انتقال نیروی کاربر ربات راهبر در شرایط برخورد ربات



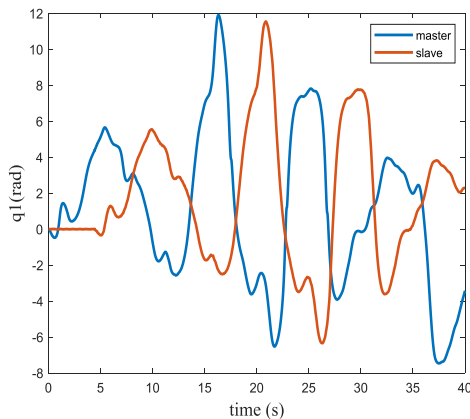
ب) مفصل ۲

شکل (۵): تلاش کنترلی در حالت نیروی دست کاربر ضعیف‌تر

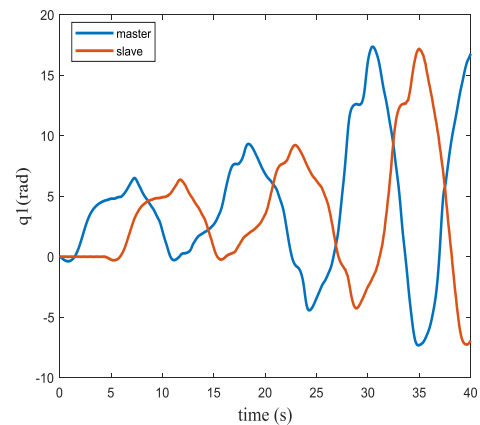
نتایج به دست آمده در پیروی ربات پیرو از راهبر، مطابق معماری چهارکاناله، رضایت بخش است. با وجود حضور تأخیر زمانی و اغتشاشات وارد بر ربات پیرو، این پیروی از مسیر به خوبی انجام می‌شود. تلاش‌های کنترلی نیز در بازه‌ای قابل قبول هستند و با توجه به مشخصات فیزیکی و سناریوی تعریف شده برای سیستم، با توجه به مقاله‌های مشابه، نتایج گشتاور نیز قابل قبول است.

۶-۱-۲- حالت نیروی قوی کاربر

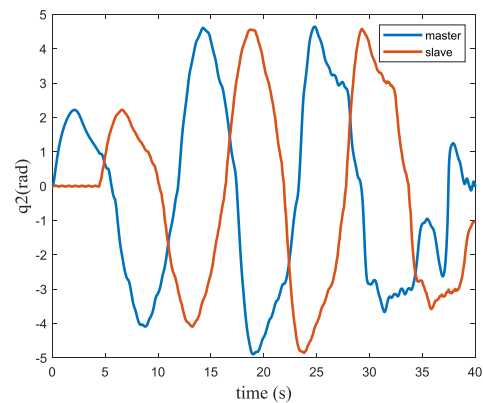
در این حالت، نیروی دست کاربر به صورت $f_h^* = \begin{bmatrix} 12\sin(0.5t) \\ 10\sin(0.5t + 1) \end{bmatrix}$ در نظر گرفته شده است. در ادامه، نمودارهای مربوط به پیروی ربات پیرو از مسیر مطلوب راهبر نشان داده می‌شوند.



الف) مفصل ۱

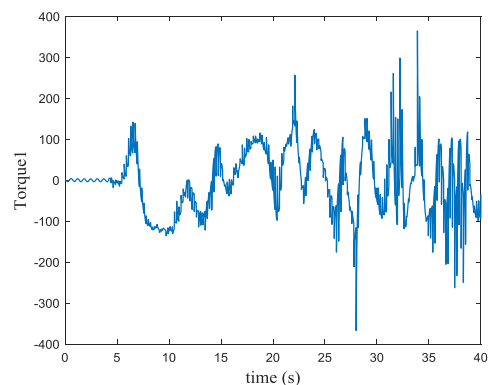


الف) مفصل ۱



ب) مفصل ۲

شکل (۴): پیروی ربات پیرو از راهبر در حالت نیروی دست ضعیف‌تر



الف) مفصل ۱

با نگاهی به بازه نتایج تلاش کنترلی در شکل (۷) و مقایسه آن با شکل (۵)، می توان متوجه شد سیستم ارائه شده در انتقال اراده فرد کاربر به ربات پیرو موفق عمل کرده است؛ به این ترتیب، زمانی که فرد کاربر دسته هپتیک (ربات) راهبر را با نیرویی قوی تر می فشارد، موتورهای ربات پیرو هم در سطح گشتاوری بالاتری به انجام وظیفه محوله از طرف راهبر اقدام می کنند.

۶-۲- شبیه سازی کنترل کننده مبتنی بر پارامتری سازی خطی دینامیک ربات برای یک ربات سه درجه آزادی Haptic Omni

در این بخش، شبیه سازی برای یک ربات سه درجه آزادی Haptic Omni ساخت شرکت Sensable انجام شده است. معادلات این ربات از [۳۹] گزارش شده اند. هرچند مرجع گفته شده معادلات دینامیکی حاکم بر ربات را استخراج کرده است، در روش کنترلی مقاله حاضر، روش مبتنی بر پارامتری سازی خطی دینامیک ربات ارائه شده است؛ به این ترتیب، حتی در اجرای تجربی که ممکن است دینامیک ربات به هر دلیل دچار تغییرات لحظه ای و نامعینی شود، این رویکرد کارآمد خواهد بود.

در این مثال فرض شده است هر دو ربات راهبر و پیرو یکسان هستند و دینامیک مشابه و ویژگی های فیزیکی و جرمی یکسانی دارند. معادلات دینامیکی ربات هپتیک به صورت زیر هستند:

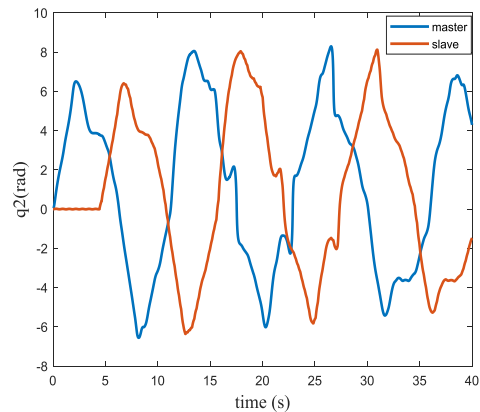
$$H(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & p_5 \sin(q_2) & 0 \\ p_5 \sin(q_2) & p_6 & M_{23} \\ 0 & M_{23} & p_7 \end{bmatrix} \quad (56)$$

که در آن:

$$M_{11} = p_1 + p_2 \cos(2q_2) + p_3 \cos(2q_3) + p_4 \cos(q_2) \sin(q_3) \quad (57\text{-الف})$$

$$M_{23} = -0.5p_4 \sin(q_2 - q_3) \quad (57\text{-ب})$$

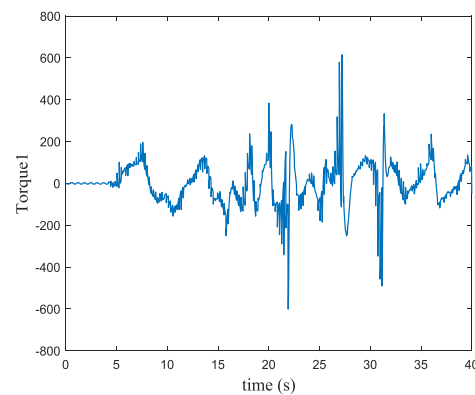
ماتریس C نیز به صورت زیر محاسبه شده است:



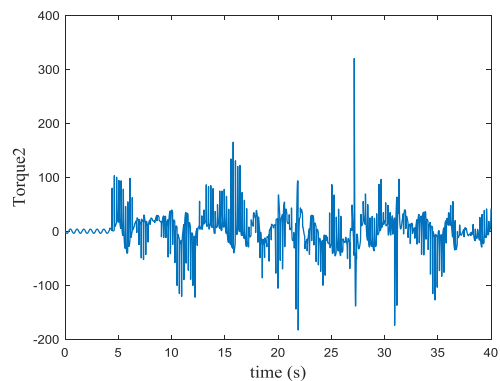
ب) مفصل ۲

شکل (۶): پیروی ربات پیرو از راهبر در حالت نیروی دست قوی تر

که در آن ها رنگ آبی نشان دهنده موقعیت مفصل ربات راهبر و رنگ قرمز نشان دهنده موقعیت مفصل ربات پیرو است. در ادامه، تلاش کنترلی موتورهای ربات پیرو نیز گزارش می شود.



الف) مفصل ۱



ب) مفصل ۲

شکل (۷): تلاش کنترلی در حالت نیروی دست کاربر قوی تر

۳۲ کنترل چهارکاناله سیستم رباتیکی راهبر - پیرو همراه با انتقال نیروی کاربر ربات راهبر در شرایط برخورد ربات

ربات نقش مستقیم دارد؛ به این صورت که با توجه به کنترل کننده (۱۱) که برای سیستم در نظر گرفته شده است و با توجه به رویکرد کنترلی انتخاب شده که مبتنی بر رویکردهای رگرسور اسلوتین - لی است، بردار پارامتری به صورت $\theta = [p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6 p_7 p_8 p_9 p_{10}]^T$ است و ماتریس رگرسور به صورت زیر انتخاب شده است:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_{24} & y_{25} & y_{26} & 0 & y_{28} & 0 & y_{210} \\ 0 & 0 & y_{33} & y_{34} & 0 & 0 & y_{37} & 0 & y_{39} & 0 \end{bmatrix} \quad (61)$$

که در آن:

$$y_{11} = \dot{q}_{m1} - \dot{q}_{s1} \quad (62)$$

$$y_{12} = \cos(2q_2) (\dot{q}_{m1} - \dot{q}_{s1}) - \dot{q}_2 \sin(2q_2) (q_{m1} - q_{s1}) - \dot{q}_1 \sin(2q_2) (q_{m2} - q_{s2})$$

$$y_{13} = \cos(2q_3) (\dot{q}_{m1} - \dot{q}_{s1}) - \dot{q}_3 \sin(2q_3) (q_{m1} - q_{s1}) - \dot{q}_1 \sin(2q_3) (q_{m3} - q_{s3})$$

$$y_{14} = \cos(q_2) \sin(q_3) (\dot{q}_{m1} - \dot{q}_{s1}) - 0.5 \dot{q}_2 \sin(q_2) \sin(q_3) (q_{m1} - q_{s1}) + 0.5 \dot{q}_3 \cos(q_2) \cos(q_3) (q_{m1} - q_{s1}) - 0.5 \dot{q}_1 \sin(q_2) \sin(q_3) (q_{m2} - q_{s2}) + 0.5 \dot{q}_1 \cos(q_2) \cos(q_3) (q_{m3} - q_{s3})$$

$$y_{15} = \sin(q_2) (\dot{q}_{m2} - \dot{q}_{s2}) + \dot{q}_2 \cos(q_2) (q_{m2} - q_{s2})$$

$$y_{24} = -0.5 \sin(q_2 - q_3) (\dot{q}_{m3} - \dot{q}_{s3}) + 0.5 \dot{q}_1 \sin(q_2) \sin(q_3) (q_{m1} - q_{s1}) + 0.5 \dot{q}_3 \cos(q_2 - q_3) (q_{m3} - q_{s3})$$

$$y_{25} = \sin(q_2) (\dot{q}_{m1} - \dot{q}_{s1})$$

$$y_{26} = \dot{q}_{m2} - \dot{q}_{s2}$$

$$y_{210} = q_2 - 0.5\pi$$

$$y_{33} = \dot{q}_1 \sin(2q_3) (q_{m1} - q_{s1})$$

$$y_{34} = -0.5 \sin(q_2 - q_3) (\dot{q}_{m2} - \dot{q}_{s2}) + 0.5 \dot{q}_1 \cos(q_2) \cos(q_3) (q_{m1} - q_{s1}) - 0.5 \dot{q}_2 \cos(q_2 - q_3) (q_{m2} - q_{s2})$$

$$y_{37} = \dot{q}_{m3} - \dot{q}_{s3}$$

$$y_{39} = \sin(q_3)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & 0 & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (58)$$

که درایه‌های آن به صورت زیر ارائه می‌شوند:

$$C_{11} = -p_2 \dot{q}_2 \sin(2q_2) - 0.5 p_4 \dot{q}_2 \sin(q_2) \sin(q_3) - p_3 \dot{q}_3 \sin(2q_3) + 0.5 p_4 \dot{q}_3 \cos(q_2) \cos(q_3) \quad (الف-59)$$

$$C_{12} = p_5 \dot{q}_2 \cos(q_2) - 0.5 p_4 \dot{q}_1 \sin(q_2) \sin(q_3) - p_2 \dot{q}_1 \sin(2q_2) \quad (ب-59)$$

$$C_{13} = -p_3 \dot{q}_1 \sin(2q_3) + 0.5 p_4 \dot{q}_1 \cos(q_2) \cos(q_3) \quad (پ-59)$$

$$C_{21} = p_2 \dot{q}_1 \sin(2q_2) + 0.5 p_4 \dot{q}_1 \sin(q_2) \sin(q_3) \quad (ج-59)$$

$$C_{23} = 0.5 p_4 \dot{q}_3 \cos(q_2 - q_3) \quad (چ-59)$$

$$C_{31} = p_3 \dot{q}_1 \sin(2q_3) + 0.5 p_4 \dot{q}_1 \cos(q_2) \cos(q_3) \quad (د-59)$$

$$C_{32} = -0.5 p_4 \dot{q}_2 \cos(q_2 - q_3) \quad (ذ-59)$$

همچنین، بردار $G(q)$ نیز به صورت زیر ارائه می‌شود:

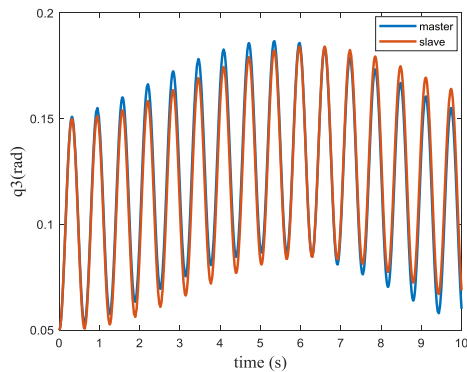
$$G(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ p_8 \cos(q_2) + p_{10}(q_2 - 0.5\pi) \\ p_9 \sin(q_3) \end{bmatrix} \quad (60)$$

جدول (۳) پارامترهای p_1 تا p_{10} را مشخص می‌کند.

جدول (۳): پارامترهای p_1 تا p_{10}

پارامتر	مقدار
p_1	1.798×10^{-3}
p_2	0.864×10^{-3}
p_3	0.486×10^{-3}
p_4	2.766×10^{-3}
p_5	0.308×10^{-3}
p_6	2.526×10^{-3}
p_7	0.652×10^{-3}
p_8	507.5×10^{-3}
p_9	102.2×10^{-3}
p_{10}	294.2×10^{-3}

برای محاسبه دینامیک پارامتری سازی شده ربات از رویکرد [۴۲] استفاده شده است. باید دقت داشت، همواره رویکرد کنترلی انتخابی در شناسایی مدل پارامتری سازی شده



پ) مفصل ۳

شکل (۸) : پیروی ربات پیرو از راهبر

نتایج به دست آمده در پیروی ربات پیرو از راهبر، مطابق معماری چهارکاناله، نشان دهنده کارآمدی رویکرد تطبیق پذیر ارائه شده است. با وجود حضور اغتشاشات وارد بر ربات پیرو، این پیروی از مسیر به خوبی انجام می شود. از گزارش تلاش های کنترلی صرف نظر شده است؛ ولی آن ها نیز در بازه ای قابل قبول هستند و با توجه به مشخصات فیزیکی و سناریوی تعریف شده برای سیستم، با توجه به مقاله های مشابه، می توان به صحت آن ها اطمینان کرد.

۲-۲-۶- سناریوی وجود مانع در مسیر ربات پیرو با رویکرد پیشنهادی چهارکاناله

در این بخش، به منظور سنجش کارآمدی رویکرد کنترلی چهارکاناله پیشنهادی در شرایط حضور مانع در مسیر ربات پیرو، مانعی به صورت زیر در مسیر ربات پیرو تعریف شده است:

$$F_e = \begin{cases} [0 \ 0 \ 0]^T & \text{for } q_2 \leq \frac{\pi}{9} \\ -800 * [0 \ q_2 - \frac{\pi}{9} \ 0]^T & \text{for } q_2 > \frac{\pi}{9} \end{cases} \quad (۶۳)$$

در ادامه، نتایج شبیه سازی فقط برای مفصل دوم ارائه شده است.

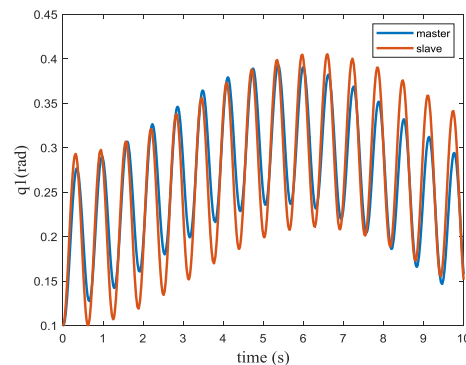
در این قسمت از شبیه سازی، حرکت مفصل دوم ربات پیرو توسط یک مانع تقریباً در طول زمان $t \approx 0$ تا $t \approx 6$ ثانیه و همچنین، $t \approx 12$ تا $t \approx 16$ ثانیه حرکت محدود شده است. مسیر ربات های راهبر/پیرو در شکل زیر نشان

$$f_h^* = \begin{bmatrix} 3\sin(0.5t) \\ \sin(0.5t + 1) \\ \sin(0.5t) \end{bmatrix} \quad \text{نیروی دست کاربر}$$

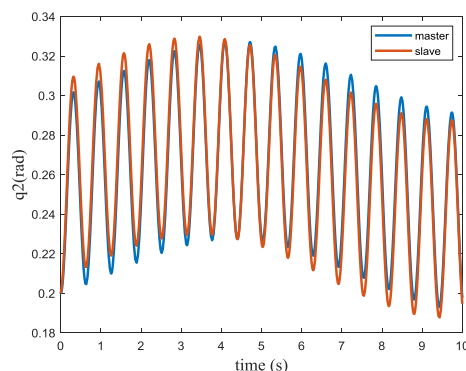
مدل سازی شده است.

۱-۲-۶- سناریوی بدون وجود مانع در مسیر ربات پیرو با رویکرد پیشنهادی چهارکاناله (حرکت آزادانه ربات پیرو)

در این سناریو، هیچ گونه عامل یا مانع مزاحمی در مسیر ربات پیرو تعریف نشده است و نتایج پیروی از مسیر مطلوب در حضور نیروی F_h در فرمان کنترلی ربات پیرو ارائه شده است. در ادامه، نمودارهای مربوط به پیروی ربات پیرو از مسیر مطلوب راهبر نشان داده می شوند. رنگ آبی نشان دهنده موقعیت مفصل ربات راهبر و رنگ قرمز نشان دهنده موقعیت مفصل ربات پیرو است.



الف) مفصل ۱



ب) مفصل ۲

نتایج نشان از کارآمدی رویکرد پیشنهادی دارد. در نمودار آبی، ترم MEF_h در فرمان کنترلی پیرو (۱۱) وجود ندارد و به وضوح مشخص است هنگام برخورد ربات پیرو با مانع در سیستم چهارکاناله هیچ پیروی نیروی نیز رخ نمی‌دهد و ربات پیرو تلاشی برای هل دادن مانع با میزان نیروی مدنظر دست کاربر ربات راهبر نخواهد داشت؛ اما در نمودارهای رنگ سبز و قرمز، ترم کنترلی MEF_h وجود دارد؛ هرچقدر درایه‌های روی سطر ME به مقدار واحد نزدیک‌تر باشند، شفافیت بیشتر می‌شود و پیروی نیروی هنگام برخورد با مانع در سیستم چهارکاناله بهتر انجام می‌شود.

با توجه به نحوه مدل‌سازی F_h به دو بخش فعال و غیرفعال، رویکرد سه‌کاناله نیز در تقلید نیرو هنگام برخورد با مانع پیروی صحیح نیروی را انجام می‌دهد که در بخش بعدی نشان داده شده است؛ اما هدف اصلی این بخش این است که نشان دهد می‌توان حداکثر شفافیت (چهارکاناله بودن) را ضمن پیروی از نیروی مدنظر کاربر و پیروی از مسیر مطلوب راهبر به صورت هم‌زمان به دست آورد که این مهم محقق شده است؛ به این ترتیب در رویکرد چهارکاناله پیشنهادی، ضمن حفظ شفافیت، به هیچ‌گونه دانش قبلی درباره وجود یا عدم وجود مانع در مسیر ربات پیرو نیاز نیست و پیروی ربات پیرو از مسیر ربات راهبر و نیروی مدنظر کاربر (معمولاً انسانی سمت راهبر) هنگام برخورد با موانع تضمین می‌شود.

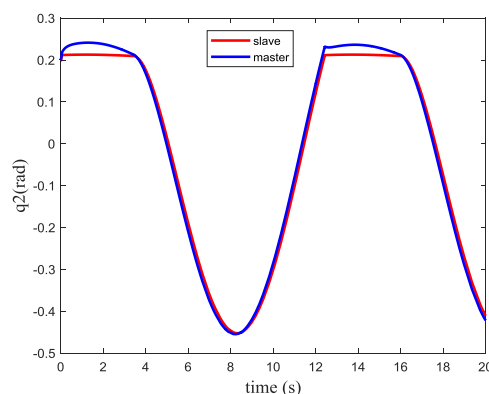
۶-۳- شبیه‌سازی سیستم سه‌کاناله (همراه با مانع)

در این بخش، فرمان‌های کنترلی (۱۰) و (۱۱) روی سیستم راهبر - پیرو (۱-ب) و (۲) اجرا شده‌اند. نتایج آن روی سیستم راهبر - پیرو هپتیک سه درجه آزادی در سیمولینک شبیه‌سازی شده است.

هدف اصلی این شبیه‌سازی نشان دادن کارآمدی رویکرد کنترلی سه‌کاناله پیشنهادی در پیروی نیروی سمت پیرو از نیروی مدنظر دست کاربر دسته هپتیک سمت راهبر است.

سناریوی تعریف شده به این صورت است که در آن نیرو/گشتاور خارجی وارد شده از محیط به ربات پیرو به صورت تابعی از موقعیت مفاصل ربات تعریف شده است؛

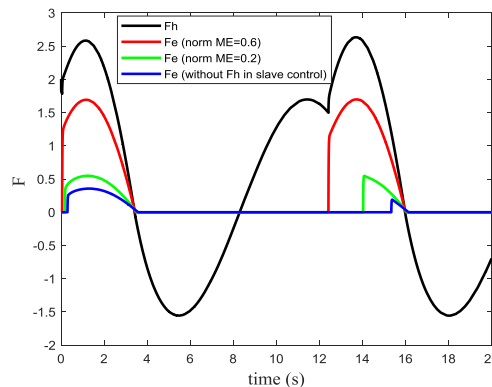
داده شده است. در این قسمت، فقط حرکت مفصل دوم در شکل (۹) نشان داده شده است که در بین مسیر به مانع برخورد می‌کند. پیروی از مسیر بقیه مفاصل نیز به درستی انجام شده است که برای اختصار، از ارائه آن صرف‌نظر می‌شود.



شکل (۹): پیروی ربات پیرو از راهبر در حضور مانع در مسیر

پیرو

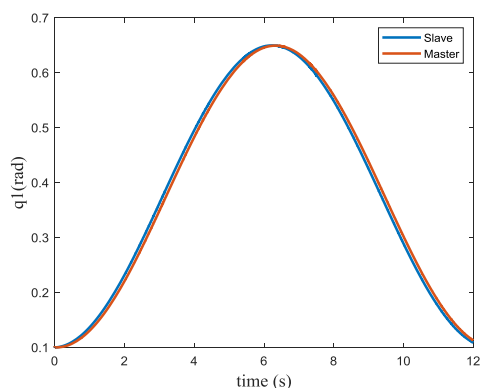
در شکل (۱۰)، پیروی نیروی نشان داده می‌شود.



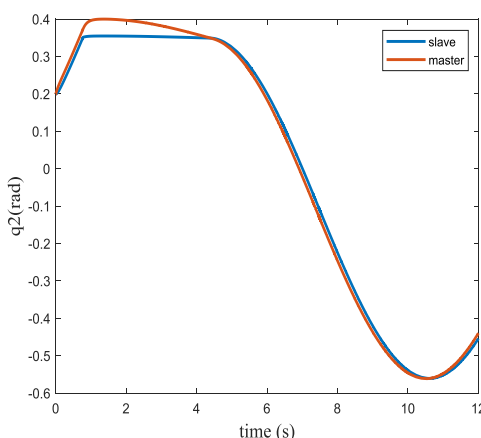
شکل (۱۰): نیرو/گشتاور کاربر و محیط

در تماس ربات پیرو با مانع، مرزبندی نهایی همه سیگنال‌ها برای یک مدل فعال کاربر انسانی و مدل محیط غیرفعال نشان داده شد.

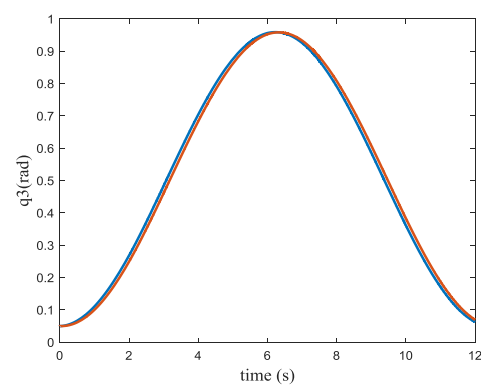
پیروی از مسیر با وجود مانع به درستی انجام شده است. در این سناریو، به خوبی مشخص است ربات تا زمانی که با مانع برخورد دارد (مفصل دوم آن امکان حرکت ندارد)، به وارد کردن نیرو به مانع به میزانی که مدنظر فرد کاربر است اقدام می‌کند. در شکل (۱۰)، دو حالت عدم وجود ترم F_h در فرمان کنترلی پیرو و وجود آن با هم مقایسه شده‌اند که



الف) مفصل ۱



ب) مفصل ۲



پ) مفصل ۳

نتایج پیروی از نیرو/گشتاور مدنظر کاربر دسته هپتیک در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

یعنی در برخی از زوایای کاری ربات، گشتاور خارجی به مفاصل ربات پیرو وارد می‌شود و به اصطلاح مفاصل ربات پیرو با نوعی مانع در حرکت روبه‌رو می‌شوند. مانع به صورت زیر تعریف شده است:

$$F_e = \begin{cases} [0 \ 0 \ 0]^T & \text{for } q_2 \leq \frac{\pi}{9} \\ -800 * [0 \ q_2 - \frac{\pi}{9} \ 0]^T & \text{for } q_2 > \frac{\pi}{9} \end{cases} \quad (64)$$

به همین ترتیب، نیروی دست کاربر هم به صورت زیر مدل می‌شود [۱۴]:

$$F_h = \chi_0 - \chi_m e_m \quad (65)$$

در سیستم سه‌کاناله، اوپراتور (معمولاً انسانی) ربات راهبر به صورت یک سیستم فعال مدل شده است که در آن χ_0 و χ_m مقادیری مثبت هستند. در این مدل، نیروی اوپراتور (معمولاً انسانی) سعی می‌کند یک نیروی ثابت غیرپسی χ_0 را اعمال کند؛ اما مؤلفه دینامیکی غیرپسیو $-\chi_m e_m$ در برابر آن مقاومت می‌کند. این سناریو بیان می‌کند زمانی که فرد کاربر ربات راهبر قصد دارد نیرو/گشتاور χ_0 را وارد کند، با مقاومت $-\chi_m e_m$ روبه‌رو می‌شود. در این شیب‌ساز

$$\chi_0 = \begin{bmatrix} 3\sin(0.5t) \\ 5\sin(0.5t + 1) \\ 5\sin(0.5t) \end{bmatrix}$$

برقرار است.

منطق ارائه‌شده برای تضمین پایداری و دنبال کردن ربات پیرو از مسیر مطلوب ربات راهبر و مقدار نیروی هدف کاربر سمت ربات راهبر با تعریف تابع ISS $Lyapunov$ مناسب اثبات می‌شود. با توجه به تمرکز این پژوهش بر معماری چهارکاناله، از اثبات این موضوع صرف‌نظر و به پژوهش‌های آتی سپرده شده است.

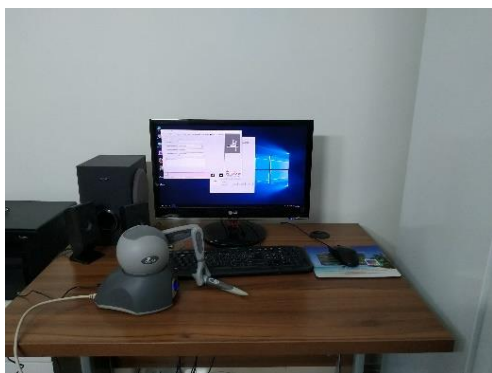
نتایج پیروی از مسیر در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

ربات پیرو با مانعی روبه‌رو شده است و شکل (۱۲) به‌خوبی نشان می‌دهد در این زمان، پیروی نیرویی (گشتاوری) انجام شده است؛ یعنی ربات سعی کرده است با نیرو/گشتاور مدنظر کاربر سمت راهبر مانع را هل دهد.

مزیت پژوهش حاضر به این خاطر است که ترم F_h مستقیماً در فرمان کنترلی سمت پیرو حضور دارد و از نظر گارانتی به مقدار مطلوب رسیدن و اثبات پایداری، می‌توان مشابه [۲۱ و ۴۰]، به روش پایداری ورودی به حالت عمل کرد؛ به این صورت که دینامیک حلقه بسته خطا با توجه به دنباله‌روی F_e از F_h نوشته شود و اثبات پایداری کل سیستم مطابق آن انجام شود که این اثبات برای سیستم سه‌کاناله در پژوهش‌های آتی انجام خواهد شد. کنترل‌کننده پیشنهادی پژوهش حاضر به داشتن شتاب مفاصل یا دینامیک معکوس نیازی ندارد.

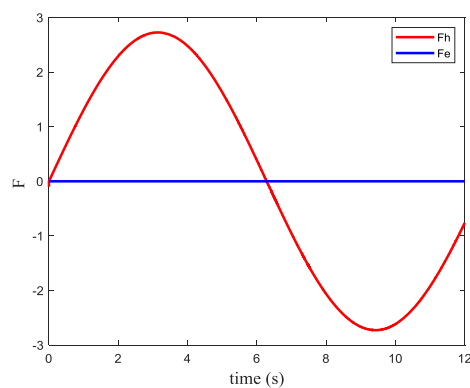
۷- اجرای تجربی

اجرای تجربی سیستم راهبر - پیرو پیشنهادی روی یک مجموعه راهبر - پیرو چهارکاناله انجام شده است. در معماری تهیه‌شده، ربات راهبر واقعی است و محیط و ربات پیرو به صورت مجازی ساخته شده‌اند. شکل (۱۳) ربات هپتیک ساخت شرکت Sensable را به تصویر می‌کشد.

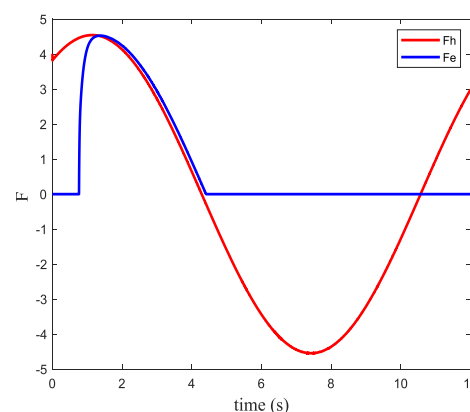


شکل (۱۳): دسته هپتیک Omni Sensable

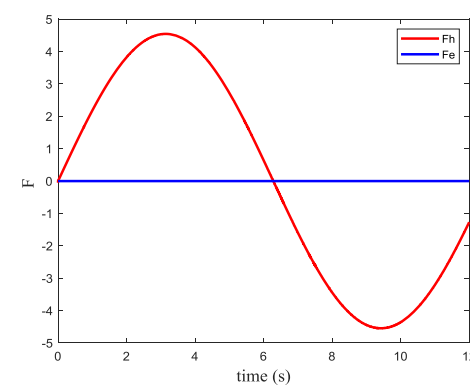
این دسته هپتیک توسط پژوهشگران این پژوهش تهیه شده است تا نقش ربات راهبر را داشته باشد و بازخورد محیط مجازی پیرو را به‌خوبی نشان دهد. معماری سیستم راهبر - پیرو نیمه‌تجربی اجراشده در شکل (۱۴) نشان داده



الف) مفصل ۱



ب) مفصل ۲

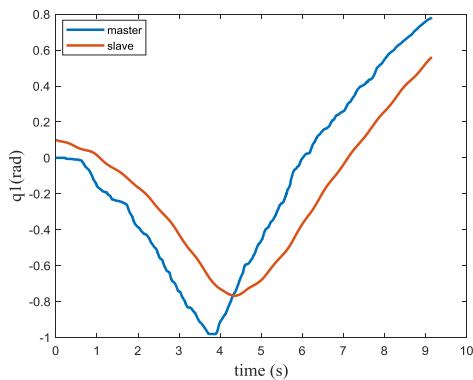


پ) مفصل ۳

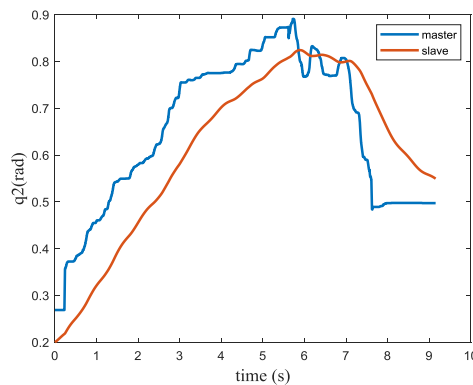
شکل (۱۲): نیرو/گشتاور کاربر و محیط

نتایج نیرو/گشتاور دست کاربر دسته هپتیک و نیروی وارد از محیط به ربات پیرو کاملاً منطبق با رویکرد مدنظر است. در مواقعی که مفاصل ربات حرکت آزادانه دارند، طبیعی است، نیروی واردشده از محیط پیرو به ربات راهبر صفر است و در زمان $t \approx 2$ تا $t \approx 5$ ثانیه، مفصل دوم

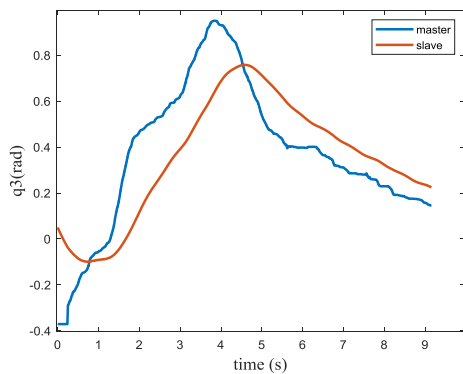
شده است. در این معماری، ربات سمت راهبر واقعی است و ربات و محیط سمت پیرو به صورت مجازی طراحی شده‌اند؛ در نتیجه، کاربر دسته هپتیک (ربات سمت راهبر) می‌تواند بازخوردهای سمت پیرو را حس کند. ربات راهبر و پیرو یکسان در نظر گرفته شده‌اند.



الف) مفصل ۱



ب) مفصل ۲

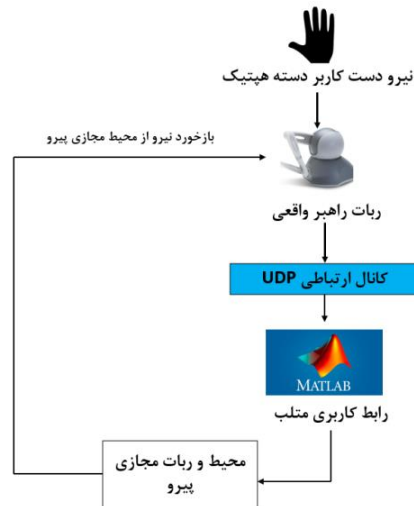


پ) مفصل ۳

شکل (۱۵): نتایج پیروی پیرو مجازی از راهبر واقعی

بستر نیمه تجربی

تطبیق‌پذیری هم در آزمایشات حرکت آزاد و هم در آزمایش‌های برخورد ربات با مانع استفاده شد. همان‌گونه که در تصاویر مشخص است، مقدار خطای پیروی تمام مفاصل کمتر از ۰/۲ رادیان است. نتایج به‌دست‌آمده در آزمون تجربی نشان از عملکرد صحیح سیستم کنترلی راهبر - پیرو



شکل (۱۴): معماری سیستم راهبر - پیرو نیمه تجربی

همان‌گونه که در معماری سیستم، یعنی شکل (۱) توضیح داده شد، رویکرد اصلی این پژوهش یک معماری چهارکاناله است که حداکثر شفافیت ممکن را در ارتباط میان ربات راهبر و پیرو فراهم می‌آورد. سیگنال‌های نیروی محیط پیرو (در اینجا محیط مجازی) و موقعیت از سمت پیرو به راهبر می‌رسند و سیگنال موقعیت و نیروی دست کاربر هم به ربات پیرو می‌رسند و در فرمان کنترلی سمت پیرو دخیل خواهند بود؛ به این ترتیب، حداکثر شفافیت ممکن با تعداد چهار کانال میسر می‌شود. ارتباط میان ربات هپتیک راهبر و نرم‌افزار متلب از طریق پروتکل داده‌نگار کاربر^{۴۳} برقرار می‌شود. فرمان کنترلی از طریق سیمولینک متلب اعمال می‌شود و از یک فایل C-MEX که در زبان ++C برنامه‌نویسی پایه آن انجام شده است، بهره می‌برد. این برنامه بر پایه ابزارهایی توسعه یافته است که کیت توسعه نرم‌افزار^{۴۴} شرکت سازنده ربات آن‌ها را در اختیار قرار داده است. نتایج اجرای تجربی در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

رباتیکی است، توسعه داده شد. نوع نگاه این مقاله به سیستم‌های راهبر - پیرو نزدیک به نگاهی است که پژوهشگران حوزه سیستم‌های عملیات از راه دور در پزشکی (مانند ربات‌های جراحی چشم) دارند؛ یعنی موقعیت هر ربات مسیر مطلوب ربات سمت دیگر را می‌سازد. چنین نگاهی برای بحث آموزش دانشجویان جراحی کاربردی است. پژوهش حاضر می‌تواند با هر نوع نگاه دیگری به نحوه تقلید ربات پیرو از راهبر نیز توسعه داده شود. برخلاف بسیاری از پژوهش‌های پیشین که برای ایجاد مصالحه میان شفافیت و پایداری تعداد کانال‌های ارتباطی را کاهش داده بودند، این پژوهش یک سیستم کامل چهارکاناله را پیشنهاد کرده است. مطابق کنترل‌کننده طراحی شده برای ربات پیرو که مبتنی بر رگرسیون اسلوتین - لی و بدون نیاز به داشتن اطلاعات شتاب مفاصل است، نیروی دست کاربر سمت راهبر در فرمان کنترلی ربات پیرو دخیل می‌شود و اراده فرد کاربر به ربات پیرو منتقل می‌شود. اثبات پایداری ورودی به حالت برای کل سیستم انجام شده است. ترم اضافه‌شده به کنترل‌کننده ممکن است نوعی امیدانس یا سفتی متغیر با زمان تلقی شود که از سمت راهبر ارسال می‌شود. در محاسبات ماتریس رگرسیون خطی‌ساز دینامیک ربات و فرمان کنترلی، نیازی به داشتن شتاب مفاصل نیست. با افزودن ترم کنترلی اضافی و تعریف یک قانون تطبیق‌پذیر، رویکرد پیشنهادی عملکردی خوب در برابر نامعینی‌های سیستم داشته است. نتایج شبیه‌سازی کارآمدی رویکرد کنترلی پیشنهادشده را نشان می‌دهد. اجرای تجربی بستر راهبر - پیرو صحت رویکرد پیشنهادی را تأیید کرده است. نتایج به‌خوبی نشان دادند در عمل نیز در حضور اغتشاشات خارجی، معماری چهارکاناله پیشنهادی این پژوهش در کنترل سیستم راهبر - پیرو موفق عمل می‌کند. با مقایسه نتایج رویکرد چهارکاناله پیشنهادی با رویکرد سه‌کاناله، می‌توان دریافت رویکرد چهارکاناله پیشنهادی ضمن حفظ بیشترین شفافیت ممکن، پیروی نیرویی هنگام برخورد با موانع را به‌درستی انجام می‌دهد؛ ضمن آنکه رویکرد چهارکاناله پیشنهادی، همچون پژوهش‌های پیشین، به اطلاعات قبلی وجود یا عدم وجود موانع در مسیر ربات پیرو نیازی ندارد و پیروی موقعیت

پیشنهادی دارد. ربات پیرو مجازی در حضور فرم رگرسوری پیشنهادی موفق شده است به‌درستی از مسیر مطلوب ربات راهبر پیروی کند. با تغییر در ضرایب و ثوابت کنترلی، حس سفت‌تر شدن (یا برعکس) به‌خوبی به دست کاربر دسته هپتیک منتقل می‌شود. طبیعی است، در اجرای تجربی کمی اختلاف ثابت میان موقعیت راهبر و پیرو باقی می‌ماند. به طور عمدی، در موقعیت اولیه، راهبر واقعی و پیرو مجازی با کمی اختلاف از یکدیگر قرار داده شده‌اند تا وابستگی رویکرد کنترلی به مقدار اولیه موقعیت ربات‌ها هم در عمل سنجیده شود. پیروی خوب نتایج نشان از وابسته نبودن کنترل‌کننده پیشنهادی و رویکرد چهارکاناله به مقدار اولیه دارد. این موضوع در هر دو حالت شبیه‌سازی سیمولینک و اجرای تجربی به‌خوبی نمایان شده است.

مقدار نیروی دست فعال کاربر به صورت توابع سینوسی در نظر گرفته شده است (f_h^*). در هر دو حالت شبیه‌سازی و اجرای تجربی، ماتریس‌های B_h و K_h به عنوان ماتریس‌های قطری با درایه روی قطر به‌ترتیب ۱ و ۱۰ در نظر گرفته شده‌اند. در ثانیه‌های ۶ تا ۸ در ربات هپتیک سمت راهبر احساس برخورد با مانعی حس می‌شود که در نتایج شکل (۱۵) مشهود است؛ زیرا برای ربات پیرو در این هنگام مانعی در نظر گرفته شده است. موانع آزمایش تجربی، نسبت به شبیه‌سازی، زمانی کوتاه‌تر را شامل می‌شوند. برای محاسبه F_e ، از تخمین‌گر اغتشاش [۴۳] استفاده شده است که این مقدار به صورت لحظه‌ای به سمت ربات راهبر ارسال می‌شود.

نتایج تجربی نشان می‌دهد در فرمت چهارکاناله، پیروی از مسیر به‌خوبی انجام شده است. چالش ایجاد مصالحه میان شفافیت و حفظ پایداری در سیستم‌های راهبر - پیرو به کمک معماری چهارکاناله و کنترل‌کننده پیشنهادی به‌درستی در این پژوهش انجام شده است. در بخش تجربی، فقط رویکرد چهارکاناله سنجش شده است و رویکرد سه‌کاناله به‌تفصیل در پژوهش‌های آتی بحث خواهد شد.

۸- جمع‌بندی

در این پژوهش، یک معماری چهارکاناله که دارای بیشترین شفافیت ممکن در سیستم‌های عملیات از راه دور

- [13] Y. C. Liu, M. H. Khong, T. W. Ou, "Nonlinear bilateral teleoperators with non-collocated remote controller over delayed network", *Mechatronics*, Vol. 45, pp. 25-36, August 2017.
- [14] T. Hatanaka, N. Chopra, M. Fujita, M. W. Spong, "Passivity-based control and estimation in networked robotics", Cham, Switzerland: Springer; 10 April 2015.
- [15] B. Brogliato, R. Lozano, I. D. Landau, "New relationships between Lyapunov functions and the passivity theorem", *International journal of adaptive control and signal processing*, Vol. 7, No. 5, pp. 353-365, September 1993.
- [16] V. Santibáñez, R. Kelly, "Energy shaping based controllers for rigid and elastic joint robots: analysis via passivity theorems", *In Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2225-2231, 25 April 1997.
- [17] A. R. Teel, "Connections between Razumikhin-type theorems and the ISS nonlinear small gain theorem", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 43, No. 7, pp. 960-964, July 1998.
- [18] M. De la Sen, N. Luo, "On the uniform exponential stability of a wide class of linear time-delay systems", *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Vol. 289, No. 2, pp. 456-476, 15 January 2004.
- [19] H. K. Khalil, "Nonlinear control", New York: Pearson, 28 May 2015.
- [20] E. D. Sontag, "On the Input-to-State Stability Property", *Eur. J. Control*, Vol. 1, No. 1, pp. 24-36, January 1995.
- [21] I. G. Polushin, A. Tayebi, H. J. Marquez, "Control schemes for stable teleoperation with communication delay based on IOS small gain theorem", *Automatica*, Vol. 42, No. 6, pp. 905-915, June 2006.
- [22] M. Motamedi, M. T. Ahmadian, G. Vossoughi, S. M. Rezaei, M. Zareinejad, "Adaptive sliding mode control of a piezo-actuated bilateral teleoperated micromanipulation system", *Precision Engineering*, Vol. 35, No. 2, 1 April 2011.
- [23] A. Hace, K. Jezernik, "Bilateral teleoperation by sliding mode control and reaction force observer", *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1809-1816, 4 July 2010.
- [24] J. J. Slotine, W. Li, "On the adaptive control of robot manipulators", *The international journal of robotics research*, Vol. 6, No. 3, pp. 49-59, September 1987.
- [25] S. Mobayen, "An adaptive fast terminal sliding mode control combined with global sliding mode scheme for tracking control of uncertain nonlinear third-order systems", *Nonlinear Dynamics*, Vol. 82, No. 1, pp. 599-610, October 2015.
- [26] Erfanian Omidvar, A., Pooyan, M., Khalighfar, M. Neuro-Terminal Sliding Control in arm movement using online routing algorithm. *Computational Intelligence in Electrical Engineering*; Vol. 6, No. 4, pp.0-35, 2016.
- [27] I. G. Polushin, S. N. Dashkovskiy, A. Takhmar, R. V. Patel, "A small gain framework for networked cooperative force-reflecting teleoperation", *Automatica*, Vol. 49, No.2, pp.

مفاصل و نیرویی ربات پیرو از راهبر را تحت هر شرایطی تضمین می‌کند.

مراجع

- [1] K. D. Kallu, J. Wang, S. J. Abbasi, M. C. Lee, "Estimated reaction force-based bilateral control between 3dof master and hydraulic slave manipulators for dismantlement", *Electronics*, Vol. 16, No. 7, pp. 256, 16 October 2018.
- [2] Y. Song, L. Li, Y. Tian, Z. Li, X. Yin, "A Novel Master-Slave Interventional Surgery Robot with Force Feedback and Collaborative Operation", *Sensors*, Vol. 23, No. 7, pp. 3584, 29 Mars 2023.
- [3] K. Hashtrudi-Zaad, S. E. Salcudean, "Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 1, pp. 108-114, 7 August 2002.
- [4] R. C. Goertz, R. A. Blomgren, J. H. Grimson, G. A. Forster, W. M. Thompson, W. H. Kline, "The ANL Model 3 Master-Slave Electric Manipulator-- Its Design and Use in a Cave Trans", *Am Nuclear Soc*, Vol. 4, No. 2, 1 November 1961.
- [5] C. R. Flatau, "SM-229: a new compact servo master-slave manipulator", In Proceedings of the 25th conference on remote systems technology, 1977.
- [6] Y. Yokokohji, T. Yoshikawa, "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment", *IEEE transactions on robotics and automation*, Vol. 10, Issue. 5, pp. 605-620, October 1994.
- [7] S. E. Salcudean, M. Zhu, W. H. Zhu, K. Hashtrudi-Zaad, "Transparent bilateral teleoperation under position and rate control", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 19, Issue. 12, pp. 1185-1202, December 2000.
- [8] R. J. Anderson, M. W. Spong, "Asymptotic stability for force reflecting teleoperators with time delay", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 11, Issue. 2, pp. 135-149, April 1992.
- [9] I. G. Polushin, H. J. Marquez, "Stabilization of bilaterally controlled teleoperators with communication delay: an ISS approach", *International Journal of Control*, Vol. 76, No. 8, pp. 858-870, January 2003.
- [10] G. Niemeyer, J.J. Slotine, "Stable adaptive teleoperation", *IEEE Journal of oceanic engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 152-162, January 1991.
- [11] E. Nuño, R. Ortega, N. Barabanov, L. Basañez, "A globally stable PD controller for bilateral teleoperators", *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 3, pp. 753-758, June 2008.
- [12] C. C Hua, X. P. Liu, "Delay-dependent stability criteria of teleoperation systems with asymmetric time-varying delays", *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 26, No. 5, pp. 925-932, October 2010.

- [36] X. Liu, M. Tavakoli, "Adaptive inverse dynamics four-channel control of uncertain nonlinear teleoperation systems", *Advanced Robotics*, Vol. 25, No. 13-14, pp. 1729-1750, January 2011.
- [37] J. E. Colgate, "Robust impedance shaping telemanipulation", *IEEE Transactions on robotics and automation*, Vol. 9, No. 4, pp. 374-384, August 1993.
- [38] D. Lee, P. Y. Li, "Passive bilateral feedforward control of linear dynamically similar teleoperated manipulators", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 3, pp. 443-456, June 2003.
- [39] M. Motaharifar, H. D. Taghirad, "A force reflection robust control scheme with online authority adjustment for dual user haptic system", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 135, January 2020.
- [40] A. Rashvand, R. Heidari, M. Motaharifar, A. Hassani, M. R. Dindarloo, M. J. Ahmadi, K. Hashtrudi-Zaad, M. Tavakoli, H. D. Taghirad, "An observer-based responsive variable impedance control for dual-user haptic training system", 2022 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 9635-9641, 23 October 2022.
- [41] H. L. Royden, "Real analysis", 1988.
- [42] M. Motaharifar, H. D. Taghirad, K. Hashtrudi-Zaad, S. F. Mohammadi, "Control of dual-user haptic training system with online authority adjustment: An observer-based adaptive robust scheme", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 28, No. 6, pp. 2404-2415, 30 October 2019.
- [43] A. Mohammadi, M. Tavakoli, H. J. Marquez, F. Hashemzadeh, "Nonlinear disturbance observer design for robotic manipulators", *Control Engineering Practice*, Vol. 21, No. 3, pp. 253-267, March 2013.
- 338-348, February 2013.
- [28] A. Khanzadeh, S. Ganjefar, M. Ghaemifar, "An adaptive controller for cooperative teleoperation system with time-varying delay and formation", 2023 11th *RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, pp. 48-53, 19 December 2023.
- [29] M. Sheykh, H. A. Talebi, I. Sharifi, "Decentralized control of telerehabilitation systems subject to communication delay using multi-agent systems theory", 2023 11th *RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, pp. 109-115, 19 December 2023.
- [30] M. Ragaglia, A. Argiolas, M. Niccolini, "Inverse kinematics for teleoperated construction machines: a novel user-oriented approach", *Advanced Construction and Building Technology for Society*, 24 October 2016.
- [31] A. Ajoudani, N. Tsagarakis, A. Bicchi, "Tele-impedance: Teleoperation with impedance regulation using a body-machine interface", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 31, No. 13, pp. 1642-1654, November 2012.
- [32] A. Ajoudani, "Transferring human impedance regulation skills to robots", *Springer International Publishing*, 2016.
- [33] D. A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation", *IEEE transactions on robotics and automation*, Vol. 9, No. 5, pp. 624-637, October 1993.
- [34] E. Delgado, A. Barreiro, P. Falcón, M. Díaz-Cacho, "Robust stability of scaled-four-channel teleoperation with internet time-varying delays", *Sensors*, Vol. 16, No. 5, pp. 593, 26 April 2016.
- [35] M. Laghi, A. Ajoudani, M. G. Catalano, A. Bicchi, "Unifying bilateral teleoperation and tele-impedance for enhanced user experience", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 39, No. 4, pp. 514-539, March 2020.

¹ Master
² Slave
³ Tele-operation
⁴ Passivity
⁵ Input-to-state stability
⁶ Ortega
⁷ PD-like
⁸ Hua & Liu
⁹ Liu
¹⁰ Hatanaka
¹¹ Network-Robotics
¹² Damping-Injection
¹³ Scattering-Based
¹⁴ Passive
¹⁵ Razumikhin-Type
¹⁶ Polushin & Marquez

- 17 Global
- 18 Sontag
- 19 Small-Gain
- 20 Motamedi
- 21 Hacı & Jezernik
- 22 Chattering
- 23 Slotine–Li
- 24 Fast Terminal Sliding Mode
- 25 Interconnected
- 26 Khanzadeh
- 27 Sheikh
- 28 User-oriented
- 29 Ajoudani
- 30 Tele-Impedance
- 31 Lawrence
- 32 UDP
- 33 Tavakoli
- 34 Colgate
- 35 Yokokohji & Yoshikawa
- 36 Laghi
- 37 Motaharifard & Taghirad
- 38 Cascade
- 39 Combined
- 40 Dissipation functions
- 41 Matlab Simulink
- 42 White noise
- 43 UDP
- 44 SDK

