مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، صفحه۷۷-۶۳

طراحی یک ساختارکنترلی مقاوم مبتنی بر انعکاس نیرو با قابلیت انتقال بر خط اختیار عملیات در سامانه هپتیک دوکاربره آموزش جراحی

محمد مطهری فر[۱]، حمیدرضا تقی راد[۲]، سید فرزاد محمدی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، motaharifar@email.kntu.ac.ir

[۲] استاد، دانشکدهٔ مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ، taghirad@kntu.ac.ir

[۲] دانشیار، مرکز تحقیقات چشم، گروه کنترل، دانشگاه علوم پزشکی تهران، sfmohammadi@tums.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۲ ویرایش اول: ۱۳۹۷/۰۵/۰۵ ویرایش دوم: ۱۳۹۷/۱۱/۰۳ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴

چکیده: در این تحقیق یک ساختار کنترلی مبتنی بر انعکاس نیرو برای سامانه هپتیک آموزش جراحی توسعه داده می‌شود. در سامانه هپتیک آموزش جراحی عملیات جراحی به صورت مشارکتی توسط استاد و دستیار انجام می‌شود. مشارکت هر یک از این دو جراح در عملیات توسط کنسولهای هپتیکی که در اختیار دارند امکانپذیر می‌شود. علیرغم آنکه عملیات اصلی به طور پیش‌فرض توسط دستیار انجام می‌شود، استاد می‌تواند در صورت بروز انحراف از سوی دستیار در عملیات مداخله نماید و اشتباهات احتمالی دستیار را تصحیح نماید. برای آنکه استاد قادر باشد در حین انجام عملیات، اختیار عمل را از دستیار به خود منتقل نماید، نیروی دست استاد در مواقع لزوم از طریق سامانه هپتیک به دستان دستیار منتقل می‌شود. با استفاده از سامانه هپتیک، موقعیت دستیار به سمت استاد منتقل می‌شود تا از این طریق استاد اطلاعات موقعیت لحظه‌ای ابزار جراحی را در اختیار داشته باشد. کنترل‌کننده های پایدارساز برای هر یک از کنسول های هپتیک توسعه داده می‌شود. پایداری کلی مجموعه با استفاده از روش «پایداری ورودی به حالت» تحلیل می‌شود. نتایج شبیه سازی صحت عملکرد ساختار کنترلی پیشنهادی را تایید می‌کنند.

کلمات کلیدی: رباتیک، سامانه هپتیک، آموزش جراحی، کنترل مقاوم.

A Robust Controller with Online Authority Transformation for Dual User Haptic Training System

Mohammad Motaharifar, Hamid D. Taghirad, Seyed-Farzad Mohammadi

Abstract: In this study, a force reflection control structure is developed for the surgery training haptic system. In the surgery training haptic system, the surgical operation is cooperatively performed by a trainer and a trainee. The participation of each surgeon in the operation is established through their own haptic consoles. Although the operation is primarily performed by the trainee, the trainer is able to interfere into the procedure in case of observing any deviation on the part of trainee and correct the probable mistakes. To transform the task authority between the trainer and the trainee, the hand force of the trainer is reflected to the hands of the trainee. Utilizing the haptic system, the position of the trainee is transformed to the hands of the trainer, thus the trainer has necessary information regarding the current position of the surgical operation. Stabilizing controllers are developed for each haptic console. The stability of the closed loop system is analyzed using the Input-to-State Stability (ISS) approach. The simulation results confirmed the appropriate performance of the proposed structure.

Keywords: Robotics, Haptic System, Surgery Training, Robust Control.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]

۱- مقدمه

در طول دهه‌های گذشته توجهات فراوانی معطوف به سامانه‌های عمیات از دور به عنوان یک دسته مهم از سامانه‌های رباتیک شده است. سامانه عملیات از دور سامانه‌ای متشکل از یک ربات راهبر و یک ربات رهرو به همراه کاربر و محیط و همچنین لینک ارتباطی و کنترل‌کننده است که به کاربر توانایی ارسال فرمانهای لازم از ربات راهبر به ربات رهرو و انجام عملیات بر روی محیط را می‌دهد. این ساختار به انسان کمک می‌کند که کارهایی را از فاصله دور و در شرایط غیر قابل دسترس انجام دهد. قابلیت منحصر به فرد این سامانه‌ها در تعامل با محیط‌های خطرناک و یا غیر قابل دسترس باعث شده است که برای کاربردهایی نظیر اکتشافات فضایی، آزمایش بر روی مواد سمی، و جراحی از دور مناسب باشد. مرور تاریخی جامعی از این سامانه‌ها در [۱] ارایه شده است.

یکی از زمینه‌های تحقیقاتی نسبتاً نوین مرتبط با سامانه‌های عمیات از دور، سامانه‌های هپتیک چند کاربره و به صورت خاص دو کاربره است که در آن دو کاربر به صورت مشارکتی عملیاتی را انجام می‌دهند. دو کاربرد مهم سامانه های هپتیک دو کاربره شامل توانبخشی رباتیکی از دور [۲] و آموزش جراحی [۳] می‌باشند. در کاربرد آموزش جراحی که تمرکز اصلی این پژوهش است دو جراح شامل استاد و دستیار به صورت مشارکتی از طریق کنسول‌های هپتیک عملیات جراحی را انجام می‌دهند. تا به حال ساختارهای کنترلی مختلفی برای سامانه هپتیک دو کاربره معرفی شده است. در [۴] که یکی از تحقیقات پایه‌ای در این زمینه محسوب می‌شود، مفهوم فاکتور تسلط معرفی شده است که نشاندهنده میزان مشارکت هر یک از کاربران در انجام عملیات است. علاوه بر آن در این تحقیق یک ساختار کنترلی مبتنی بر H_∞ برای سامانه هپتیک دو کاربره توسعه داده شده است. طراحی ساختار کنترلی برای این سیستمها بر اساس ساختار معرفی شده در [۴] در طول سالهای گذشته بطور مستمر در تحقیقات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. در [۵] یک ساختار کنترلی شش کاناله برای سامانه هپتیک آموزش جراحی پیشنهاد شده است که بر خلاف روش پیشنهادی در [۴] نیروهای محیطی به دست کاربران منتقل می‌شود. در [۶] یک معیار پایداری مطلق برای سامانه هپتیک دوکاربره پیشنهاد شده است که توسعه یافته معیار لیولین [۷] است. در [۸] یک روش برای تحلیل پایداری سامانه‌های هپتیک دو کاربره پیشنهاد شده که بر اساس روش پیشنهادی در [۹] توسعه یافته است. نکته حائز اهمیت آنکه کلیه روش‌های اشاره شده تاکنون از دینامیک غیرخطی ربات‌ها صرف نظر می‌کنند در حالی که یکی از مهمترین چالش‌های سامانه‌های عملیات از دور وجود عبارت‌های غیرخطی در دینامیک ربات‌ها است.

علاوه بر روشهای پیشنهادی برای سامانه‌های هپتیک دوکاربره خطی، چندین روش کنترلی برای سامانه‌های هپتیک دوکاربره غیرخطی پیشنهاد شده است. به عنوان مثال یک استراتژی کنترلی مبتنی بر کنترل امپدانسی در [۱۰] پیشنهاد شده است. علیرغم آنکه روش پیشنهادی برای سامانه هپتیک غیرخطی توسعه یافته است، تحلیل پایداری کل مجموعه در حضور دینامیک غیرخطی بررسی نشده است. در واقع روش پیشنهادی بر اساس فرض شناخته شده بودن کلیه ترم‌های غیرخطی ارایه شده است و بر اساس این فرض یک کنترل کننده دینامیک معکوس می‌تواند بر کلیه عناصر غیرخطی غلبه کند. در [۱۱] یک روش کنترلی برای سامانه‌های عملیات از دور دوکاربره غیرخطی در حضور تاخیر متغیر با زمان بر اساس کنترل $P+D$ پیشنهاد شد که در واقع تعمیم یافته کنترل کننده پیشنهادی در [۱۲] است. می‌توان گفت رفتار حالت گذرا و همینطور ماندگار کنترل کننده $P+D$ در صورتی که دینامیک غیرخطی ربات پیچیده شود دیگر مناسب نخواهد بود.

از طرف دیگر در اغلب پژوهش‌هایی که پیش از این بررسی شدند میزان اختیار هر یک از جراحان در طول انجام عملیات ثابت است به این ترتیب که میزان حرکت ابزار جراحی به صورت ترکیب خطی با ضرایب ثابتی از فرمانهای اعمال شده توسط دو جراح است. این به آن معناست که در بیشتر مطالعات امکان انتقال اختیار انجام بخشی از عملیات بین دو جراح وجود ندارد. دلایل مختلفی برای نیاز به انتقال اختیار انجام عملیات می‌توان مطرح نمود. یک مثال قابل تصور در آموزش جراحی آن است که جراح ماهر بخواهد بخش کوچکی از عملیات را به علت دشواری شخصا انجام دهد و بقیه بخش‌های عملیات را به دستیار بسپارد. توسعه ساختار کنترلی با قابلیت انتقال اختیار انجام عملیات در برخی از تحقیقات مورد مطالعه قرار گرفته است که از مهمترین آنها می‌توان به [۱۳] اشاره نمود. نکته حائز اهمیت آنکه در پژوهش ذکرشده و سایر پژوهش‌های مشابه تنها سیستم‌های عملیات از دور خطی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و در آنها هیچ تحلیلی برای حالتی که اجزای سیستم دارای دینامیک غیرخطی باشند ارایه نشده است.

علیرغم آنکه روشهای بیان شده حاوی ایده‌های جدید بوده و نکات کلیدی در ارتباط با سامانه‌های هپتیک دوکاربره را پوشش می‌دهند، موارد مهمی در آنها مغفول واقع شده است که باید به آنها پرداخته شود. نکته اول آنکه اغلب پژوهش‌هایی که پیش از این بررسی شدند ساختارهای کنترلی عمومی برای سامانه عملیات از دور دوکاربره پیشنهاد داده اند. در واقع در بیشتر این تحقیقات جنبه عمومی عملیات مشارکتی بیشتر مدنظر بوده است و ماهیت آموزشی بودن مشارکت کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در کاربرد عمومی عملیات مشارکتی دو کاربر نقش یکسانی در انجام عملیات دارند و به کمک یکدیگر عملیاتی از قبیل حمل و نقل و یا تعامل با یک جسم پیچیده را انجام می‌دهند. این در حالی است که در کاربرد آموزش جراحی دو کاربر استاد و دستیار نقش‌های متفاوتی در انجام عملیات دارند و باید برای هر یک ساختار کنترلی متفاوتی بر اساس هدف آموزشی طراحی شود. از طرف دیگر در تحقیقات اندکی از قبیل [۱۳] که جنبه آموزشی بودن مشارکت مورد مطالعه قرار گرفته است، مدلهای ساده خطی برای کنسولهای هپتیک در نظر گرفته شده است و تحلیل پایداری غیرخطی برای مجموعه ارایه نشده است.

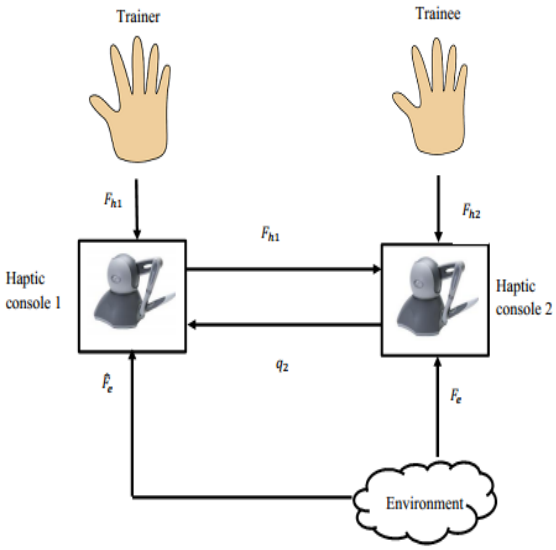
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]

نوآوری اصلی تحقیق پیش رو ارایه یک ساختار کنترلی مختص کاربرد آموزش جراحی در سامانه هپتیک دو کاربره با هدف رفع موانع بیان شده است. در ساختار پیشنهادی عملیات جراحی به طور پیش فرض توسط دستیار انجام می‌شود و فرمان‌های اصلاحی استاد در صورت نیاز به دست دستیار اعمال می‌شود. برای رسیدن به این هدف یک ساختار مبتنی بر انعکاس نیرو توسعه داده شده است که در آن استاد در صورت مشاهده هر گونه خطا توسط دستیار می‌تواند با اعمال نیرویی بالاتر از نیروی آستانه از پیش تعیین شده از طریق سامانه هپتیک اختیار عمل را از دستیار به خودش منتقل نماید. پس از آن نیروی دست استاد به ابزار جراحی اعمال می‌شود و تا زمانی که استاد بخواهد می‌تواند عملیات را شخصا انجام دهد. از طرف دیگر هر زمان استاد تصمیم به واگذاری انجام عملیات به دستیار بگیرد می تواند میزان نیروی اعمالی خود را کاهش دهد تا از نیروی آستانه از پیش تعیین شده پایین تر شود. پس از آن اختیار انجام عملیات مجددا به دستیار واگذار می‌شود. جهت تضمین برقراری انتقال نرم اختیار انجام عملیات یک تابع کلیدزنی خطی ارایه شده است. از طرف دیگر برای آنکه استاد اطلاعات کافی در مورد وضعیت فعلی عملیات و موقعیت ابزار در اختیار داشته باشد سیگنال موقعیت کنسول هپتیک دستیار به کنسول هپتیک استاد منتقل می‌شود. برای تخمین نیروی دست هر یک از جراحان از رویتگر بهره بالا با ورودی نامعلوم استفاده می‌شود. طبق مطالعات انجام شده رویتگرهای بهره بالا توانایی مناسبی در تخمین ورودی و حالت سیستمهای غیرخطی از خود نشان داده‌اند[۱۴]، [۱۵]. پایداری کلی سامانه با استفاده از روش پایداری ورودی به حالت تحلیل شده است. روش پایداری ورودی به حالت کاربرد فراوانی در تحلیل پایداری ساختارهای کنترلی مبتنی بر انعکاس نیرو در سامانه‌های هپتیک دارد [۱۶]، [۱۷]. تحلیل پایداری بر اساس مدل غیرخطی کنسولهای هپتیک انجام شده است.

ادامه مقاله به صورت ذیل تنظیم شده است؛ در بخش ۲، سامانه هپتیک آموزش جراحی چشم با ارائه دیاگرام بلوکی و توضیحات لازم معرفی شده است. در بخش ۳، ساختار کنترلی پیشنهادی تشریح شده است و تحلیل پایداری مجموعه در بخش ۴ ارایه شده است. بخش ۵ به شبیه سازی اختصاص یافته است و در پایان دستاوردهای تحقیق در بخش ۶ جمع بندی شده اند.

۲- معرفی سامانه

دیاگرام بلوکی سامانه هپتیک آموزش جراحی چشم در شکل ۱ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود سامانه دارای سه جزء اصلی دستگاه هپتیک جراح ماهر، دستگاه هپتیک دستیار، و محیط است. منظور از محیط، بافتی است که جراحی بر روی آن انجام می شود. ارتباط بین جراح ماهر و دستیار از طریق سامانه هپتیک برقرار می‌شود و همانطور



شکل ۱ بلوک دیاگرام سامانه هپتیک آموزش جراحی

که ملاحظه می‌شود دستیار جراحی، مستقیما با محیط در تعامل است و عملیات جراحی را بی واسطه انجام می‌دهد. از طرف دیگر جراح ماهر از طریق سامانه هپتیک می‌تواند در انجام عملیات مداخله نموده و اشتباهات دستیار را اصلاح نماید معادلات دینامیکی سامانه هپتیک دوکاربره آموزش جراحی شامل دو ربات n درجه آزادی به صورت زیر بیان می‌شود[۱۸].

$$M_1(q_1)\ddot{q}_1 + C_1(q_1,\dot{q}_1)\dot{q}_1 + G_1(q_1) = u_1 + F_{h1} + F_e \quad (۱)$$

$$M_2(q_2)\ddot{q}_2 + C_2(q_2,\dot{q}_2)\dot{q}_2 + G_2(q_2) = u_2 + F_{h2} + F_e \quad (۲)$$

در معادلات فوق $q_i \in \mathbb{R}^{n\times 1}$ بردارهای موقعیت در فضای مفصلی، $M_i(q_i) \in \mathbb{R}^{n\times n}$ ماتریس های جرمی، $C_i(\dot{q}_i,q_i) \in \mathbb{R}^{n\times n}$ ماتریس کوریولیس و گریز از مرکز، $G_i(q_i) \in \mathbb{R}^{n\times 1}$ بردار جاذبه، و $u_i \in \mathbb{R}^{n\times 1}$ بردار گشتاور کنترلی برای $i = 1,2$ است. علاوه بر آن F_{hi} نیروی دست دو کاربر و F_e نیروی محیط است. برخی خواص مهم روابط دینامیکی فوق به شرح ذیل است[۱۹].

خاصیت ۱: ماتریس جرمی $M_i(q_i)$ برای $q_i \in \mathbb{R}$ متقارن و مثبت معین است.

خاصیت ۲: ماتریس $\dot{M}_i(q_i) - 2C(q_i,\dot{q}_i)$ پادمتقارن است و در نتیجه داریم

$$x^T\left(\dot{M}_i(q_i) - 2C_i(q_i,\dot{q}_i)\right)x = 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}^n \quad (۳)$$

دقت شود که رابطه *(۳)* برای هر x معتبر است مشروط بر آنکه ماتریس $C_i(q_i,\dot{q}_i)$ در فرم کریستوفل بیان شده باشد. در غیر اینصورت رابطه تنها برای $x = \dot{q}$ صحیح است.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]

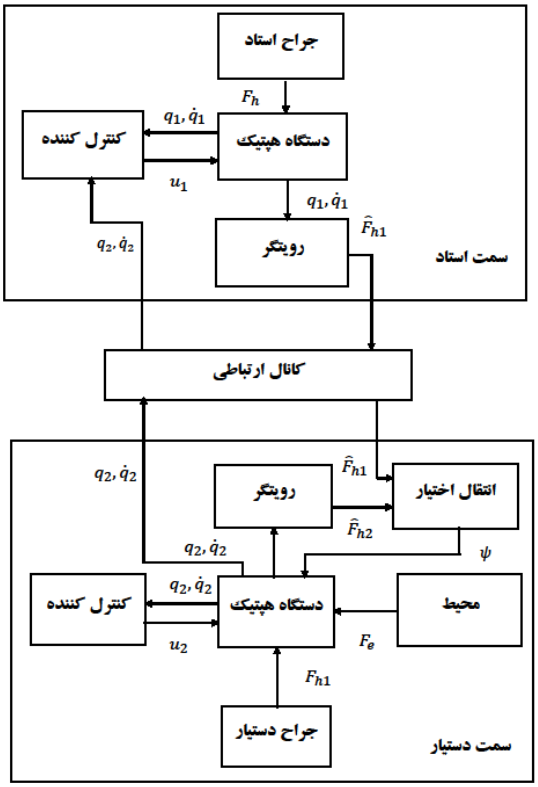
خاصیت ۳: سمت چپ معادلات دینامیکی نسبت به مجموعه ای از پارامترهای فیزیکی خطی است یعنی:

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i,\dot{q}_i)\dot{q}_i + G_i(q_i) = Y_i(q_i,\dot{q}_i,\ddot{q}_i)\Theta_i \quad (۴)$$

در رابطه فوق Y رگرسور نامیده می‌شود و Θ بردار پارامترهای فیزیکی است.

۳- ساختار کنترلی پیشنهادی

بلوک دیاگرام کلی سامانه هپتیک شامل کلیه اجزای سامانه و کنترل‌کننده در شکل ۲ نمایش داده شده است. در کنترل کننده سمت استاد از موقعیت دستیار به عنوان موقعیت مطلوب استفاده شده است تا استاد بتواند موقعیت لحظه‌ای دستیار و در نتیجه موقعیت ابزار جراحی را در اختیار داشته باشد و از این طریق خطاهای احتمالی دستیار را شناسایی نماید. در سمت دستیار نیز بلوکی جهت انتقال اختیار عملیات وجود دارد که در آن از نیروهای تخمین زده شده استفاده می‌شود. علاوه بر آن در سمت دستیار یک کنترل کننده جهت پایدارسازی دستگاه هپتیک در نظر گرفته شده است. در هر دو سمت استاد و دستیار نیز رویتگرهایی جهت تخمین نیروی دست طراحی شده است.



شکل ۲ بلوک دیاگرام کلی سامانه هپتیک به همراه کلیه اجزای سامانه و کنترل کننده

قانون کنترلی زیر برای کنسول هپتیک استاد طراحی شده است.

$$\begin{aligned} u_1 &= \hat{M}_1(q_1)\Lambda_1(\dot{q}_2-\dot{q}_1) \\ &+ \hat{C}_1(q_1,\dot{q}_1)\Lambda_1(q_2-q_1) \\ &+ \hat{G}_1(q_1) - K_1(\dot{q}_1+\Lambda_1(q_1-q_2)) \end{aligned} \quad (۵)$$

که در آن $K_1 \in \mathbb{R}^{n\times n}$ و $\Lambda_1 \in \mathbb{R}^{n\times n}$ ماتریسهای مثبت معین متقارن هستند و نماد $(\cdot)$ نشاندهنده مقادیر محاسبه شده است که بعدا تشریح خواهد شد. با توجه به ویژگی ۳ که در بخش قبل بیان شد می‌توان قانون کنترلی *(۵)* را به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$u_1 = Y_1\hat{\theta}_1 - K_1(\dot{q}_1+\Lambda_1(q_1-q_2)) \quad (۶)$$

حال تعریف می کنیم.

$$r_1 = \dot{q}_1 + \Lambda_1\tilde{q} \quad (۷)$$

که در آن $\tilde{q} = q_1 - q_2$. حال در صورتی که قانون کنترلی *(۶)* با رابطه دینامیکی *(۱)* ترکیب شود سیستم حلقه بسته کنسول هپتیک استاد به صورت زیر به دست می آید.

$$\begin{aligned} &M_1(q_1)\dot{r} + C_1(q_1,\dot{q}_1)r + Kr \\ &= Y_1(\hat{\theta}_1-\theta_1) + F_{h1} + F_e \end{aligned} \quad (۸)$$

علاوه بر آن، دینامیک خطای موقعیت به صورت زیر به دست می آید.

$$\dot{\tilde{q}} = -\Lambda\tilde{q} + r_1 - \dot{q}_2 \quad (۹)$$

عبارت $\hat{\theta}$ در رابطه (۸) نیز به صورت زیر انتخاب می‌شود.

$$\hat{\theta}_1 = \theta_1^* + \delta\theta_1 \quad (۱۰)$$

که در آن θ^* نشاندهنده مقادیر نامی θ بوده و $\delta\theta$ عبارت کنترلی اضافی است که به صورت زیر تعریف می‌شود [18].

$$\delta\theta_i = \begin{cases} -\xi_i \dfrac{Y_i^T r_i}{\| Y_i^T r_i\|}, & \| Y_i^T r_i\| > \mu_i \\ -\dfrac{\xi_i}{\mu_i} Y_i^T r_i, & \| Y_i^T r_i\| \le \mu_i \end{cases} \quad (۱۱)$$

که در آن μ مقادیر مثبت کوچک بوده و ξ کران نامعینی است به صورتی که

$$\| \tilde{\theta}_1\| \ne \| \theta_1 - \theta_1^*\| \le \xi. \quad (۱۲)$$

از طرف دیگر قانون کنترلی زیر برای کنسول هپتیک دستیار طراحی می‌شود.

$$\begin{aligned} u_2 &= -\hat{M}_2(q_2)\Lambda_2\dot{q}_2 \\ &-\hat{C}_2(q_2,\dot{q}_2)\Lambda_2 q_2 + \hat{G}_2(q_2) \\ &-K_2(\dot{q}_2+\Lambda_2 q_2) + \psi(F_{h1},F_{h2}) \end{aligned} \quad (۱۳)$$

که در آن $K_2 \in \mathbb{R}^{n\times n}$ و $\Lambda_2 \in \mathbb{R}^{n\times n}$ ماتریسهای بهره مثبت معین هستند. مقادیر تخمین زده شده که با نماد $(\cdot)$ مشخص شده‌اند

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]

مشابه آنچه برای کنسول هپتیک اول شرح داده شد محاسبه می‌شوند. با توجه به خاصیت سوم دینامیک رباتها رابطه (۱۳) معادل است با

$$u_2 = Y_2\hat{\theta}_2 - K_2 r_2 + \psi(F_{h1}, F_{h2}) \quad (۱۴)$$

که در آن $r_2 = \dot{q}_2 + \Lambda_2 q_2$. علاوه بر آن یکی از کلیدی‌ترین اجزای ساختار کنترلی معرفی شده در این پژوهش $\psi(F_{h1}, F_{h2})$ است که یک تابع غیرخطی جهت انتقال اختیار انجام عملیات بین استاد و جراح است. این تابع به صورتی انتخاب می‌شود که جراح ماهر به صورت برخط قادر باشد اختیار انجام عملیات را بین خود و دستیار منتقل کند. در صورتی که نیروی وارد شده توسط استاد از یک مقدار آستانه کمتر باشد عملیات جراحی توسط دستیار انجام می‌شود. از لحاظ حسی کمتر بودن نیروی دست از یک مقدار پیش تعیین شده نشاندهنده آن است که استاد ابزار جراحی را به نرمی در دست خود گرفته است. از طرف دیگر در صورتی که نیروی وارد شده توسط استاد از مقدار مشخصی بیشتر باشد نشاندهنده انتقال مجری عملیات جراحی از استاد به جراح است. از لحاظ حسی اعمال نیروی با دامنه زیاد توسط استاد نشاندهنده آن است که استاد ابزار جراحی را محکم در دست خود گرفته است. جهت برقراری کلیدزنی نرم از یک تابع خطی برای حالت گذرا بین دو حالت فوق استفاده می‌شود. با توجه به موارد ذکر شده تابع $\psi(F_{h1}, F_{h2})$ از لحاظ ریاضی به صورت زیر فرموله می‌شود.

(۱۵)

$$\psi = \begin{cases} 0, & \| F_{h1}\| \le \kappa_1 \\ \dfrac{F_{h1} - F_{h2}}{\epsilon_2 - \epsilon_1}(F_{h1} - \epsilon_1), & \kappa_1 \le \| F_{h1}\| \le \kappa_2 \\ F_{h1} - F_{h2}, & \| F_{h1}\| \ge \kappa_2 \end{cases}$$

در رابطه فوق κ_1 نشاندهنده مقداری از اندازه نیروی دست استاد است که برای مقادیر کمتر از آن، عملیات توسط دستیار انجام می‌شود و از طرف دیگر برای مقادیر نیروی دست استاد بیشتر از κ_2 اختیار انجام عملیات به استاد منتقل می‌شود. با جایگذاری قانون کنترلی *(۱۳)* در سیستم (۲) معادله دینامیکی سیستم حلقه بسته به صورت زیر به دست می آید.

$$\begin{aligned} &M_2(q_2)\dot{r}_2 + C_2(q_2, \dot{q}_2)r_2 + K_2 r_2 \\ &= Y_2(\hat{\theta}_2 - \theta_2) + \psi(F_{h1}, F_{h2}) + F_{h2} + F_e \end{aligned} \quad (۱۶)$$

بخش دیگر ساختار کنترلی پیشنهادی نحوه به دست آوردن مقادیر تخمین شده شده نیروی دست هر یک از جراحان یعنی $\hat{F}_{hi}$ است. در این بخش فرض کنیم بردار متغیرهای حالت معادله دینامیکی کنسول هپتیک شماره i به صورت $x_i = [x_{i1}^T \quad x_{i2}^T]^T = [q_i^T \quad \dot{q}_i^T]^T$ بیان شده باشد. در نتیجه توصیف فضای حالت معادلات دینامیکی *(۱)* و *(۲)* به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i1} &= x_{i2} \\ \dot{x}_{i2} &= M_i^{-1}(x_{i1})\big(-C_i(x_{i1}, x_{i2})x_{i2} \\ &\quad -G_i(x_{i1}) + u_i + F_{hi} + F_e\big) \end{aligned} \quad (۱۷)$$

تخمین سیگنالهای نیروی دست توسط رویتگر بهره بالا به صورت زیر به دست می آید. [14]

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_{i1} &= \hat{x}_{i2} + \frac{a_1}{\epsilon}(x_{i1} - \hat{x}_{i1}) \\ \dot{\hat{x}}_{i2} &= \hat{M}_i^{-1}(\hat{x}_{i1})\big(-\hat{C}_i(\hat{x}_{i1}, \hat{x}_{i2})\hat{x}_{i2} \\ &\quad -\hat{G}_i(\hat{x}_{i1}) + u_i + F_e\big) + \frac{a_2}{\epsilon^2}(x_{i1} - \hat{x}_{i1}) \\ \hat{F}_{hi} &= \frac{a_2}{\epsilon^2} M_i(\hat{x}_{i1})(x_{i1} - \hat{x}_{i1}) \end{aligned} \quad (۱۸)$$

در رابطه فوق ϵ یک ثابت مثبت و به اندازه کافی کوچک است و مقادیر a_1 و a_2 به صورتی انتخاب می‌شوند که ریشه های معادله زیر در سمت چپ صفحه مختلط قرار گیرند.

$$\lambda^2 + a_1\lambda + a_2 = 0 \quad (۱۹)$$

حال خطای تخمین رویتگر را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود.

$$e_i = \begin{bmatrix} e_{i1} \\ e_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i1} - \hat{x}_{i1} \\ x_{i2} - \hat{x}_{i2} \end{bmatrix} \quad (۲۰)$$

در نتیجه، معادله دینامیکی خطای تخمین به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\dot{e}_i = Ae_i + B\Delta_i - HCe_i \quad (۲۱)$$

در رابطه فوق داریم

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$
$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} \dfrac{a_1}{\epsilon} \\ \dfrac{a_2}{\epsilon^2} \end{bmatrix} \quad (۲۲)$$

علاوه بر آن عبارت عدم قطعیت Δ_i به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} \Delta_i &= M_i^{-1}(x_{i1})\big(-C_i(x_{i1}, x_{i2})x_{i2} \\ &\quad -G_i(x_{i1})\big) \\ &\quad -\hat{M}_i^{-1}(\hat{x}_{i1})\big(-\hat{C}_i(\hat{x}_{i1}, \hat{x}_{i2})\hat{x}_{i2} \\ &\quad -\hat{G}_i(\hat{x}_{i1})\big) \end{aligned} \quad (۲۳)$$

حال تعریف می‌کنیم $\zeta_i = Ee_i$ که در آن

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]

$$E=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & \epsilon\end{bmatrix} \quad (۲۴)$$

در نتیجه رابطه *(۲۱)* با رابطه زیر معادل است.

$$\epsilon\dot{\zeta}_i = A_0\zeta_i + \epsilon^2 B\Delta_i \quad (۲۵)$$

تعریف متغیری به صورت ζ در رویتگرهای بهره بالا بسیار متداول است و در بخش تحلیل پایداری از دینامیک خطای به دست آمده استفاده خواهد شد.

٤- تحلیل پایداری

روش تحلیل پایداری به این صورت است که در ابتدا پایداری هر یک از اجزای سیستم و پس از آن پایداری کل مجموعه تحلیل می‌شود. با توجه به اینکه در این تحقیق از روش پایداری ورودی به حالت استفاده می‌شود در ابتدا مفهوم پایداری ورودی به حالت تشریح می‌شود.

تعریف ۱: [۱۹] سیستم زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x} = f(x,u) \quad (۲۶)$$

که در آن $f: D_x \times D_u \to \mathbb{R}^n$ تابع لیپشیتز محلی نسبت به x و u است و مجموعه‌های D_x و D_u به صورت $D_x = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\| < r_x\}$ و $D_u = \{u \in \mathbb{R}^m \mid \|u\| < r_u\}$ تعریف می‌شوند. سیستم *(۲۶)* پایدار ورودی به حالت است در صورتی که تابع β از کلاس $\mathcal{KL}$ و تابع γ از کلاس $\mathcal{K}$ وجود داشته باشند به طوری که به ازای شرایط اولیه x_0 و ورودی u شرط زیر محقق شود.

$$\|x(t)\| \le \beta(\|x_0\|, t) + \gamma(\|u_T(t)\|_\infty), \qquad 0 \le t \le T. \quad (۲۷)$$

در ادامه چارچوب اصلی تحلیل‌های پایداری این بخش در قضیه ۱ ارایه می‌شود. در این قضیه ارتباط بین مفهوم پایداری ورودی به حالت بیان شده در تعریف ۱ و نظریه پایداری لیاپانوف بیان می‌شود.

قضیه ۱: [۱۹]سیستم *(۲۶)* با توجه به مفهوم بیان شده در تعریف ۱ پایدار ورودی به حالت است در صورتی که تابع پیوسته مشتق پذیر $V: D \to \mathbb{R}$ وجود داشته باشد طوری که شرایط زیر برآورده شود.

$$\alpha_1(\|x\|) \le V(x) \le \alpha_2(\|x\|)$$
$$\dot{V}(x) \le -\alpha_3(\|x\|) + \sigma(\|u\|) \quad (۲۸)$$

در روابط فوق $\dot{V}$ مشتق تابع V در امتداد مسیرهای سیستم *(۲۶)* بوده و α_1، α_2، α_3 و σ توابع کلاس $\mathcal{K}$ هستند.

در لم ۱ نامساوی معروف موسوم به نامساوی مربعی یانگ مرور می‌شود.

لم ۱: [۲۰]برای هر دو بردار دارای ابعاد یکسان x و y و $\epsilon > 0$ نامساوی زیر همواره برقرار است:

$$|x^T y| \le \left(\frac{\epsilon}{2}\right)\|x\|^2 + \left(\frac{1}{2\epsilon}\right)\|y\|^2 \quad (۲۹)$$

در لم ۲ یک نامساوی ارایه شده است که در تحلیل پایداری کاربرد دارد.

لم ۲: با فرض برقراری شرط لیپشیتز روی دینامیک ربات و با توجه به تعریف ارایه شده برای Δ_i در (۲۲) می‌توان نتیجه گرفت:

$$\Delta_i \le l_{i1}\|q_i\| + l_{i2}\|\dot{q}_i\| + l_{i3}\|\zeta_i\| \quad (۳۰)$$

اثبات: ابتدا تعریف می‌کنیم:

$$f(x_i) = M_i^{-1}(x_{i1})\Big(-C_i(x_{i1}, x_{i2})x_{i2} - G_i(x_{i1})\Big) \quad (۳۱)$$

با توجه به فرض در نظر گرفته شده در لم یعنی برقراری رابطه لیپشیتز و بدون از دست دادن کلیت مسئله با فرض آنکه مقدار تابع در نقطه صفر برابر صفر است می‌توان نوشت

$$\|f(x_i)\| \le l_{i0}\|x_i\| \quad (۳۲)$$

به طور مشابهی می‌توان نوشت $\left\|\hat{f}(\hat{x}_i)\right\| \le l_{i0}\|\hat{x}_i\|$ و با توجه به رابطه $\hat{x}_i = x_i - e_i$ و خاصیت نرم ها می‌توان نوشت.

$$\left\|\hat{f}(\hat{x}_i)\right\| \le l_{i0}\|\hat{x}_i\| = l_{i0}\|x_i - e_i\| \le l_{i0}\|x_i\| + l_{i0}\|e_i\| = l_{i0}\|x_i\| + l_{i0}E^{-1}\|\zeta_i\| \quad (۳۳)$$

حال با توجه به تعریف $\Delta_i = f(x_i) - \hat{f}(\hat{x}_i)$ می توان نوشت

$$\|\Delta_i\| \le \|f(x_i)\| + \left\|\hat{f}(\hat{x}_i)\right\| \le 2l_{i0}\|x_i\| + l_{i0}E^{-1}\|\zeta_i\| \quad (۳۴)$$

از طرف دیگر داریم

$$x_i = \begin{bmatrix}q_i\\ \dot{q}_i\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}q_i\\ 0_{n\times 1}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0_{n\times 1}\\ \dot{q}_i\end{bmatrix} \quad (۳۵)$$

برای هر نرم از مرتبه p که در آن $1 \le p < \infty$ رابطه زیر را می‌توان استنباط نمود

$$\left\|\begin{bmatrix}\chi\\ 0_{n\times 1}\end{bmatrix}\right\|_p = \|\chi\|_p \quad (۳۶)$$

حال می‌توان نتیجه گرفت.

$$\|x_i\| \le \left\|\begin{bmatrix}q_i\\ 0_{n\times 1}\end{bmatrix}\right\| + \left\|\begin{bmatrix}0_{n\times 1}\\ \dot{q}_i\end{bmatrix}\right\| = \|q_i\| + \|\dot{q}_i\| \quad (۳۷)$$

در نتیجه با توجه به روابط *(۳۴)* و *(۳۷)* می‌توان رابطه بیان شده در صورت لم را استنتاج نمود.

حال تحلیل پایداری کنسول هپتیک استاد در گزاره ۱ بررسی می‌شود.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]

گزاره ۱: سیستم حلقه بسته کنسول هپتیک استاد برای بردار حالت $[q_1^T, \dot{q}_1^T, \zeta_1^T]^T$ و ورودی $[q_2^T, \dot{q}_2^T, (F_{h1}+F_e)^T, \xi_1]^T$ پایدار ورودی به حالت است.

اثبات: تابع کاندید لیاپانوف زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$V_1 = \frac{1}{2} r_1^T M_1(q_1) r_1 + \tilde{q}^T \Lambda_1 K_1 \tilde{q} + \zeta_1^T P \zeta_1 \quad (۳۸)$$

در رابطه فوق P پاسخ معادله لیاپانوف $A_0^T P + P A_0 = -Q$ بوده و Q یک ماتریس مثبت معین است. با محاسبه مشتق تابع V_1 در امتداد مسیرهای سیستم *(۸)* و استفاده از خاصیت ۲ رابطه زیر به دست می آید.

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 &= r_1^T M_1(q_1)\dot{r}_1 + \frac{1}{2} r_1^T \dot{M}_1(q_1) r_1 \\
&+ 2\tilde{q}^T \Lambda_1 K_1 \dot{\tilde{q}} - \epsilon^{-1} \zeta_1^T Q \zeta_1 + 2\epsilon \zeta_1^T P B \Delta_1 \\
&= -r_1^T K_1 r_1 + 2\tilde{q}^T \Lambda_1 K_1 \dot{\tilde{q}} \\
&+ \frac{1}{2} r_1^T \left(\dot{M}_1(q_1) - 2C_1(q_1, \dot{q}_1) \right) r_1 \\
&- \epsilon^{-1} \zeta_1^T Q \zeta_1 + 2\epsilon \zeta_1^T P B \Delta_1 \\
&= -\tilde{q}^T \Lambda_1 K_1 \Lambda_1 \tilde{q} - \dot{q}_1 K_1 \dot{q}_1 \\
&+ r_1^T Y(\tilde{\theta} + \delta\theta) \\
&- 2\tilde{q}^T \Lambda_1 K_1 \dot{q}_2 + r_1^T (F_{h1} + F_e) \\
&- \epsilon^{-1} \zeta_1^T Q \zeta_1 + 2\epsilon \zeta_1^T P B \Delta_1
\end{aligned} \quad (۳۹)$$

علاوه بر آن با توجه به لم ۱ می‌توان روابط زیر را استخراج نمود.

$$\begin{aligned}
-2\tilde{q}^T \Lambda_1 K_1 \dot{q}_2 &\le \frac{1}{4} \lambda_{\min}(\Lambda_1 K_1 \Lambda_1) \| \tilde{q} \|^2 \\
&+ \frac{2\lambda_{\max}(\Lambda_1 K_1)}{\lambda_{\min}(\Lambda_1 K_1 \Lambda_1)} \| \dot{q}_2 \|^2, \\
\dot{q}_1^T (F_{h1} + F_e) &\le \frac{1}{4} \lambda_{\min}(K_1) \| \dot{q}_1 \|^2 \\
&+ \frac{2}{\lambda_{\min}(K_1)} \| F_{h1} + F_e \|^2 .
\end{aligned} \quad (۴۰)$$

برای سایر عبارات شامل ضرب دو متغیر نیز می توان روابط مشابهی استخراج نمود که از بیان آنها صرفنظر می‌شود. در ادامه با تعریف $\eta_1 = Y_1^T r_1$ و استفاده از *(۱۲)* می توان نوشت:

$$\eta_1^T (\theta_1 + \delta\theta_1) \le \eta_1^T \left(\xi \frac{\eta_1}{\| \eta_1 \|} + \delta\theta_1 \right) \quad (۴۱)$$

حال با ترکیب *(۱۱)* و *(۴۱)* در صورتی که $\| \eta_1 \| > \mu_1$ رابطه زیر را خواهیم داشت.

$$\eta_1^T (\theta_1 + \delta\theta_1) \le 0 \quad (۴۲)$$

از طرف دیگر در صورتی که $\| \eta_1 \| \le \mu_1$ خواهیم داشت

$$\begin{aligned}
\eta_1^T (\theta_1 + \delta\theta_1) &\le \eta_1^T \left(\xi_1 \frac{\eta_1}{\| \eta_1 \|} - \frac{\xi_1}{\mu_1} \eta_1 \right) \\
&= \xi_1 \| \eta_1 \| - \frac{\xi_1}{\mu_1} \| \eta_1 \|^2
\end{aligned} \quad (۴۳)$$

مقدار بیشینه عبارت $\xi_1 \| \eta_1 \| - \frac{\xi_1}{\mu_1} \| \eta_1 \|^2$ برای $\| \eta_1 \| = \frac{\mu_1}{2}$ اتفاق می‌افتد و برابر $\mu_1 \frac{\xi_1}{2}$ است. حال با توجه به این نتایج و با استفاده از روابط *(۳۹)* و *(۳۰)* می‌توان رابطه زیر را نتیجه گرفت

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 &\le -a_1 \| \tilde{q} \|^2 - a_2 \| \dot{q}_1 \|^2 - a_3 \| \zeta_1 \|^2 \\
&+ a_4 \| q_2 \|^2 + a_5 \| \dot{q}_2 \|^2 \\
&+ a_6 \| F_{h1} + F_e \|^2 + a_7 \| \xi_1 \|
\end{aligned} \quad (۴۴)$$

در رابطه فوق داریم

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{1}{4} \lambda_{\min}(\Lambda_1 K_1 \Lambda_1) \\
a_2 &= \frac{1}{2} \lambda_{\min}(K_1) \\
a_3 &= -\frac{3}{4} \epsilon^{-1} \lambda_{\min}(Q) \\
&+ \frac{4\epsilon l_{11} \| P \|}{\lambda_{\min}(\Lambda_1 K_1 \Lambda_1)} \\
&+ \frac{4\epsilon l_{12} \| P \|}{\lambda_{\min}(K_1)} + 2\epsilon l_{13} \| P \| \\
a_4 &= \frac{4\epsilon^2 l_1 \| P \|}{\lambda_{\min}(Q)} \\
a_5 &= \frac{2\lambda_{\max}(\Lambda_1 K_1)}{\lambda_{\min}(\Lambda_1 K_1 \Lambda_1)} \\
a_6 &= \frac{\lambda_{\max}(\Lambda_1)}{\lambda_{\min}(\Lambda_1 K_1 \Lambda_1)} + \frac{1}{\lambda_{\min}(K_1)} \\
a_7 &= \frac{\mu_1}{2}
\end{aligned} \quad (۴۵)$$

برای آنکه کنسول هپتیک استاد پایدار ورودی به حالت باشد باید کلیه ضرایب معرفی شده در *(۴۵)* مثبت باشند. مثبت بودن کلیه ضرایب به جز a_3 بدیهی است. برای مثبت بودن a_3 نیز باید داشته باشیم

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]

$$\epsilon^2 < \frac{16 l_{11} \| P \|}{3\lambda_{\min}(\Lambda_1 K_1 \Lambda_1)\lambda_{\min}(Q)} + \frac{16 l_{12} \| P \|}{3\lambda_{\min}(K_1)\lambda_{\min}(Q)} + \frac{8 l_{13} \| P \|}{3\lambda_{\min}(Q)} \quad (۴۶)$$

رابطه فوق نشان می‌دهد در صورتی که ضریب ϵ به اندازه کافی کوچک باشد زیرسیستم حلقه بسته کنسول هپتیک استاد برای بردار حالت $[q_1^T, \dot{q}_1^T, \zeta_1^T]^T$ و ورودی $[q_2^T, \dot{q}_2^T, (F_{h1}+F_e)^T, \xi_1]^T$ پایدار ورودی به حالت است. ■

در ادامه تحلیل پایداری کنسول هپتیک دستیار در گزاره ۲ بررسی می‌شود.

گزاره ۲: سیستم حلقه بسته کنسول هپتیک دستیار برای بردار حالت $[q_2^T, \dot{q}_2^T, \zeta_2^T]^T$ و ورودی $[(F_{h2}+F_e)^T, \hat{F}_{h1}^T, \xi_2^T]^T$ پایدار ورودی به حالت است.

اثبات: تابع کاندید لیاپانوف مربوط به کنسول هپتیک دستیار به صورت زیر فرض می‌شود.

$$V_2 = \frac{1}{2} r_2^T M_2(q_2) r_2 + q_2^T \Lambda_2 K_2 q_2 + \zeta_2^T P \zeta_2 \quad (۴۷)$$

از طرف دیگر با توجه به *(۱۵)* می‌توان نتیجه گرفت

$$\psi(F_{h1}, F_{h2}) \le \| \hat{F}_{h1} - \hat{F}_{h2} \| \le \| \hat{F}_{h1} \| + \| \hat{F}_{h2} \| \quad (۴۸)$$

حال با استفاده از *(۴۸)* وروندی مشابه آنچه برای کنسول هپتیک استاد انجام دادیم می‌توان نتیجه گرفت

$$\dot{V}_2 \le -b_1 \| q_2 \|^2 - b_2 \| \dot{q}_2 \|^2 - b_3 \| \zeta_2 \|^2 + b_4 \| F_{h2} + F_e \|^2 + b_5 \| \hat{F}_{h1} \|^2 + b_6 \| \xi_2 \| \quad (۴۹)$$

با توجه به *(۴۷)* و *(۴۹)* می‌توان نتیجه گرفت زیرسیستم حلقه بسته کنسول هپتیک دستیار برای بردار حالت $[q_2^T, \dot{q}_2^T, \zeta_2^T]^T$ و ورودی $[(F_{h2}+F_e)^T, \hat{F}_{h1}^T, \xi_2^T]^T$ پایدار ورودی به حالت است. ■

در گزاره بعد پایداری سیستم در حضور تاخیر بررسی می‌شود.

گزاره ۳: [16] فرض می‌شود سیستم داده شده با معادله

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), v(t))$$

پایدار ورودی به حالت با ورودی $\begin{bmatrix} u^T(t) & v^T(t) \end{bmatrix}^T$ است.

در نتیجه به ازای هر تاخیر ثابت نامشخص با مقدار $\tau > 0$ سیستم

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t-\tau), v(t))$$

پایدار ورودی به حالت است.

اثبات: به ۶[۱] مراجعه شود.

در پایان این بخش تحلیل پایداری کل سامانه هپتیک به عنوان نتیجه نهایی این بخش در قضیه ۲ ارایه می‌شود.

قضیه ۲: سامانه هپتیک آموزش جراحی شامل دو کنسول هپتیک دارای معادلات *(۱)* و *(۲)* و قوانین کنترلی *(۵)* و *(۱۳)* برای بردار حالت $[q_1^T, \dot{q}_1^T, q_2^T, \dot{q}_2^T]^T$ و ورودی $[F_{h1}^T, F_{h2}^T, F_e^T]^T$ پایدار ورودی به حالت است.

اثبات: با توجه به گزاره ۱ می‌توان نتیجه گرفت کنسول هپتیک استاد برای ورودی $[q_2^T, \dot{q}_2^T, (F_{h1}+F_e)^T, \xi_1]^T$ و بردار حالت $[q_2^T, \dot{q}_2^T, \zeta_1^T]^T$ پایدار ورودی به حالت است. در نتیجه می‌توان گفت کنسول هپتیک استاد برای ورودی $[q_2^T, \dot{q}_2^T, (F_{h1}+F_e)^T, \xi_1]^T$ و خروجی $\hat{F}_{h1}$ پایدار ورودی به خروجی با بهره γ_1 است. از طرف دیگر کنسول هپتیک دستیار برای ورودی $[(F_{h2}+F_e)^T, \hat{F}_{h1}^T, \xi_2^T]^T$ و حالت $[q_1^T, \dot{q}_1^T, \zeta_1^T]^T$ پایدار ورودی به حالت است که می‌توان نتیجه گرفت برای ورودی $[(F_{h2}+F_e)^T, \hat{F}_{h1}^T, \xi_2^T]^T$ و خروجی $[q_1^T, \dot{q}_1^T]^T$ پایدار ورودی به خروجی با بهره γ_2 است. علاوه بر آن در گزاره ۳ پایداری سیستم تاخیردار بررسی شده است و بیان شده است در صورتی که سیستم بدون تاخیر دارای پایداری ورودی به حالت باشد سیستم تاخیردار نیز پایدار ورودی به حالت است. حال بر اساس قضیه بهره کوچک می‌توان نتیجه گرفت سامانه هپتیک آموزش جراحی پایدار ورودی به حالت است اگر داشته باشیم $\gamma_1\gamma_2 < 1$. با توجه به آنکه مقدار بهره‌های ورودی به خروجی به پارامترهای K_i، Λ_i و ϵ وابسته هست، پایداری ورودی به حالت به سادگی با انتخاب مناسب این پارامترها امکانپذیر است. ■

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی جهت تایید صحت عملکرد ساختار پیشنهادی ارایه می‌شود. در شبیه‌سازی‌های انجام شده از مدل دستگاه هپتیک سه درجه آزادی Geomagic Touch که یک دستگاه تجاری متداول است استفاده شده است. معادلات سینماتیکی و دینامیکی دستگاه هپتیک در نظر گرفته شده در این قسمت ارایه می‌شود. موقعیت مجری نهایی این ربات به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} x &= -(l_1\cos(q_2) + l_2\sin(q_3))\sin(q_1) \\ y &= l_1\sin(q_2) - l_2\cos(q_3) + y_{\text{off}} \\ z &= (l_1\cos(q_2) + l_2\sin(q_3))\cos(q_1) - z_{\text{off}} \end{aligned} \quad (۵۰)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]

مقادیر پارامترهای سینماتیکی l_1، l_2، y_{off} و z_{off} در جدول ۱ ارایه شده است. بر اساس رابطه سینماتیکی (۵۰) ماتریس ژاکوبین ربات به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$J=\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad (۵۱)$$

که در آن

$$\begin{aligned} J_{11} &= -(l_1\cos(q_2)+l_2\sin(q_3))\cos(q_1) \\ J_{12} &= l_1\sin(q_1)\sin(q_2) \\ J_{13} &= -l_2\cos(q_3)\sin(q_1) \\ J_{21} &= 0 \\ J_{22} &= l_1\cos(q_2) \\ J_{23} &= l_2\sin(q_3) \\ J_{31} &= -(l_1\cos(q_2)+l_2\sin(q_3))\sin(q_1) \\ J_{32} &= -l_1\sin(q_2)\cos(q_1) \\ J_{33} &= l_2\cos(q_3)\cos(q_1) \end{aligned} \quad (۵۲)$$

از طرف دیگر، ماتریس جرمی معادله دینامیکی ربات به صورت زیر بیان می‌شود.

$$M(q)=\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & 0 \\ M_{12} & p_6 & M_{23} \\ 0 & M_{23} & p_7 \end{bmatrix} \quad (۵۳)$$

که در آن

$$\begin{aligned} M_{11} &= p_1+p_2\cos(2q_2) \\ &+p_3\cos(2q_3)+p_4\cos(q_2)\sin(q_3) \\ M_{12} &= p_5\sin(q_2) \\ M_{23} &= -0.5p_4\sin(q_2-q_3). \end{aligned} \quad (۵۴)$$

ماتریس متناظر با عبارتهای کوریولیس و گریز از مرکز نیز به صورت زیر بیان می‌شود.

$$C(q,\dot{q})=\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & 0 & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (۵۵)$$

جدول ۱: مقادیر نامی پارامترهای سینماتیکی و دینامیکی دستگاه هپتیک Geomagic Touch

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
l_1	133.35×10^{-3}	p_4	2.766×10^{-3}
l_2	133.35×10^{-3}	p_5	0.308×10^{-3}
z_{off}	168.35×10^{-3}	p_6	2.526×10^{-3}
y_{off}	23.35×10^{-3}	p_7	0.652×10^{-3}
p_1	1.798×10^{-3}	p_8	507.5×10^{-3}
p_2	0.864×10^{-3}	p_9	102.2×10^{-3}
p_3	0.486×10^{-3}	p_{10}	294.2×10^{-3}

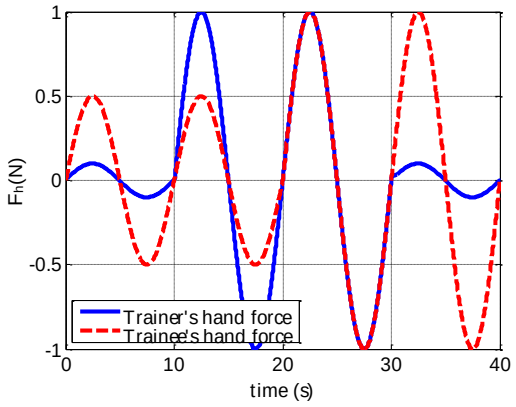
که در آن

$$\begin{aligned} C_{11} &= -p_2\dot{q}_2\sin(2q_2) \\ &-0.5p_4\dot{q}_2\sin(q_2)\sin(q_3) \\ &-p_3\dot{q}_3\sin(2q_3) \\ &+0.5p_4\dot{q}_3\cos(q_2)\cos(q_3) \\ C_{12} &= p_5\dot{q}_2\cos(q_2) \\ &-0.5p4\dot{q}_1\sin(q_2)\sin(q_3) \\ &-p_2\dot{q}_1\sin(2q_2) \\ C_{13} &= -p_3\dot{q}_1\sin(2q_3) \\ &+0.5p_4\dot{q}_1\cos(q_2)\cos(q_3) \\ C_{21} &= p_2\dot{q}_1\sin(2q_2) \\ &+0.5p_4\dot{q}_1\sin(q_2)\sin(q_3) \\ C_{23} &= 0.5p_4\dot{q}_3\cos(q_2-q_3) \\ C_{31} &= p_3\dot{q}_1\sin(2q_3) \\ &+0.5p_4\dot{q}_1\cos(q_2)\cos(q_3) \\ C_{32} &= -0.5p_4\dot{q}_2\cos(q_2-q_3) \end{aligned} \quad (۵۶)$$

بردار جاذبه دستگاه هپتیک نیز به صورت زیر است.

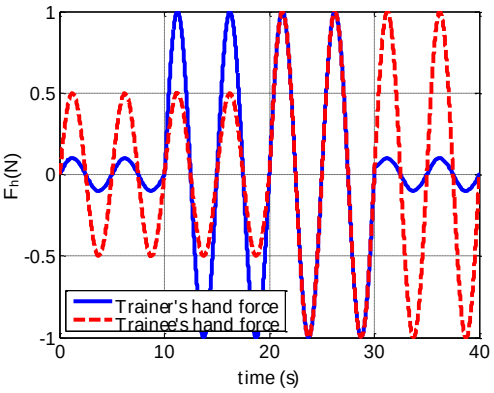
$$G(q)=\begin{bmatrix} 0 \\ p_8\cos(q_2)... \\ +p_{10}(q_2-0.5\pi) \\ p_9\sin(q_3) \end{bmatrix}. \quad (۵۷)$$

مقادیر نامی کلیه پارامترهای دینامیکی و سینماتیکی دستگاه هپتیک در جدول ۱ ارایه شده است.



شکل ۳ نیروی دست اعمال شده توسط اپراتورها به مفصل اول ربات

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]



شکل ۴ نیروی دست اعمال شده توسط اپراتورها به مفصل دوم ربات

شبیه سازی های این بخش با در نظر گرفتن زمان ۴۰ ثانیه انجام می‌شود. علاوه بر آن نیروی ناشی از دست اپراتورها به مفاصل اول و دوم ربات به صورت سیگنالهای سینوسی به ترتیب با فرکانسهای ۰/۱ و ۰/۲ هرتز در نظر گرفته می‌شود. این سیگنال‌ها در شکل ۳ و شکل ۴ نمایش داده شده‌اند که در آن نیروی دست جراح استاد و جراح دستیار به ترتیب با خطوط ممتد آبی رنگ و خطوط مقطع قرمز رنگ مشخص شده اند. فرض می‌شود

جراح دستیار در زمان بین ۰ تا ۱۰ ثانیه و ۱۰ ثانیه تا ۲۰ ثانیه نیروی صحیحی وارد نمی‌کند و همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود پروفایل نیروها در این دو زمان ذکر شده مشابه است. از طرف دیگر جراح استاد در زمان بین ۱۰ ثانیه و ۲۰ ثانیه و ۲۰ ثانیه تا ۳۰ ثانیه نیروی صحیحی وارد می‌کند. در شبیه سازی محیط شبیه سازی شده به صورت استاتیکی با سختی برابر $K_e = 100$ در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن بین کنسول هپتیک استاد و دستیار تاخیر مخابراتی به میزان ۲۰۰ میلی ثانیه لحاظ شده است. نکته دیگر انتخاب بردار شرایط اولیه است. در عمل با توجه به ویژگی خاص دستگاه هپتیک Geomagic Touch می‌توان هنگام شروع عملیات هر دو دستگاه را در حالت آشیانه قرار داد تا دو دستگاه با شرایط اولیه یکسان شروع به کار نمایند. به همین دلیل وجود شرایط اولیه متفاوت دردو دستگاه هپتیک با توجه به شرایط در نظر گرفته شده چالش مهمی محسوب نمی‌شود. اما با این حال شبیه‌سازی با در نظر گرفتن اندکی اختلاف در شرایط اولیه انجام می‌شود تا اثر متفاوت بودن شرایط اولیه بررسی شود. در شبیه‌سازی‌ها بردار شرایط اولیه موقعیت مفاصل کنسول هپتیک استاد برابر $[0.05 \quad 0.04 \quad 0.03]^T$ و برای کنسول هپتیک دستیار برابر $[0 \quad 0 \quad 0]^T$ در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن برای واقعی‌تر شدن شبیه‌سازی بهتر است اثر نویز اندازه‌گیری نیز لحاظ شود. با توجه به اینکه در شرایط واقعی موقعیت ربات با استفاده از انکودر نوری اندازه‌گیری می‌شود مقدار نسبتا دقیق موقعیت معمولا در دسترس است. از طرف دیگر متغیر سرعت با استفاده از تاکومتر محاسبه می‌شود و تحت تاثیر نویز است. برای نزدیک بودن شرایط شبیه سازی به شرایط واقعی متغیر سرعت مفاصل تحت تاثیر نویز اندازه‌گیری قرار گرفت و پارامترهای نویز طوری تنظیم شد که دامنه نویز حدود ۵٪ مقدار نامی سرعت باشد.

در این بخش از طریق شبیه‌سازی مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی و یکی از روش‌های متداول ارایه می‌شود تا تمایز روش پیشنهادی مشخص شود. همانطور که گفتیم در پژوهش پیش رو حالتی بررسی می‌شود که در آن اختیار انجام عملیات به طور کامل به عهده جراح دستیار است. می‌توان گفت امتیاز اصلی روش پیشنهادی آن است که در حالتی جراح دستیار اختیار انجام عملیات را به عهده دارد، جراح استاد در صورت مشاهده انجام خطا می‌تواند در عملیات مداخله نموده و بخشی از عملیات را شخصا انجام دهد. جهت بررسی این موضوع ابتدا یکی از روش‌های موجود را در حالتی بررسی می‌کنیم که اختیار انجام عملیات به عهده دستیار است. یک روش متداول برای کنترل سامانه هپتیک غیرخطی روش کنترل تطبیقی است که در [۲۱] و [۲۲] ارایه شده و پایداری آن در حضور تاخیر زمانی و عدم قطعیت بررسی شده است. در صورتی که در این روش بخواهیم اختیار انجام عملیات به عهده جراح دستیار باشد کافی است یک کنترل‌کننده تطبیقی به کنسول هپتیک استاد اعمال کنیم که در آن ورودی مرجع موقعیت کنسول هپتیک دستیار است.

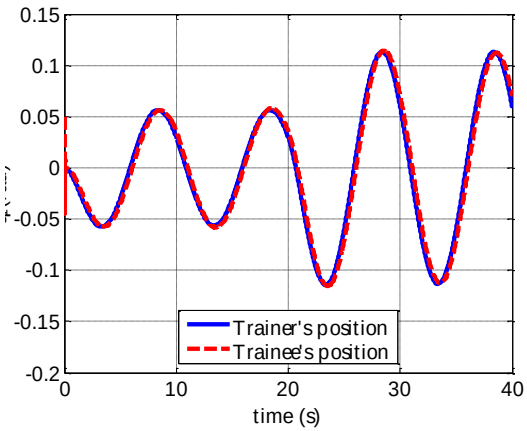
دقت شود هر دو قانون کنترلی تطبیقی و قانون کنترلی مقاوم شامل یک بخش خطی و یک بخش غیرخطی هستند و بخش خطی آنها مشابه و بخش غیرخطی آنها متفاوت است. در بخش خطی هر دو کنترل‌کننده طبق رابطه *(۶)* مقدار بهره $K_1\Lambda_1$ مانند کنترل تناسبی و مقدار بهره K_1 مانند دمپینگ عمل می‌کند. از طرف دیگر برای انتخاب بهره تناسبی با توجه به تحلیل های صورت گرفته در [23] مقدار بهره تناسبی کنترل‌کننده باید کوچکتر از سختی محیط باشد تا تعامل نیرویی مناسبی بین ابزار و محیط صورت پذیرد. در نتیجه مقادیر بهره‌های کنترل‌کننده برای هر دو کنترل‌کننده در سمت کنسول هپتیک استاد به صورت $K_1 = 10I_{3\times3}$ و $\Lambda_1 = 5I_{3\times3}$ در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر آن توجه شود که بخش خطی هر دو کنترلر برای سمت دستیار شامل عبارت $-K_2 r_2$ است که به پایدارسازی مجموعه کمک می‌کند. با این حال بالا بودن گین‌های کنترلی باعث اعمال نیروی مرکزی نامطلوب به دستان جراح دستیار می‌شود. در نتیجه جهت محدود نمودن این نیرو بهتر است مقدار کوچکی برای ضرایب کنترلی بخش پایدارساز در نظر گرفته شود که در این تحقیق این مقادیر برای هر دو کنترل‌کننده به صورت $K_2 = I_{3\times3}$ و $\Lambda_2 = I_{3\times3}$ تنظیم شده است.

از طرف دیگر جهت اطمینان از قوام ساختار کنترلی، مقادیر کلیه پارامترهای فیزیکی هنگام اعمال هر دو کنترل‌کننده به اندازه ۲۰٪ دچار انحراف شده‌اند. انتخاب پارامترهای بخش غیرخطی کنترل تطبیقی مطابق [۲۱] انجام شده است. علاوه بر آن در ارتباط با کنترل مقاوم قانون کنترلی *(۱۴)* شامل سه عبارت است و در آن عبارت $Y_2\hat{\theta}_2$ برای غلبه بر رفتار غیرخطی سیستم، $-K_2 r_2$ برای پایدارسازی، و $\psi(F_{h1}, F_{h2})$

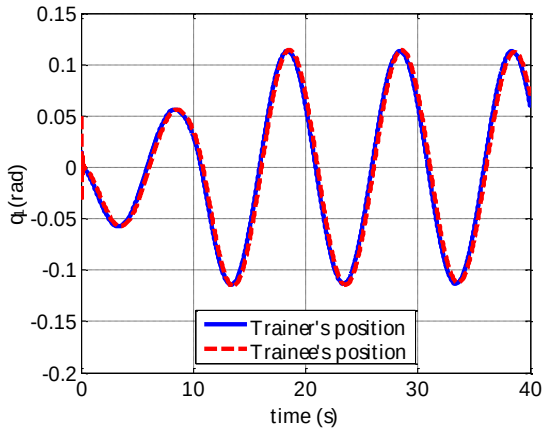
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]

برای انتقال اختیار عملیات است. برای انتخاب پارامترهای ξ_1 و ξ_2 با توجه به رابطه *(۱۲)* و با در نظر گرفتن ۲۰٪ انحراف پارامترها نسبت به مقادیر نامی مقادیر $\xi_1 = \xi_2 = 0.15$ را در نظر می‌گیریم. انتخاب پارامترهای μ_1 و μ_2 به صرت سعی و خطا انجام می‌شود و هر چه این پارامترها کوچکتر باشند ردیابی بهتر بوده و در عوض دامنه و نوسانات تلاش کنترلی بیشتر می‌شود. دقت شود برای کنسول هپتیک استاد ردیابی موقعیت کنسول هپتیک استاد حائز اهمیت فراوانی است. از طرف دیگر برای کنسول هپتیک دستیار هدف ردیابی موقعیت حائز اهمیت نیست و با توجه به اینکه کنسول هپتیک دستیار با محیط در ارتباط است اعمال تلاش کنترلی با دامنه و نوسانات بالا چندان مطلوب نیست. در نتیجه با در نظر گرفتن این شرایط پارامتر μ_1 کوچکتر از μ_2 در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق به صورت سعی و خطا این پارامترها به صورت $\mu_1 = 0.05$ و $\mu_2 = 0.5$ تنظیم شده‌اند. پارامترهای مربوط به بخش انعکاس نیرو نیز به صورت κ_1=0.3 و κ_2=0.35 تنظیم شده‌اند.

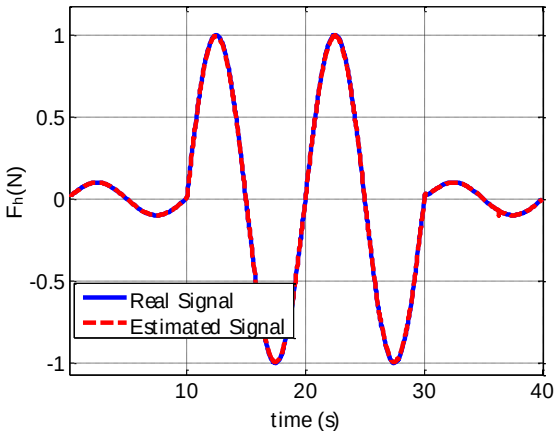
از طرف دیگر در ارتباط با انتخاب پارامترهای رویتگر حالت با توجه به اینکه رویتگر بهره بالا استفاده شده است مهمترین پارامتر تاثیرگذار در عملکرد رویتگر ϵ است. برای انتخاب ϵ می توان از شرط *(۴۶)* که با توجه به پایداری سیستم استخراج شده است استفاده نمود. دقت شود شرط مورد نظر می‌تواند به عنوان یک حدس اولیه استفاده شود و ممکن است حد بالای به دست آمده محافظه کارانه باشد. برای به دست آوردن مقدار مناسب پارامتر ϵ باید به صورت سعی و خطا مقدار حاصل را کاهش داد تا به عملکرد مناسب رسید. با توجه به تئوری رویتگر بهره بالا می‌توان دریافت سرعت دینامیک خطای رویتگر وابسته به ϵ است و در صورتی که این پارامتر به اندازه کافی کوچک انتخاب شود پارامترهای a_1 و a_2 تاثیر چندانی بر عملکرد رویتگر ندارند و تنها کافی است به صورتی انتخاب شوند که ریشه های معادله $\lambda^2 + a_1\lambda + a_2 = 0$ سمت چپ محور مختصات باشند. با توجه به موارد بیان شده مقادیر پارامترهای مربوط به رویتگر به صورت a_1=0.07، a_2 =0.0025 و ϵ=0.0002 در نظر گرفته می‌شوند.



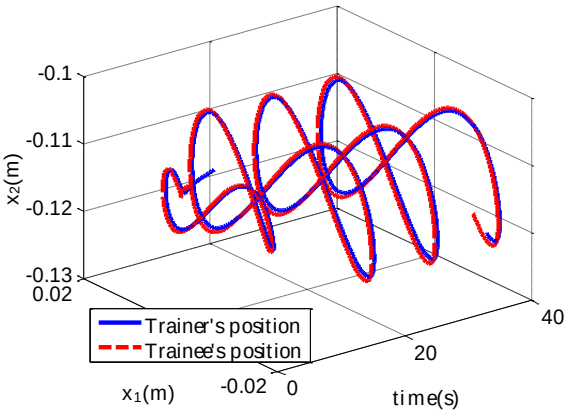
شکل ۵ موقعیت مفصل اول ربات با اعمال کنترل‌کننده تطبیقی ارایه شده در [21]



شکل ۶ موقعیت مفصل اول ربات با اعمال کنترل‌کننده پیشنهادی



شکل ۷ تخمین نیروی دست جراح استاد برای مفصل اول



شکل ۸ موقعیت دو کنسول هپتیک در فضای کارتزین

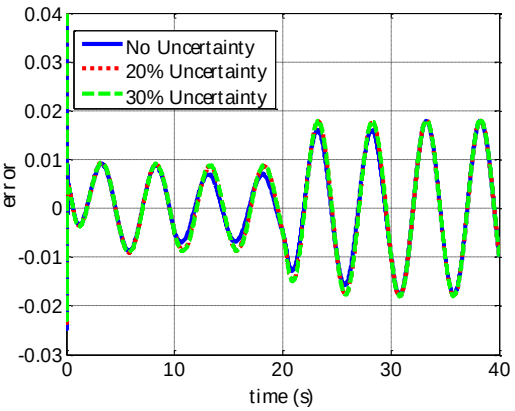
با توجه به اینکه رفتار کلی موقعیت مفاصل مشابه است، تنها موقعیت مفصل اول ربات‌ها نمایش داده شده است. موقعیت مفصل اول ربات‌ها برای کنترل کننده تطبیقی معرفی شده در [۱۲] در شکل ۵ و برای کنترل‌کننده مقاوم پیشنهاد شده در پژوهش حاضر در شکل ۶ نمایش داده شده است. موقعیت کنسول هپتیک جراح استاد و کنسول جراح دستیار به ترتیب با خطوط ممتد آبی رنگ و خطوط مقطع قرمز رنگ مشخص شده است. با توجه به نتایج کنترل کننده تطبیقی معرفی شده در [۲۱]، مسیر موقعیت هر دو مفصل در زمانهای بین ۰ ثانیه تا ۱۰ ثانیه و در زمان بین ۱۰

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]

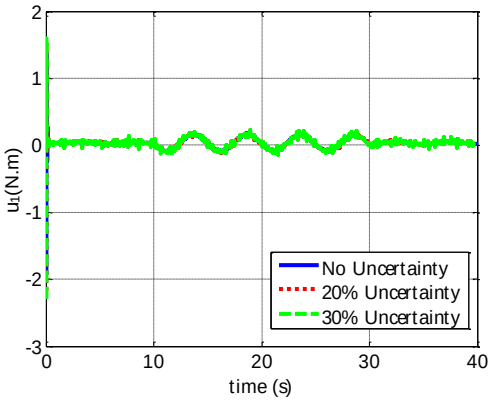
ثانیه تا ۲۰ ثانیه با یکدیگر مشابه است و مسیر در زمان بین ۲۰ ثانیه تا ۳۰ ثانیه با مسیر در زمان بین ۳۰ ثانیه تا ۴۰ ثانیه با یکدیگر مشابه است. در نتیجه همانطور که انتظار داشتیم اختیار عمل به طور کامل به عهده جراح دستیار است و جراح استاد تاثیری در حرکت ابزار جراحی ندارد. در واقع در زمانهای بین ۰ ثانیه تا ۱۰ ثانیه و زمان بین ۱۰ ثانیه و ۲۰ ثانیه جراح دستیار نیروی صحیحی وارد نکرده است و علیرغم آنکه در زمان بین ۱۰ ثانیه تا ۲۰ ثانیه جراح استاد نیروی صحیح وارد کرده است به علت عدم قابلیت انتقال اختیار انجام عملیات به صورت برخط نیروی وارد شده توسط جراح استاد هیچ تاثیری بر حرکت ابزار جراحی ندارد. از طرف دیگر تاثیر استاد در تصحیح خطای دستیار در نمودار کنترل‌کننده مقاوم پیشنهاد شده در پژوهش حاضر در شکل ۶ مشهود است. همانطور که پیش از این بیان شد دستیار در زمان بین ۰ تا ۱۰ ثانیه و ۱۰ ثانیه تا ۲۰ ثانیه نیروی صحیحی وارد نمی‌کند و همانطور که در نمودار دیده می‌شود پروفایل نیروها در این دو زمان ذکر شده مشابه است. با توجه به نمودار نیروها در زمان بین ۰ تا ۱۰ ثانیه نیروی اعمال شده توسط استاد دارای دامنه پایینی است و به همین علت اختیار عملیات به عهده دستیار است. از طرفی در زمان بین ۱۰ ثانیه تا ۲۰ ثانیه دامنه نیروی وارد شده توسط استاد از مقدار آستانه بالاتر است و به همین علت اختیار عملیات به عهده استاد است. بنابراین انتظار می‌رود در زمان ۰ تا ۱۰ ثانیه حرکت صحیح انجام نشود اما در زمان ۱۰ ثانیه تا ۲۰ ثانیه حرکت صحیح انجام شود. نمودار موقعیت‌ها به خوبی بیانگر تمایز سیگنالهای موقعیت بین زمان ۰ تا ۱۰ ثانیه و ۱۰ ثانیه تا ۲۰ ثانیه است. از طرف دیگر در زمان بین ۳۰ ثانیه تا ۴۰ ثانیه دستیار نیروی صحیحی اعمال می نماید اما به علت اعمال نیروی با دامنه بالاتر از آستانه توسط استاد، اختیار عملیات همچنان به عهده استاد است. برای سیگنالهای موقعیت همان طور که انتظار می‌رود حرکت صحیحی مشابه حرکت بین ۱۰ ثانیه تا ۲۰ ثانیه انجام شده است. در پایان و در زمان بین ۳۰ ثانیه تا ۴۰ ثانیه نیرویی با دامنه کمتر از آستانه توسط استاد اعمال شده است و به همین علت اختیار عملیات به عهده دستیار است. از طرف دیگر در این زمان دستیار نیز سیگنال نیروی صحیح اعمال نموده است. در این زمان نیز انتظار می‌رود حرکت صحیحی مشابه حرکت انجام شده در زمانهای ۱۰ ثانیه تا ۲۰ ثانیه و ۲۰ ثانیه تا ۳۰ ثانیه انجام شود. نمودار سیگنالهای موقعیت نشان می‌دهد این انتظار برآورده شده است. نکته دیگر در ارتباط با نمودار موقعیت برقراری ردیابی کامل موقعیتهای دو کنسول هپتیک است که نشاندهنده عملکرد مناسب کنترل‌کننده مقاوم پیشنهادی است.

علاوه بر آن جهت اطمینان از عملکرد مناسب رویتگر بهره‌بالا، نیروهای واقعی و تخمین زده شده برای کنسول هپتیک استاد در شکل ۷ نمایش داده شده‌اند. با توجه به انطباق بین سیگنالهای واقعی و تخمین زده شده عملکرد مناسب رویتگر بهره بالا از این نمودار استنباط می‌شود. در شبیه‌سازی‌های این بخش نیروهای دست طوری در نظر گرفته شده‌اند که منجر به ایجاد یک منحنی پاپیونی در فضای کارتزین شوند. نمودار موقعیت درجه آزادی اول و دوم ربات در فضای کارتزین بر حسب زمان در شکل ۸ نمایش داده شده است.

جهت مقایسه ساختار پیشنهادی این مقاله با سایر ساختارهای موجود و از جمله ساختار شبیه سازی شده باید به این نکته توجه کرد که در ساختارهای پیشین زمانی که اختیار عمل به طور کامل به جراح دستیار واگذاری می‌شود، جراح استاد دیگر نمی‌توان هیچ نقش اصلاحی به صورت برخط روی عملیات داشته باشد. در واقع تنها راه حل ممکن در این حالت آن است که عملیات متوقف شده و پارامترهای ساختار کنترلی مجددا به صورتی تنظیم شوند که اختیار عمل به صورت جزیی یا کلی به استاد منتقل شود. این موضوع از روی نمودارهای موقعیت در شبیه‌سازی روش مورد مقایسه مشخص است به این صورت که در زمان بین ۲۰ ثانیه تا ۳۰ ثانیه و هنگامی که جراح دستیار فرمان نادرست اعمال می‌کند جراح استاد علیرغم اعمال نیروی درست نمی‌تواند تاثیری روی عملیات داشته باشد. حال آنکه ساختار پیشنهادی با استفاده از عبارت اصلاحی انعکاس نیرو جراح استاد قادر است اختیار عملیات را به صورت برخط به خود منتقل نماید. همانطور که در نمودار موقعیت در شبیه سازی ساختار پیشنهادی این مقاله مشاهده می‌شود در زمان بین ۲۰ ثانیه تا ۳۰ ثانیه موقعیت ابزار جراحی از فرمان جراح استاد تبعیت نموده است.

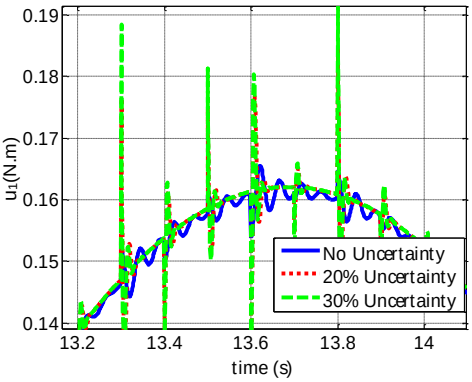


شکل ۹ سیگنال خطا به ازای مقادیر مختلف عدم قطعیت

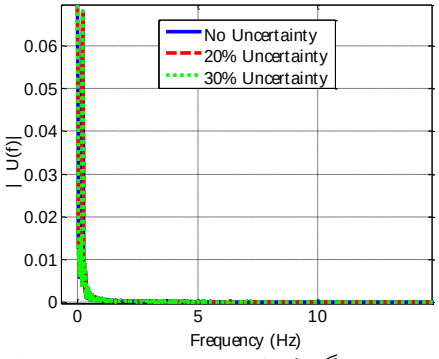


شکل ۱۰ نمودار سیگنال کنترلی بر حسب مقادیر مختلف عدم قطعیت

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]



شکل ۱۱ نمودار سیگنال کنترلی بر حسب مقادیر مختلف عدم قطعیت (زوم شده)



شکل ۱۲ نمودار سیگنال کنترلی بر حسب مقادیر مختلف عدم قطعیت در حوزه فرکانس

در ادامه سیگنالهای خطا و تلاش کنترلی و تاثیر میزان عدم قطعیت بر آنها بررسی می‌شود. در شکل ۹ سیگنال خطا بر حسب مقادیر مختلف عدم قطعیت نشان داده شده است. شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نیز نمودار سیگنال کنترلی به صورت زوم نشده و زوم شده نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش میزان عدم قطعیت تلاش کنترلی به میزان قابل توجهی دچار تغییر می‌شود و از طرفی سیگنال خطا دچار تغییر چندانی نمی‌شود. دلیل این موضوع آن است که با افزایش عدم قطعیت عبارت غیرخطی مقاوم سیگنال کنترلی سهم قابل توجهی از سیگنال کنترلی را به خود اختصاص می‌دهد تا مقدار خطا را در همان محدوده اولیه نگه دارد.

نکته دیگر بررسی طیف فرکانسی تلاش کنترلی جهت اطمینان از قابلیت تولید آن به صورت عملی است. همچنین با توجه به اینکه در عمل پیاده‌سازی سیگنالها به صورت دیجیتال انجام می‌شود، طیف فرکانسی سیگنال کنترل برای کنسول هپتیک استاد (که با مشاهده نسبت به کنسول هپتیک دستیار دارای نوسانات بیشتری است) با استفاده از دستور fft نرم افزار متلب در شکل ۱۲ نمایش داده شده است و همانطور که مشاهده می‌شود فرکانسهای اصلی سیگنال کنترل کمتر از یک هرتز هستند.

نکته دیگر مقایسه دو روش کنترل تطبیقی پیشنهاد داده شده در [۲۱] و کنترل مقاوم پیشنهاد داده شده در این پژوهش از لحاظ خطای موقعیت و تلاش کنترلی است. دقت شود نقطه قوت و دستاورد مهم روش پیشنهادی ارایه یک الگوریتم انعکاس نیرو جهت تصحیح خطای دستیار است. بنابراین در روش پیشنهادی تمرکز زیادی روی بهبود خطای موقعیت و تلاش کنترلی صورت نگرفته است. اما با این حال از لحاظ خطای موقعیت و تلاش کنترلی هم کمی بهتر از روش پیشین مبتنی بر کنترل تطبیقی عمل نموده است. با توجه به اینکه نزدیکی نمودارهای خطا و تلاش کنترلی دو روش در این بخش مقایسه دو روش از طریق محاسبه عددی صورت گرفته است. معیار در نظر گرفته شده برای خطای موقعیت مجموع مربعات خطا و برای تلاش کنترلی مجموع مربعات سیگنال کنترلی است. همانطور که در جدول نشان داده شده است در جدول ۲ نتایج مقایسه روش پیشنهادی با روش کنترل تطبیقی از لحاظ خطای موقعیت و تلاش کنترلی برای مقادیر مختلف تاخیر نمایش داده شده است. در صورتی که تاخیر برابر صفر باشد مجموع مربعات خطا در دو روش کنترل تطبیقی و روش پیشنهادی کنترل مقاوم برابر است و از لحاظ مجموع مربعات سیگنال کنترل، روش پیشنهادی کنترل مقاوم کمی بهتر عمل نموده است. از طرف دیگر با افزایش تاخیر روش پیشنهادی کنترل مقاوم علاوه بر مجموع مربعات سیگنال کنترل، از لحاظ مجموع مربعات خطا نیز کمی بهتر عمل نموده است. در نتیجه با افزایش میزان تاخیر برتری نسبی روش پیشنهادی نسبت به روش کنترل تطبیقی نمایان می‌شود.

جدول ۲: مقایسه روش پیشنهادی و روش کنترل تطبیقی برای مقادیر مختلف تاخیر

مقدار تاخیر	روش کنترل تطبیقی پیشنهاد شده توسط پژوهش های قبلی		روش کنترل مقاوم با انعکاس نیرو پیشنهاد شده در پژوهش پیش رو	
	مجموع مربعات خطا	مجموع مربعات سیگنال کنترل	مجموع مربعات خطا	مجموع مربعات سیگنال کنترل
صفر	۰/۳۱	۱۶/۱	۰/۳۱	۱۵/۶
۱۰۰ میلی ثانیه	۰/۷۵	۱۶/۲	۰/۷۳	۱۵/۷
۲۰۰ میلی ثانیه	۱/۳۲	۱۶/۲	۱/۲۸	۱۵/۷
۵۰۰ میلی ثانیه	۲/۸۱	۱۶/۴	۲/۷۲	۱۵/۸
۱ ثانیه	۴/۴۵	۱۶/۸	۴/۳۵	۱۶/۱

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، طراحی کنترل کننده برای سامانه هپتیک آموزش جراحی مورد مطالعه قرار گرفت. در این سامانه عملیات جراحی به صورت مشارکتی توسط استاد و دستیار انجام می‌شود. با وجود آنکه عملیات اصلی

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]

مستقیما توسط دستیار انجام می‌شود، استاد قادر است در صورت بروز انحراف از سوی دستیار با مداخله از طریق سامانه هپتیک، اشتباهات احتمالی دستیار را تصحیح نماید. اهداف کنترلی، شامل ردیابی موقعیت ابزار جراحی توسط کنسول هپتیک استاد و انتقال برخط اختیار عملیات است. برای رسیدن به هدف اول و همینطور حفظ پایداری، یک ساختار کنترلی مقاوم و برای رسیدن به هدف دوم یک الگوریتم انعکاس نیرو معرفی و پیشنهاد شده است. علاوه بر آن، جهت تخمین نیروی دست اپراتورها، یک رویتگر بهره بالا معرفی شده است. پایداری کل مجموعه در حضور عناصر غیر خطی وعدم قطعیت، با استفاده از روش «پایداری ورودی به حالت» بررسی و اثبات شده است. نتایج شبیه‌سازی، نشاندهنده عملکرد قابل قبول روش پیشنهادی در انتقال بر خط اختیار عملیات و همینطور ردیابی موقعیت ابزار جراحی توسط کنسول هپتیک استاد است.

علیرغم آنکه ساختار کنترلی و تحلیل پایداری ارایه شده برای سیستم غیر خطی با حضور عدم قطعیت دینامیکی در پارامترها توسعه داده شده است، عدم قطعیت سینماتیکی در روش پیشهادی لحاظ نشده است. عدم قطعیت سینماتیکی عدم قطعیت در ساختار هندسی ربات است که در کنار عدم قطعیت دینامیکی در ساختار رباتها وجود دارد. لحاظ کردن این نوع عدم قطعیت در مطالعات آینده در دستور کار قرار خواهد گرفت. علاوه بر آن، به کار گرفتن ساختار پیشنهادی در یک سیستم واقعی و استخراج و تحلیل نتایج آزمایشگاهی در دست انجام است و نتایج آن در پژوهش‌های آینده منتشر خواهد شد.

مراجع

[1] Hokayem, P.F. and Spong, M.W., 2006. Bilateral teleoperation: An historical survey. Automatica, 42(12), pp.2035-2057 .

[2] Sharifi, I., Talebi, H.A. and Motaharifar, M., 2016. A framework for simultaneous training and therapy in multilateral tele-rehabilitation. Computers & Electrical Engineering, 56, pp.700-714 .

[3] Liu, F., Lelevé, A., Eberard, D. and Redarce, T., 2016. A Dual-user Teleoperation System with Adaptive Authority Adjustment for Haptic Training. In New Trends in Medical and Service Robots (pp. 165-177). Springer, Cham .

[4] Nudehi, S.S., Mukherjee, R. and Ghodoussi, M., 2005. A shared-control approach to haptic interface design for minimally invasive telesurgical training. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 13(4), pp.588-592 ...

[5] Khademian, B. and Hashtrudi-Zaad, K., 2012. Dual-user teleoperation systems: New multilateral shared control architecture and kinesthetic performance measures. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 17(5), pp.895-906 .

[6] Li, J., Tavakoli, M. and Huang, Q., 2014. Absolute stability of a class of trilateral haptic systems. IEEE transactions on haptics, 7(3), pp.301-310 .

[7] Llewellyn, F.B., 1952. Some fundamental properties of transmission systems. Proceedings of the IRE, 40(3), pp.271-283 .

[8] Razi K, Hashtrudi-Zaad K. Analysis of coupled stability in multilateral dual-user teleoperation systems. IEEE Transactions on Robotics. 2014 Jun;30(3):631-41 .

[9] Zeheb, E. and Walach, E., 1981. Necessary and sufficient conditions for absolute stability of linear n-ports. International Journal of Circuit Theory and Applications, 9(3), pp.311-330 .

[10] Shahbazi, M., Atashzar, S.F., Talebi, H.A. and Patel, R.V., 2015. Novel cooperative teleoperation framework: Multi-master/single-slave system. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 20(4), pp.1668-1679 .

[11] Ghorbanian, A., Rezaei, S.M., Khoogar, A.R., Zareinejad, M. and Baghestan, K., 2013. A novel control framework for nonlinear time-delayed dual-master/single-slave teleoperation. ISA transactions, 52(2), pp.268-277 .

[12] Nuno, E., Ortega, R., Barabanov, N. and Basañez, L., 2008. A globally stable PD controller for bilateral teleoperators. IEEE Transactions on Robotics, 24(3), pp.753-758 .

[13] Shahbazi, M., Atashzar, S.F., Talebi, H.A. and Patel, R.V., 2014, May. An expertise-oriented training framework for robotics-assisted surgery. In Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on (pp. 5902-5907). IEEE .

[14] Motaharifar, M., Talebi, H.A., Abdollahi, F. and Afshar, A., 2015. Nonlinear adaptive output-feedback controller design for guidance of flexible needles. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 20(4), pp.1912-1919 .

[15] Khalil, H.K., 2017. Extended high-gain observers as disturbance estimators. SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 10(3), pp.125-134 .

[16] Polushin, I.G. and Marquez, H.J., 2003. Stabilization of bilaterally controlled teleoperators with communication delay: an ISS approach. International Journal of Control, 76(8), pp.858-870 .

[17] Atashzar, S.F., Polushin, I.G. and Patel, R.V., 2017. A small-gain approach for nonpassive bilateral telerobotic rehabilitation: Stability analysis and controller synthesis. IEEE Transactions on Robotics, 33(1), pp.49-66 .

[18] Spong, M.W. and Vidyasagar, M., 2008. Robot dynamics and control. John Wiley & Sons .

[19] Marquez, H.J., 2002. Nonlinear Control Systems: Analysis and Design .

[20] Royden, H.L. and Fitzpatrick, P.M., 2010. Real analysis (4th Edtion). New Jersey: Printice-Hall Inc .

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]

[21] E. Nuno, R. Ortega, L. Basanez, and D. Hill, "Synchronization of networks of nonidentical euler-lagrange systems with uncertain parameters and communication delays," Automatic Control, IEEE Transactions on,vol. 56, no. 4, pp. 935–941, 2011.

[22] M. Motaharifar, A. Bataleblu, and H. Taghirad, "Adaptive control of dual user teleoperation with time delay and dynamic uncertainty," in Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2016. IEEE, 2016 .

[23] Taghirad, H.D., 2013. Parallel robots: mechanics and control. CRC press.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.2.5.5]
[DOI: 10.29252/joc.14.2.63]