



افزایش شفافیت در سیستم‌های تله‌اپراتوری دو جانبه بر مبنای رویکرد مدل میانجی

بهنام یزدان‌خو¹، برهان بیگزاده^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* صندوق پستی 16765163، b_beigzadeh@iust.ac.ir، تهران

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 آبان 1395

پذیرش: 20 آذر 1395

ارائه در سایت: 26 دی 1395

کلید واژگان:

سیستم تله‌اپراتوری دوجانبه

شفافیت

رویکرد مدل میانجی

محیط مجازی

کنترل مد لغزشی

چکیده

شفافیت یک معیار ارزیابی سیستم‌های تله‌اپراتوری بر مبنای خطای نیرو و موقعیت است. معماری‌های کنترلی مرسوم برای حفظ پایداری عموماً شفافیت بالایی را نتیجه نمی‌دهند. یک روش نوین رویکرد تله‌اپراتوری مدل میانجی است که امپدانس محیط را در سمت پیرو تخمین زده و به راهبر ارسال می‌کند تا با ایجاد یک محیط مجازی، نیرو در آن‌جا به‌صورت محلی محاسبه شود. این امر شفافیت را بدون کاهش پایداری و در حضور تأخیر زمانی در سیستم افزایش می‌دهد. قرار دادن محیط مجازی در محل صحیح تأثیر به‌سزایی بر افزایش شفافیت سیستم دارد، ولی روش‌های ارائه‌شده برای این منظور به‌طور معمول نیازمند ساده‌سازی مدل محیط هستند یا تأثیر منفی بر شفافیت می‌گذارند. در این مقاله الگوریتمی نوین و در عین حال بسیار ساده جهت تعیین موقعیت محیط مجازی و زمان برخورد ارائه شده است. مهم‌ترین ویژگی این الگوریتم این است که نخست مستقل از مدل محیط بوده و بنابراین برای تمام محیط‌ها قابل پیاده‌سازی است، دوم شفافیت سیستم را بدون استفاده از سنسورهای اضافی افزایش می‌دهد. رویکرد پیشنهادی در یک سیستم تله‌اپراتوری دو جانبه یک درجه آزادی با تأخیر زمانی پیاده‌سازی شده است. جهت تخمین امپدانس محیط از روش‌های نوین دقیق و مقاوم استفاده شده است. از کنترل‌های امپدانس و مد لغزشی برای کنترل به ترتیب راهبر و پیرو استفاده شده و عملکرد سیستم در تعامل با محیط‌های سخت و نرم بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد در تعامل با هر دو محیط شفافیت سیستم بسیار بالاست، اما تنها در لحظه ابتدایی برخورد با محیط سخت پرش مدل رخ می‌دهد.

Improving transparency in bilateral teleoperation systems based on model-mediated approach

Behnam Yazdankhoo, Borhan Beigzadeh*

Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

*P.O.B. 16765163 Tehran, Iran, b_beigzadeh@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 October 2016
Accepted 10 December 2016
Available Online 15 January 2017

Keywords:

Bilateral teleoperation
Transparency
Model-mediated approach
Virtual environment
Sliding-mode controller

ABSTRACT

Transparency is an evaluation criterion for teleoperation systems based on force and position error. Generally, conventional control architectures do not lead to a high transparency to preserve the stability. A novel method is the model-mediated teleoperation approach which estimates the environment impedance on slave site and transmits it to master, where the force is calculated locally by creating a virtual environment. This procedure increases the transparency without degrading stability and with time delays in system. Correctly locating the virtual environment has a significant effect on improving the transparency of the system; however, the proposed methods for this aim either require simplifying environment model or adversely affect the transparency. In this paper a novel, yet very simple algorithm is presented for determining the location of the virtual environment and collision time. The main feature of this algorithm is that firstly it is independent of environment model and thus is applicable to all environments, and secondly, it increases the transparency of the system without using additional sensors. The proposed approach is implemented on a single-degree-of-freedom bilateral teleoperation system with time delay. For estimating environment impedance, novel accurate and robust methods are utilized. Impedance and sliding-mode controllers are used for controlling the master and slave, respectively, and the performance of the system is investigated in interaction with hard and soft environments. Simulation results indicate that the transparency of the system is suitably high in interaction with both environments; however, model jump occurs merely at the first moment of contact with the hard environment.

1- مقدمه

به ربات پیرو وارد می‌شود که انتظار می‌رود به‌صورت نیروی عکس‌العمل توسط کاربر حس شود. مشخصات یادشده مختص یک سیستم تله‌اپراتوری است که از عبارت دوجانبه برای بیان نوع کنترل آن استفاده می‌شود. به عبارت ساده‌تر، سیستم تله‌اپراتوری دوجانبه سیستمی است که در آن اطلاعات در دو جهت بین کاربر و محیط تبادل می‌شود [1,2].

در یک سیستم تله‌اپراتوری کاربر با حرکت دادن ربات راهبر¹ موقعیت ربات پیرو² را کنترل می‌کند. از طرفی در هنگام برخورد ربات پیرو با محیط نیرویی

¹ Master

² Slave

Please cite this article using:

B. Yazdankhoo, B. Beigzadeh, Improving transparency in bilateral teleoperation systems based on model-mediated approach, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 273-283, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

B. Yazdankhoo, B. Beigzadeh, Improving transparency in bilateral teleoperation systems based on model-mediated approach, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 273-283, 2017 (in Persian)

مجازی انجام شده‌اند، اما بسیاری از راه‌حل‌های پیشنهادی با فرضیات ساده‌ساز (مانند صرف‌نظر از تأخیر زمانی یا ساده‌سازی مدل محیط) همراه هستند [10,5,3]. برخی دیگر نیز نیاز به استفاده از سنسورها و فیدبک‌های اضافه دارند (مانند سنسور مجاورت یا ویزن) [9]؛ بنابراین ارائه راه‌حلی که در آن از کمترین فرضیات ساده‌ساز استفاده شود و نیز کمترین تأثیر منفی را بر عملکرد سیستم گذارد ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به این که در این مقاله کاربرد سیستم‌های تله‌پراتوری در جراحی مورد نظر است، بافت‌های موجود در بدن انسان به‌عنوان محیط فرض می‌شوند. به‌طور کلی می‌توان بافت‌های بدن انسان را در دو گروه سخت و نرم دسته‌بندی کرد. هر دو گروه بافت لازم است که در پیاده‌سازی رویکرد بالا لحاظ شوند و عملکرد سیستم در تعامل با آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

در این مقاله یک سیستم تله‌پراتوری دو جانبه با یک درجه آزادی به‌عنوان بستر در نظر گرفته شده و رویکرد مدل میانجی به همراه روش پیشنهادی برای ارتقاء آن روی سیستم پیاده‌سازی شده است. مدل‌های مناسب برای بافت‌های سخت و نرم نیز در نظر گرفته شده است. امیدانس محیط با استفاده از الگوریتم مناسب تخمین زده شده و با در نظر گرفتن تأخیر زمانی در کانال‌های ارتباطی، به سمت راهبر فرستاده شده است. محل قرارگیری محیط مجازی با استفاده روش ساده پیشنهادی تعیین می‌شود. این روش نیاز به ساده‌سازی مدل محیط یا مدل کلی سیستم ندارد و در حضور تأخیر زمانی نیز قابل پیاده‌سازی است، سپس برای راهبر از کنترلر امیدانس و برای پیرو از کنترلر مد لغزشی⁶ استفاده شده است که قابلیت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های سیستم را دارد. در نهایت شبیه‌سازی در تعامل جهت صحت‌گذاری بر عملکرد سیستم با دو نوع بافت سخت و نرم در محیط نرم‌افزاری انجام گرفته است که نشان می‌دهد وضعیت شفافیت سیستم بسیار مطلوب است.

2- مدل‌سازی سیستم

2-1- مدل دینامیکی ربات راهبر

در این مقاله ربات راهبر به‌صورت یک سیستم یک درجه آزادی خطی⁷ در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین می‌توان مدل دینامیکی آن را به‌صورت یک مدل خطی مرتبه دو مطابق رابطه (1) در نظر گرفت.

$$m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m + k_m x_m = F_h^* + U_m \quad (1)$$

در این رابطه m_m ، b_m و k_m به ترتیب جرم، ضریب استهلاک و ضریب فنری ربات راهبر هستند. F_h^* نیروی بین دست کاربر و ربات راهبر و U_m ورودی کنترلی به سمت راهبر است. x_m نیز معرف مکان ربات راهبر است.

2-2- مدل دینامیکی دست انسان

مدل‌سازی رفتار انسان هنگام کار با سیستم‌های تله‌پراتوری به علت غیرخطی و متغیر با زمان بودن آن کاری بسیار پیچیده و دشوار است [8]؛ بنابراین در طراحی بسیاری از سیستم‌های تله‌پراتوری از مدل دینامیکی دست کاربر صرف‌نظر شده و فقط نیروی دست به‌عنوان یک نیروی خارجی وارد شده به ربات راهبر در نظر گرفته می‌شود [12,11,3]. این رویکرد بخشی از دینامیک راهبر را حذف کرده و مدل آن را تنها به‌وسیله مدل دینامیکی ربات راهبر تقریب می‌زند.

به‌عنوان یک راه‌حل جایگزین مناسب می‌توان یک رفتار ثابت و از پیش

شفافیت¹ و پایداری دو معیار برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های تله‌پراتوری هستند. اگر موقعیت ربات راهبر توسط پیرو دنبال شود و نیروی وارد شده از محیط به ربات پیرو برابر با نیروی عکس‌العمل ربات راهبر باشد، سیستم شفاف است. همچنین طراحی کنترلر باید به‌گونه‌ای باشد که پایداری سیستم را در حضور عدم قطعیت‌های موجود تضمین نماید [3]. مسئله اصلی این است که شفافیت و پایداری در سیستم‌های تله‌پراتوری در تقابل با یکدیگر بوده و در نتیجه باید تعادلی بین آن‌ها در طراحی در نظر گرفته شود [4-6].

تاکنون معماری‌های کنترلی گوناگونی بر پایه معیارهای شفافیت و پایداری برای سیستم‌های تله‌پراتوری دو جانبه پیشنهاد شده است. این معماری‌ها را می‌توان براساس نوع فیدبکی که از سمت راهبر به پیرو و بالعکس فرستاده می‌شود، به پنج گروه موقعیت-موقعیت، نیرو-موقعیت، موقعیت-نیرو، نیرو-نیرو و کنترل چهارکاناله تقسیم‌بندی کرد [4,7]. این معماری‌های کنترلی براساس فیدبک مستقیم از پارامترهای مورد نظر بنا شده‌اند. مشکل اصلی رویکرد این است که میزان شفافیت بالایی را نشان نمی‌دهد؛ بنابراین روش‌های جدیدی بر پایه تخمین پارامترها یا امیدانس محیط بنا شده‌اند که از آن‌ها با عنوان رویکرد براساس واقعیت مجازی² یا مدل میانجی³ یاد می‌شود [3].

در این رویکرد به‌جای استفاده از فیدبک مستقیم نیرو از پیرو به راهبر، پارامترهای محیط در سمت پیرو به‌صورت مداوم تخمین زده شده و به سمت راهبر ارسال می‌شوند. در آن‌جا در هر لحظه با استفاده از این پارامترها مقدار نیرو به‌صورت محلی محاسبه شده و به‌عنوان نیروی عکس‌العمل راهبر مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل 1). مزیت این رویکرد جدا کردن⁴ حلقه‌های کنترلی راهبر و پیرو است. این امر تأثیر منفی تأخیر زمانی بر شفافیت سیستم را کاهش می‌دهد، همچنین حس هپتیک⁵ یا واقعیت ادراک‌شده⁵ توسط کاربر بدون کاهش پایداری افزایش خواهد یافت [5,6,8].

علی‌رغم مزایای یادشده استفاده از رویکرد مدل میانجی چالش‌هایی نیز به همراه خواهد داشت. مدل‌سازی مناسب محیط و تخمین دقیق و سریع پارامترهای آن یکی از این چالش‌هاست [8]. چالش دیگر تعیین محل قرارگیری محیط مجازی در سمت راهبر در حضور تأخیر زمانی در کانال‌های ارتباطی سیستم است [8,9]. اهمیت مورد اخیر از آن جهت دوچندان است که نه تنها اثر مستقیم بر شفافیت سیستم دارد، عموماً پیاده‌سازی آن سبب تنزل سایر قابلیت‌های سیستم (مانند شفافیت، پایداری یا تخمین مناسب محیط) می‌شود. تا به امروز پژوهش‌هایی در راستای تعیین وضعیت محیط

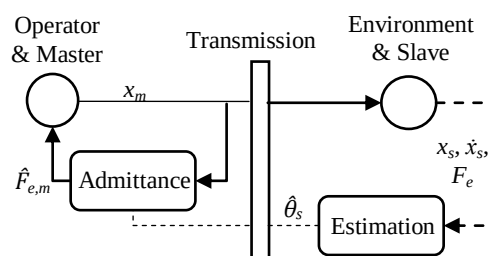


Fig. 1 General scheme of the model-mediated approach [3]

شکل 1 طرح کلی رویکرد مدل میانجی [3]

- ¹ Transparency
- ² Virtual reality (VR)
- ³ Model-mediated
- ⁴ Decoupling
- ⁵ Perceived realism

⁶ Sliding-mode controller
⁷ Translational

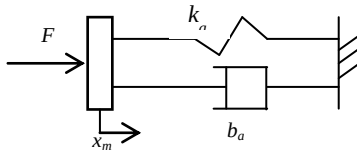


Fig. 2 Two-parameter spring-damper model for human hand [13]

شکل 2 مدل دو پارامتری فنر-دمپر برای دست انسان [13]

ترکیب فنر و دمپر (خطی یا غیرخطی) برای بافت در سیستم‌های تله‌پراتوری مرسوم است [3, 11, 14].

در این مقاله ابتدا سه فرض برای بافت در نظر گرفته می‌شود [3]:

1- عملکرد انتهایی ربات پیرو صلب و با سطح مقطع کوچک فرض می‌شود و گرفتن قطعه¹ صورت نمی‌پذیرد.

2- بافت ثابت و صاف² بوده و حرکت مماس بر آن در نظر گرفته نمی‌شود.

3- استهلاك فقط هنگام فشار دادن بافت روی می‌دهد. در غیر این صورت تنها ضریب فنریت برای بافت (بدون استهلاك) در نظر گرفته می‌شود.

با فرضیات یادشده دو نوع مدل به‌صورت کلی برای بافت در تعامل با عملکرد انتهایی ربات پیرو در نظر گرفته می‌شود: بافت سخت و بافت نرم. برای بافت سخت از مدل کلونین-وویت³ استفاده می‌شود. رابطه اصلی این مدل به‌صورت رابطه (6) بیان می‌شود.

$$F_e = \begin{cases} K_{kv}\delta x_s + B_{kv}\dot{x}_s, & \delta x_s \geq 0 \\ 0, & \delta x_s < 0 \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه (6) F_e نیروی محیط است. K_{kv} و B_{kv} به ترتیب ضریب فنریت و ضریب استهلاك هستند که پارامترهای بافت سخت را تشکیل می‌دهند. δx_s معرف میزان نفوذ در بافت بوده و به‌صورت رابطه (7) تعریف می‌شود و نیز سرعت عملکرد انتهایی ربات پیرو است.

$$\delta x_s = x_s - x_{0,s} \quad (7)$$

در رابطه (7) $x_{0,s}$ بیانگر مکان در اولین لحظه برخورد ربات پیرو با بافت است.

اما رابطه (6) طبق فرض ابتدایی سوم، در [3] به‌صورت رابطه (8) بازنویسی شده است.

$$F_e = \begin{cases} K_{kv}\delta x_s + B_{kv}\dot{x}_s, & \delta x_s \geq 0 \wedge \dot{x}_s \geq 0 \\ K_{kv}\delta x_s, & \delta x_s \geq 0 \wedge \dot{x}_s < 0 \\ 0, & \delta x_s < 0 \end{cases} \quad (8)$$

یکی از مزایای این رابطه نسبت به رابطه (6) این است که در هنگام جدا شدن عملکرد انتهایی ربات از بافت، هنگام مماس بودن عملکرد انتهایی ربات به بافت، نیرویی از طرف محیط به ربات وارد نمی‌شود. این مهم که مطابق با واقعیت است، در رابطه (6) لحاظ نشده است. در آن رابطه هنگامی که $\delta x_s = 0$ ، اگر $\dot{x}_s \neq 0$ آن‌گاه $F_e \neq 0$ که معادل این است که یک انرژی ذخیره‌شده هنگام شروع و اتمام تماس با محیط وجود دارد که با مشاهده‌های تجربی مطابقت ندارد.

همان‌طور که اشاره شد مشکل ایجاد انرژی ذخیره‌شده در رابطه (6) در آغاز و پایان تماس با محیط وجود دارد. اما در رابطه (8) این مسئله فقط در پایان تماس برطرف شده، در حالی که در شروع تماس اگر ربات دارای سرعت باشد همچنان $F_e \neq 0$ این مورد را نیز به آسانی می‌توان با حذف حالت تساوی $\delta x_s \geq 0$ از نخستین عبارت رابطه (8) برطرف کرد؛ بنابراین در این مقاله رابطه (8) اصلاح شده و به‌صورت رابطه (9) استفاده می‌شود.

تعیین‌شده را برای کاربر در نظر گرفت و وارد دینامیک سیستم کرد [8]. بر این اساس عموماً یک مدل خطی مرتبه دو (معادل یک سیستم جرم و فنر و دمپر) به‌عنوان مدل دست انسان در سیستم‌های تله‌پراتوری مانند [2] در نظر گرفته می‌شود.

اگرچه مدل خطی مرتبه دو مدل رایجی برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی دست انسان است، اما نویسندگان [13] براساس آزمایش‌های تجربی نشان دادند که مدل مناسب برای دست انسان در هنگام کار با سیستم‌های رباتیک از راه دور دارای مرتبه نسبی یک است. بر این اساس دو مدل دو پارامتری و پنج پارامتری در مقاله یادشده برای دست پیشنهاد شده است. همچنین نشان داده شده است که در فرکانس‌های کاری پایین هر دو مدل به‌خوبی و تقریباً به یک میزان قابلیت مدل‌سازی رفتار دینامیکی دست را دارند؛ بنابراین در مقاله کنونی از مدل نخست، شکل 2، به‌عنوان مدل دست انسان استفاده و با رابطه (2) نیز بیان می‌شود.

$$b_a\dot{x}_m + k_ax_m = F_h - F_h^* \quad (2)$$

در این رابطه b_a و k_a به ترتیب ضریب استهلاك و ضریب فنریت دست انسان هستند و F_h نیز نیروی خارجی دست انسان یا به عبارت دیگر نیروی ماهیچه‌های دست انسان است.

برای حصول رابطه (2) مفروض است که کاربر به‌صورت کامل و مداوم عملکرد انتهایی ربات راهبر را در دست می‌گیرد، به‌طوری که مکان دست او همواره با مکان ربات راهبر برابر می‌شود.

حال با ترکیب روابط (1) و (2) می‌توان مدل دینامیکی راهبر (متشکل از مدل ربات راهبر و دست انسان) را به‌صورت رابطه (3) به دست آورد.

$$m_m\ddot{x}_m + b_{t,m}\dot{x}_m + k_{t,m}x_m = F_h + U_m \quad (3)$$

در رابطه بالا $b_{t,m} = b_m + b_a$ و $k_{t,m} = k_m + k_a$ ، نیروی وارده از طرف دست انسان نیز با یک تابع سینوسی مدل می‌گردد که به‌صورت رابطه (4) قابل بیان است.

$$F_h = A_h \sin \omega_h t \quad (4)$$

در این رابطه A_h دامنه و ω_h فرکانس زاویه‌ای اعمال نیرو توسط کاربر و t معرف زمان است.

3-2- مدل دینامیکی ربات پیرو

برای ربات پیرو نیز مانند ربات راهبر یک مدل خطی مرتبه دو مطابق رابطه (5) در نظر گرفته می‌شود.

$$m_s\ddot{x}_s + b_s\dot{x}_s + k_sx_s = U_s - F_e \quad (5)$$

در این رابطه m_s ، b_s و k_s به ترتیب جرم، ضریب استهلاك و ضریب فنریت ربات پیرو هستند. F_e نیروی وارده از محیط و U_s ورودی کنترلی به پیرو است. x_s نیز معرف مکان ربات پیرو است.

4-2- نیروی محیط

برای انجام شبیه‌سازی لازم است که مدل دینامیکی مناسبی برای محیط یا همان بافت مورد نظر در نظر گرفته شود. همچنین در این مقاله فیدبک دریافتی از محیط براساس پارامترهای تخمینی محیط بنا می‌شود؛ بنابراین ضرورت مدل‌سازی مناسب برای محیط دوجندان است.

براساس نوع بافت و همچنین میزان دقت مورد نظر می‌توان مدل‌های مختلفی برای آن در نظر گرفت. به‌طور کلی استفاده از مدل‌هایی به‌صورت

¹ Grasping

² Smooth

³ Kelvin-Voigt



Fig. 3 A scheme of the communication channel in the proposed teleoperation system (X and Y are two arbitrary parameters)

شکل 3 شمایی از کانال ارتباطی در سیستم تله‌اپراتوری پیشنهادی (Y و X دو پارامتر دلخواه هستند)

قابل نمایش است که توسط رابطه (12) تعریف می‌شود.

$$S(K_{kv}, t) = \begin{cases} kv, K_{kv} \geq K_{th} \quad \forall \delta t \leq t_{th} \\ hc, \text{ در غیر این صورت} \end{cases} \quad (12)$$

که در آن δt طبق رابطه (13) تعریف می‌شود.

$$\delta t = t - t_0 \quad (13)$$

که t_0 بیانگر نخستین لحظه برخورد عملگر انتهایی ربات پیرو با بافت است (نحوه محاسبه آن در بخش 4 شرح داده خواهد شد).

حال الگوریتم تخمین پارامترهای محیط بیان می‌شود. الگوریتم مورد استفاده در این مقاله از خانواده RLS⁴ انتخاب می‌شود. RLS و انواع دیگر آن همگی توانایی همگرا شدن به مقادیر مورد نظر را در زمان کم دارند، اما الگوریتم SPRLS⁵ یکی از انواع این الگوریتم که برای مسئله مطرح‌شده در این مقاله مناسب به نظر می‌رسد [15]. طبق این الگوریتم بازگشتی، اگر Φ بردار متغیرهای ورودی، $\hat{\theta}$ بردار پارامترهای تخمینی، y و $\hat{y}$ به ترتیب خروجی مورد نظر حقیقی و تخمینی و $\hat{e} = y - \hat{y}$ خطای تخمین باشد، رابطه (14) برقرار است.

$$\hat{y} = \hat{\theta}^T \Phi \quad (14)$$

بردار $\hat{\theta}$ نیز از طریق روابط (15) در هر گام زمانی گسسته تخمین زده می‌شود.

$$L_i = P_{i-1} \Phi_i (1 + \Phi_i^T P_{i-1} \Phi_i)^{-1} \quad (15-a)$$

$$P_i = (I - L_i \Phi_i^T) P_{i-1} + \beta \text{NINT}(\gamma \hat{e}_{i-1}^2) I \quad (15-b)$$

$$\hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + L_i (y_i - \Phi_i^T \hat{\theta}_{i-1}) \quad (15-c)$$

که در آن‌ها β یک ثابت طراحی، γ ضریب حساسیت و I ماتریس واحد است و $i = 1, 2, \dots$ منظور از i زمان حال و $i-1$ یک گام زمانی قبل است. عملگر $\text{NINT}(\cdot)$ نیز به‌صورت رابطه (16) تعریف می‌شود.

$$\text{NINT}(x) = \begin{cases} x, x \geq 0.5 \\ 0, 0 \leq x < 0.5 \end{cases} \quad (16)$$

برای تطبیق دادن دو مدل کلون-وویت و هانت-کراسلی به الگوریتم SPRLS، باید پارامترهای موجود در رابطه (14) براساس هر مدل مشخص شوند؛ به عبارت دیگر، باید هر مدل پیشنهادی را نسبت پارامترهای ورودی آن خطی‌سازی کرد. برای مدل کلون-وویت به دلیل خطی‌بودن مدل به‌راحتی می‌توان روابط (17) را به‌دست آورد.

$$y_{kv} = F_e \quad (17-a)$$

$$\Phi_{kv} = [\delta x \quad \dot{x}]^T \quad (17-b)$$

$$\hat{\theta}_{kv} = [K_{kv} \quad B_{kv}]^T \quad (17-c)$$

با توجه به غیرخطی‌بودن مدل برای مدل هانت-کراسلی نمی‌توان به‌راحتی آن را با رابطه (14) تطبیق داد، لذا جهت انجام فرآیند تخمین مدل هانت-کراسلی راه‌کارهایی پیشنهاد شده است.

در [16] نویسندگان روشی دوماه‌ای جهت تخمین پارامترهای مدل

$$F_e = \begin{cases} K_{kv} \delta x_s + B_{kv} \dot{x}_s, \delta x_s > 0 \wedge \dot{x}_s \geq 0 \\ K_{kv} \delta x_s, \delta x_s \geq 0 \wedge \dot{x}_s < 0 \\ 0, \text{ در غیر این صورت} \end{cases} \quad (9)$$

برای بافت نرم از مدل هانت-کراسلی¹ استفاده می‌شود که رابطه اصلی آن به‌صورت رابطه (10) بیان می‌شود.

$$F_e = \begin{cases} K_{hc} \delta x_s^{n_{hc}} + B_{hc} \delta x_s^{n_{hc}} \dot{x}_s, \delta x_s \geq 0 \\ 0, \delta x_s < 0 \end{cases} \quad (10)$$

که در آن K_{hc} و B_{hc} به ترتیب ضریب فنریت و ضریب استهلاک هستند. توان n_{hc} نیز معرف هندسه و جنس تماس است که تأثیر خود را روی تغییر فنریت و استهلاک می‌گذارد. این سه پارامتر نیز پارامترهای بافت نرم را تشکیل می‌دهند.

مدل هانت-کراسلی نیز مانند مدل کلون-وویت در [3] به‌صورت رابطه (11) اصلاح شده است.

$$F_e = \begin{cases} K_{hc} \delta x_s^{n_{hc}} + B_{hc} \delta x_s^{n_{hc}} \dot{x}_s, \delta x_s \geq 0 \wedge \dot{x}_s \geq 0 \\ K_{hc} \delta x_s^{n_{hc}}, \delta x_s \geq 0 \wedge \dot{x}_s < 0 \\ 0, \delta x_s < 0 \end{cases} \quad (11)$$

5-2- کانال‌های ارتباطی

برای شبیه‌سازی برقراری ارتباط بین راهبر و پیرو، در نظر گرفتن کانال‌های ارتباطی مناسب امری ضروری است. در این مقاله کانال‌های ارتباطی راهبر به پیرو و بالعکس مشابه یکدیگر و با تأخیر زمانی ثابت τ در نظر گرفته می‌شوند، همچنین در این مقاله از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی² در نظر گرفته نشده است. شمایی ساده‌شده از کانال‌های ارتباطی مورد نظر در شکل 3 نمایش داده شده است.

در این مقاله از بالانویس d برای نمایش سیگنال تأخیر یافته از راهبر به پیرو و از بالانویس D برای نمایش سیگنال تأخیر یافته از پیرو به راهبر استفاده شده است.

3- تخمین پارامترهای محیط

رویکرد این مقاله مدل میانجی است، یعنی به‌جای استفاده مستقیم از نیروی محیط به‌عنوان فیدبک از پارامترهای تخمین زده شده آن به‌عنوان فیدبک استفاده می‌شود. در نتیجه باید روش مناسبی برای این مهم انتخاب شود. روش کلی مورد استفاده در این مقاله بر پایه دو بخش اساسی است: نخست تعیین مدل بافت که تعیین می‌کند کدامیک از دو مدل (9) و (11) باید برای بافت استفاده شود، و دوم تخمین پارامترهای بافت که این امر پارامترهای فرستاده‌شده به سمت راهبر را مشخص می‌کند.

انتخاب مدل مناسب بافت در هنگام برخورد توسط رویکرد ترکیبی مدل‌سازی جسم³ انجام می‌گیرد [3] که البته در مقاله حاضر ارتقاء یافته و بعد زمان نیز در آن به‌صورت متغیر لحاظ شده است. این رویکرد بدین صورت است که تخمین پارامترها براساس هر دو مدل برای بافت انجام می‌شود، اما در نخستین لحظه برخورد، مدل کلون-وویت (مربوط به بافت سخت) برای بافت در نظر گرفته می‌شود؛ پس از گذشت مدت زمان مشخص t_{th} از نخستین لحظه برخورد، همگرایی مدل کلون-وویت نشان‌دهنده نوع مدل صحیح برای بافت خواهد بود. اگر مقدار تخمین زده‌شده برای K_{kv} کمتر از مقدار مشخص K_{th} بود، مدل انتخابی به مدل هانت-کراسلی تغییر پیدا می‌کند. در غیر این صورت همان مدل کلون-وویت برای زمان‌های بعد از t_{th} استفاده می‌شود. این تعویض مدل بین کلون-وویت (kv) و هانت-کراسلی (hc) با عملگر $S(\cdot, \cdot)$

¹ Hunt-Crossley

² Packet loss

³ Hybrid object modeling approach

⁴ Recursive Least Squares

⁵ Self-Perturbing Recursive Least Squares

است. یکی از متداول‌ترین رویکردها براساس [5] انجام شده است، که موقعیت محیط مجازی به‌عنوان یکی از پارامترهای محیط در نظر گرفته شده و همراه سایر پارامترهای محیط توسط الگوریتم‌های تخمین (مانند بخش 3) تعیین می‌شود. مدل محیط برای استفاده از این روش به‌ناچار باید تا حد امکان ساده در نظر گرفته شود. در غیر این صورت عبارات شامل سرعت یا توان‌های غیرواحد موقعیت وارد رابطه ریاضی مدل محیط شده و تطبیق عبارت با الگوریتم‌های تخمین را دشوار می‌سازد. برای نمونه در [5] محیط به‌صورت یک فتر خطی مدل شده که با توجه به بخش 2-4 می‌توان ادعان داشت که مدل دقیقی نیست.

یکی دیگر از راه‌کارهای پیشنهادی بر این اساس است که موقعیت محیط مجازی در هنگام برخورد برابر با موقعیت کنونی ربات راهبر قرار داده می‌شود (که به دلیل وجود تأخیر زمانی با موقعیت محیط حقیقی برابر نیست). در ادامه محیط مجازی همراه با ربات راهبر به عقب حرکت می‌کند تا به موقعیت مطلوب برسد. در این روش که در [19] پیشنهاد شده و در [10] نیز با تغییراتی پیاده‌سازی شده است مانند روش پیشین از یک مدل ساده برای مدل‌سازی محیط در سمت راهبر استفاده می‌شود. همچنین محیط مجازی در این رویکرد با تأخیر زمانی بیشتر از تأخیر زمانی موجود در کانال‌های ارتباطی در موقعیت واقعی خود قرار می‌گیرد.

روش‌های جدیدتری نیز در این زمینه مطرح شده‌اند که مبتنی بر استفاده از سنسورهای اضافی در سمت پیرو مانند سنسورهای مجاور یا ویزن است. نمونه‌ای از این روش‌ها را می‌توان در [9] مشاهده کرد. با استفاده از این روش‌ها می‌توان برخورد را پیش از وقوع پیش‌بینی و موقعیت محیط مجازی را تعیین کرد، اما به‌رحال استفاده از سنسورهای اضافی چالش‌های جدیدی را به سیستم افزوده است و همچنین هزینه اقتصادی در پی خواهد داشت.

رویکرد و نوآوری اصلی مقاله کنونی این است که بدون نیاز به سنسورهای اضافی با توانایی در نظر گرفتن مدل‌های دقیق و پیچیده برای محیط با الگوریتمی ساده و بدون تحمیل محاسبات سنگین به سیستم بتوان موقعیت محیط مجازی را در سمت راهبر با دقت بالایی تعیین کرد. این رویکرد سبب می‌شود شفافیت سیستم و به تبع آن حس هپتیکی کاربر بدون تضعیف قابلیت‌های سیستم و بی‌نیاز از انجام فرض‌های ساده‌ساز به میزان قابل توجهی افزایش یابد.

روش پیشنهادی این مقاله در قالب یک الگوریتم ساده قابل بیان است که به‌صورت رابطه (21) تعریف می‌شود. در این الگوریتم زمان نخستین برخورد ربات پیرو با محیط نیز هم‌زمان با محل قرارگیری محیط مجازی تعیین می‌شود.

$$X_{0,j} = \begin{cases} [x_{s,j-1} & t_{j-1}]^T, |F_{e,j}| > F_{th} \wedge |F_{e,j-1}| \leq F_{th} \\ X_{0,j-1}, |F_{e,j}| > F_{th} \wedge |F_{e,j-1}| > F_{th} \\ [A & t_j]^T, \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (21)$$

در رابطه بالا منظور از زیرنویس j زمان حال و $j-1$ یک گام زمانی قبل است و X_0 برداری است که به‌صورت رابطه (22) تعریف می‌شود. F_{th} یک حاشیه نیرو است که جهت جبران نویزهای محیطی به کار رفته است و می‌توان مقدار آن را برابر بیشینه نویز قرار داد. A نیز یک عدد ثابت است که به اندازه کافی بزرگ و خارج از فضای کاری ربات‌ها انتخاب می‌شود.

$$X_0 = [x_{0,m} \quad t_0]^T \quad (22)$$

در رابطه (22) $x_{0,m}$ موقعیت محیط مجازی و t_0 زمان نخستین برخورد عملگر انتهایی ربات پیرو با محیط است. توجه شود که رابطه (21) باید در پیرو مورد

هانت-کراسلی ارائه کرده‌اند، بدین صورت که در مرحله نخست با فرض n مشخص برای K_{hc} و B_{hc} مدل را با رابطه (14) وفق داده و فرآیند تخمین را انجام می‌دهند. سپس در مرحله دوم با فرض K_{hc} و B_{hc} مشخص مدل را برای n خطی‌سازی کرده و فرآیند تخمین را تکرار می‌کنند.

حدادی و هشتودی‌زاد در [17] روشی دیگر را جهت خطی‌سازی مدل هانت-کراسلی پیشنهاد کرده‌اند. در این روش با گرفتن لگاریتم طبیعی از عبارت ریاضی مدل هانت-کراسلی، یک عبارت خطی تطبیق یافته با رابطه (14) به دست می‌آید که به‌راحتی می‌توان در الگوریتم‌های تخمین از آن استفاده کرد. پارامترهای مدل هانت-کراسلی نیز به‌سادگی از آن قابل استخراج است.

رویکردی نوین که در [18] پیشنهاد شده براساس خطی‌سازی مستقیم عبارت ریاضی مدل هانت-کراسلی است که به آن خطی‌سازی چندجمله‌ای گفته می‌شود. در این روش که نسبت به روش‌های پیشین دقیق‌تر و مقاوم‌تر است، ابتدا عبارت $\delta x_s^{n_{hc}}$ (رابطه (11)) براساس بسط تیلور مرتبه دوم حول مرکز فضای کاری ربات به‌صورت رابطه (18) بازنویسی می‌شود.

$$(\delta x)^n \approx v_0 + v_1 \delta x + v_2 (\delta x)^2 \quad (18)$$

که در آن v_0, v_1, v_2 ضرایبی هستند که از مرتب‌سازی بسط تیلور به‌صورت رابطه بالا به دست می‌آیند. حال می‌توان قسمت اول رابطه (11) را به‌صورت رابطه (19) نوشت.

$$F_e = K_{hc}(v_1 \delta x + v_2 (\delta x)^2) + B_{hc}(v_1 \delta x + v_2 (\delta x)^2) \dot{x} \quad (19)$$

برای $v_0 = 0$ به‌دست آوردن این رابطه قرار داده شده است. حال به‌سادگی می‌توان رابطه (19) را در قالب رابطه (14) خطی‌سازی کرد، که نتیجه به‌صورت روابط (20) خواهد شد.

$$y_{hc} = F_e \quad (20-a)$$

$$\Phi_{hc} = [(\delta x)^2 \quad \delta x \quad (\delta x)^2 \dot{x} \quad (\delta x) \dot{x}]^T \quad (20-b)$$

$$\Theta_{hc} = [K_{hc} v_2 \quad K_{hc} v_1 \quad B_{hc} v_2 \quad B_{hc} v_1]^T \quad (20-c)$$

نکته مهم در استفاده از روش خطی‌سازی چندجمله‌ای این است که این روش برخلاف روش‌های پیشین مقادیر پارامترهای بافت را مستقیم به دست نمی‌دهد، بلکه بردار $\hat{\theta}$ را تخمین زده که از طریق آن نیرو در سمت راهبر قابل محاسبه است (بخش 5). البته پارامترهای سیستم هم به‌وسیله روش‌هایی قابل بازیابی است [18]. اما در رویکرد مدل میانجی بردار $\hat{\theta}$ جهت ایجاد محیط مجازی در سمت راهبر کافی است؛ بنابراین نیازی به دسترسی مستقیم به پارامترهای بافت نیست.

نهایت y_s در روابط (20,17) خروجی حقیقی سیستم بوده و خروجی تخمینی از رابطه (14) محاسبه می‌شود. قسمت‌های دوم روابط (11,9) نیز در روابط (20,17) با ضریب استهلاک صفر لحاظ شده و خدشه‌ای به کلیت روابط وارد نمی‌شود.

4- تعیین موقعیت محیط مجازی

پس از تخمین پارامترها و نیروی محیط یا به عبارتی مشخصات محیط لازم است که وضعیت آن نیز در سمت راهبر مشخص شود. این امر تأثیر مستقیم بر شفافیت سیستم دارد، زیرا آن‌چه سبب می‌شود کاربر نیرویی برابر با سمت پیرو را حس کند وجود محیطی مجازی با مشخصات و وضعیت یکسان با محیط واقعی است. در این‌جا منظور از وضعیت محیط همان موقعیت قرارگیری آن است. شکل هندسی، زاویه قرارگیری و مواردی از این دست در پژوهش‌های آینده مورد نظر قرار خواهند گرفت.

تاکنون پژوهش‌هایی در زمینه تعیین موقعیت محیط مجازی انجام شده

محاسبه قرار گرفته و $x_{0,m}$ به سمت راهبر فرستاده شود (در سمت راهبر از افزایش $x_{0,m}^D$ استفاده می‌شود).

در رابطه (21) برخورد شرط نخست است، زیرا در لحظه‌ای صورت می‌گیرد که نیروی F_e وجود دارد، در حالی که لحظه پیش از آن وجود نداشته است. در این حالت موقعیت پیشین پیرو و زمان آن در آخرین لحظه‌ای که F_e وجود نداشته (لحظه $j-1$)، به ترتیب به‌عنوان موقعیت بافت مجازی و زمان برخورد لحاظ می‌شوند. شرط دوم مربوط به سایر لحظات برخورد است، یعنی برخورد ربات پیرو با محیط انجام شده و همچنان حفظ شده است. در این حالت X_0 پیشین باید حفظ شود و تا زمان جدایش ربات پیرو از بافت ثابت بماند. حالت سوم نیز مربوط به حرکت آزاد است. در این وضعیت موقعیت محیط مجازی در بی‌نهایت (معادل با عددی خارج از فضای کاری ربات راهبر) به دلیل عدم وجود هرگونه برخورد لحاظ شده و زمان نیز به‌طور مداوم تا شناسایی برخورد جدید به‌روز رسانی می‌شود. لحظه جدا شدن ربات پیرو از محیط نیز در قالب رابطه سوم قابل پیاده‌سازی بوده و نیاز به شرط جدیدی ندارد.

بحث پرسش مدل تنها مسئله ممکن در هنگام استفاده از الگوریتم (21) است. بدین معنی که ربات پیرو به محیط رسیده اما سمت راهبر به دلیل وجود تأخیر زمانی هنوز از وجود محیط بی‌اطلاع است؛ بنابراین با فرض وجود تأخیر زمانی ثابت τ در سیستم، ربات راهبر در ابتدا تا زمان 2τ در محیط مجازی که هنوز ایجاد نشده نفوذ کرده و سپس محیط مجازی در موقعیت مناسب قرار داده می‌شود (تأخیر زمانی 2τ را می‌توان از تأخیر $x_{0,m}^D$ نسبت به x_m نیز متوجه شد). این امر بسته به‌سختی بافت می‌تواند سبب ایجاد نیروی لحظه‌ای به نسبت زیاد شود که امکان دارد عملکرد سیستم را تحت تأثیر قرار دهد.

برای رفع این مشکل رویکردهایی به‌صورت جابه‌جایی محیط مجازی در لحظات نخستین برخورد ارائه شده است. برای نمونه در [9] از سنسورهای مجاورت جهت شناسایی محیط حقیقی و جابه‌جایی محیط مجازی تا نقطه‌ای مناسب برای حل این مشکل استفاده شده است. در [19] همان‌طور که پیشتر اشاره شد، از جابه‌جایی محیط مجازی به اندازه مسافتی که ربات راهبر در زمان 2τ طی کرده استفاده شده است. اما مشکل این رویکردها این است که شفافیت سیستم را به‌شدت کاهش می‌دهند.

پدیده پرسش مدل (در صورت عدم استفاده از سنسورهای اضافی)، اجتناب‌ناپذیر بوده و حذف کامل آن بدون کاهش شفافیت سیستم ممکن نیست. در این مقاله الگوریتم ارائه‌شده برای تعیین موقعیت محیط مجازی با هدف دسترسی به بیشینه شفافیت ممکن در سیستم است. در بخش 6 میزان پرسش مدل در حضور محیط‌های سخت و نرم در اثر استفاده از این الگوریتم بررسی شده و در پژوهش‌های آینده کاهش پرسش مدل در حضور الگوریتم ارائه‌شده در صورت وجود بررسی خواهد شد.

5- طراحی کنترلر

روش‌های گوناگونی تا کنون برای طراحی کنترلرها در سیستم‌های تله‌پراتوری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای نمونه کنترل امپدانس روشی مناسب برای کنترل راهبر است [20,11]. کنترل مد لغزشی نیز از روش‌هایی است که برای کنترل پیرو می‌تواند استفاده شود [12] که با استفاده از آن هم میل کردن خطا به سمت صفر در زمان محدود (در نتیجه پایداری سیستم) و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در سیستم تضمین می‌شود. ترکیب این دو نوع کنترلر هم در [21] مورد نظر قرار گرفته است. کنترل تطبیقی نیز

می‌تواند در ترکیب با این روش‌ها مورد استفاده گیرد [5].

در سال‌های اخیر نیز روش‌هایی جدید با هدف حفظ پایداری و افزایش شفافیت سیستم در طراحی کنترلرها استفاده شده‌اند. برای نمونه نویسندگان [22] یک کنترلر PID مقاوم با ساختار ثابت پیشنهاد کرده‌اند و شرایط پایداری هر دو سمت راهبر و پیرو را در حضور این نوع کنترلر مورد بررسی قرار داده‌اند.

در این مقاله از کنترلرهای امپدانس و مد لغزشی به ترتیب برای راهبر و پیرو استفاده شده است که در ادامه بررسی خواهند شد.

5-1- طراحی کنترلر برای راهبر

مطابق روش کنترل امپدانس، یک رفتار امپدانس مطلوب به‌عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود که ربات راهبر باید رفتاری مشابه آن را در سیستم اعمال کند. سیستم مرجع به شکل رابطه (23) است.

$$M\ddot{x}_m + B\dot{x}_m + Kx_m = F_h - F_e^D \quad (23)$$

که در آن M ، B و K به ترتیب جرم، ضریب استهلاک و ضریب فنریت سیستم امپدانس مطلوب هستند. در این مقاله از F_e^D به‌عنوان فیدبک نیرو استفاده نمی‌شود و نیروی محیط به‌صورت محلی محاسبه می‌شود. پارامترهای تخمینی محیط به‌طور مداوم به سمت راهبر فرستاده شده و در آن‌جا نیروی تخمینی محیط در اثر برخورد با محیط مجازی محاسبه می‌شود و به‌جای F_e^D در رابطه (23) قرار می‌گیرد. ابتدا با توجه به روابط (14,12) نیروی تخمینی محیط طبق رابطه (24) محاسبه می‌شود،

$$\hat{F}_{e,m} = \begin{cases} \hat{\theta}_{s,kv}^D \Phi_{m,kv}, S(K_{kv}, t) = kv \\ \hat{\theta}_{s,hc}^D \Phi_{m,hc}, S(K_{kv}, t) = hc \end{cases} \quad (24)$$

که زیرنویس m و s به معنی محاسبه پارامتر مربوطه به ترتیب در سمت راهبر و پیرو بوده و $\hat{F}_{e,m}$ بیانگر نیروی تخمینی محیط در سمت راهبر در اثر برخورد با محیط مجازی است. در این رابطه عبارت Φ_m شامل δx_m بوده که باید آن را از رابطه (25) محاسبه کرد.

$$\delta x_m = x_m - x_{0,m}^D \quad (25)$$

محاسبه $x_{0,m}$ با استفاده از رابطه پیشنهادی (21) انجام می‌گیرد.

حال با توجه به رابطه (24) می‌توان رابطه (23) را به‌صورت رابطه (26) اصلاح کرد.

$$M\ddot{x}_m + B\dot{x}_m + Kx_m = F_h - \hat{F}_{e,m} \quad (26)$$

با ترکیب رابطه (26) با دینامیک راهبر (رابطه (3)) و حذف عبارت شتاب می‌توان ورودی کنترلی راهبر را مطابق رابطه (27) به دست آورد.

$$U_m = (b_{t,m} - \frac{m_m}{M}B)\dot{x}_m + (\frac{m_m}{M} - 1)F_h - \frac{m_m}{M}\hat{F}_{e,m} + (k_{t,m} - \frac{m_m}{M}K)x_m \quad (27)$$

5-2- طراحی کنترلر برای پیرو

برای طراحی کنترلر در سمت پیرو، ابتدا باید تعریف مشخصی از خطا ارائه شود. در سیستم‌های تله‌پراتوری خطا به صورت مختلفی ازجمله $e = x_s - x_m^d$ ، $e = x_s - \zeta x_m$ و $e = F_h^d - \zeta \dot{x}_s$ [20,12,11]، در آن‌ها e خطای سیستم و ζ ضریبی است که متناسب با نوع خطا تعریف می‌شود. در این مقاله از تعریف نخست به‌صورت رابطه (28)، استفاده می‌شود.

$$e = x_s - k_p x_m^d \quad (28)$$

k_p ضریب مقیاس و نشان‌دهنده مقیاس حرکتی ربات پیرو نسبت به راهبر است.

$$\ddot{x}_m^d = \frac{1}{M} (F_h^d - F_{e,m}^d - B\dot{x}_m^d - Kx_m^d) \quad (41)$$

6- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی برای سیستم تله‌اپراتوری طراحی شده آورده شده است. دو نوع بافت سخت و نرم برای محیط در نظر گرفته شده است. مدت زمان شبیه‌سازی‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شده که در طی آن پیرو دو بار حرکت رفت و برگشت انجام داده و دو بار با بافت برخورد می‌کند. در فاصله زمانی بین برخوردها نیز حرکت آزاد انجام می‌گیرد.

ربات‌های راهبر و پیرو هر یک می‌توانند از بین ابزارهای هپتیک مناسب انتخاب شوند. در این مقاله مشخصات ربات فانتوم آلمنی^۳ برای راهبر و مشخصات ربات نوینت فالکون^۴ برای پیرو در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای مربوط این ربات‌ها مطابق جدول 1 تعیین شده‌اند.

پارامترهای دینامیکی و نیروی دست انسان مطابق جداول 2 و 3 و مقدار F_{th} در رابطه (21) نیز صفر در نظر گرفته شده است.

همچنین برای عدم قطعیت‌های مورد استفاده در کنترلر مد لغزشی، بازه‌ای برای جرم پیرو به عنوان عدم قطعیت، مطابق رابطه (42) در نظر گرفته شده که اعداد دو سر بازه برحسب kg است. سایر پارامترهای مربوط به کنترلر در جدول 4 آورده شده که به صورت تجربی تعیین شده است.

$$1.058 \leq m_s \leq 1.267 \quad (42)$$

جدول 1 مشخصات دینامیکی ربات‌های راهبر و پیرو

Table 1 Dynamical characteristics of master and slave robots

پارامتر	مقدار [11]	واحد
m_m	0.223	kg
b_m	17.227	Ns/m
k_m	6.286	N/m
M	0.223	kg
B	17.227	Ns/m
K	6.286	N/m
m_s	1.158	kg
b_s	115.40	Ns/m
k_s	31.46	N/m

جدول 2 پارامترهای دینامیکی دست انسان

Table 2 Human hand dynamical parameters

پارامتر	مقدار [13]	واحد
b_a	3.6	Ns/m
k_a	40	N/m

جدول 3 پارامترهای نیروی دست انسان

Table 3 Human hand force parameters

پارامتر	مقدار	واحد
A_h	4.5	N
ω_h	0.1π	rad/s

جدول 4 پارامترهای کنترلر مد لغزشی

Table 4 Sliding-mode controller parameters

پارامتر	مقدار
k_p	1
η	15
λ	1
φ	0.1
K_{gain}	$1.1K_{gain,min}$

³ Phantom Omni

⁴ Novint Falcon

حال به بحث طراحی کنترلر مد لغزشی پرداخته می‌شود. ابتدا رابطه (5) را به صورت رابطه (29) بازنویسی می‌کنیم.

$$\ddot{x}_s = f(x, t) + g(x, t)U_s \quad (29)$$

که در آن f و g به صورت روابط (30) است.

$$f = \frac{1}{m_s} (-b_s \dot{x}_s - k_s x_s - F_e) \quad (30-a)$$

$$g = \frac{1}{m_s} \quad (30-b)$$

و دارای عدم قطعیت هستند، اما محدوده آن‌ها معلوم به صورت روابط (32,31) است.

$$|\hat{f} - f| \leq F \quad (31)$$

$$\alpha^{-1} \leq \frac{g}{\hat{g}} \leq \alpha \quad (32)$$

که در آن‌ها روابط (34,33) را به صورت زیر داریم.

$$\hat{g} = \sqrt{g_{\max} g_{\min}} \quad (33)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{g_{\max}}{g_{\min}}} \quad (34)$$

در این روابط زیرنویس‌های $\max$ و $\min$ به ترتیب به معنی بیشینه و کمینه مقدار پارامتر مورد نظر و $\hat{g}$ و $\hat{f}$ مقادیر تخمینی g و f است.

حال سطح لغزشی s را به صورت رابطه (35) به دست آورده

$$s(x, t) = \dot{e} + \lambda e \quad (35)$$

که λ ثابتی اکیداً مثبت است، و سپس با اعمال شرط $s = \dot{s} = 0$ مقدار تخمینی ورودی کنترلر پیرو را مطابق روابط (36) به دست می‌آوریم.

$$\hat{U}_s = \frac{1}{\hat{g}} \hat{u} \quad (36-a)$$

$$\hat{u} = -\hat{f} + k_p \dot{x}_m^d - \lambda \dot{e} \quad (36-b)$$

برای به دست آوردن ورودی کنترلر حقیقی باید شرط لغزش، $\eta |s| \leq s\dot{s}$ اکیداً مثبت، را اعمال کنیم، می‌توان نشان داد که ورودی کنترلر به صورت رابطه (37) است.

$$U_s = \hat{U}_s - \frac{1}{\hat{g}} k_{\text{gain}} \text{sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right) \quad (37)$$

φ ضخامت لایه مرزی برای کاهش پدیده چترینگ^۱، $\text{sat}(\cdot)$ تابع اشباع^۲ و به صورت رابطه (38) است. در شرط لغزش صدق کرده و در نتیجه طراحی کنترلر را کامل می‌کند.

$$k_{\text{gain}} \geq \alpha(F + \eta) + (\alpha - 1)|\hat{u}| \quad (38)$$

در رابطه (38) سمت راست نامساوی را جهت سهولت به صورت رابطه (39) تعریف می‌کنیم.

$$\alpha(F + \eta) + (\alpha - 1)|\hat{u}| = k_{\text{gain}, \min} \quad (39)$$

در نهایت رابطه (37) را طبق روابط (36,30) و براساس پارامترهای معادله دینامیکی پیرو مطابق رابطه (40) بازنویسی می‌کنیم.

$$U_s = \hat{b}_s \dot{x}_s + \hat{k}_s x_s + \hat{F}_e + \hat{m}_s (k_p \dot{x}_m^d - k_{\text{gain}} \text{sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right) - \lambda \dot{e}) \quad (40)$$

در رابطه بالا صرفاً به عنوان تقریب می‌توان اغتشاش خارجی و نویزهای اندازه‌گیری را به عنوان عدم قطعیت پارامترها وارد کرد، همچنین در رابطه بالا شتاب راهبر دیده می‌شود. در صورتی که نخواهیم یا نتوانیم مستقیم از شتاب راهبر بازخورد بگیریم، می‌توان در رابطه (40) به جای شتاب راهبر از رابطه (26) استفاده کرد که در زیر به صورت رابطه (41) بازنویسی شده است.

¹ Chattering

² Saturation function

جدول 5 پارامترهای دینامیکی و الگوریتم تخمین بافت سخت

Table 5 Dynamical and SPRLS parameters of the hard tissue

واحد	مقدار	پارامتر
N/m	6000	K_{kv}
Ns/m	230	B_{kv}
-	0.1	γ
-	30000	β
-	$[3000 \ 100]^T$	$\hat{\theta}_0$
-	I_2	P_0
-	3	$\hat{e}_0$
s	0.0002	گام زمانی SPRLS
N/m	2500	K_{th}
s	0.1	t_{th}

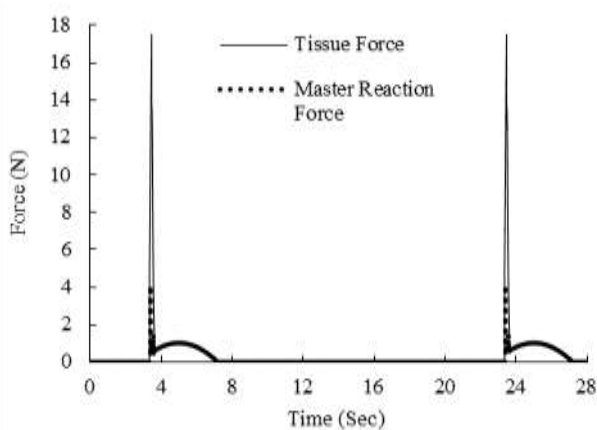


Fig. 4 Force applied by the hard tissue and master reaction force

شکل 4 نیروی وارد شده از بافت سخت و نیروی عکس‌العمل راهبر

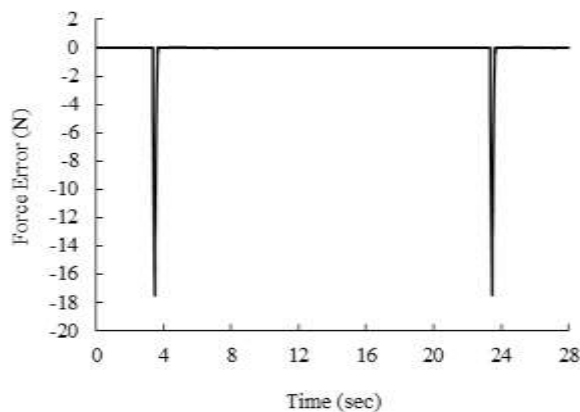


Fig. 5 Force error of the system in interaction with the hard tissue

شکل 5 خطای نیروی سیستم در تعامل با بافت سخت

نتایج به‌دست‌آمده در شکل‌های 10 و 15 مشخص است که پدیده پرش مدل در برخورد با بافت نرم بسیار اندک بوده به‌طوری که قابل صرف‌نظر کردن است؛ بنابراین الگوریتم ارائه‌شده برای تعیین موقعیت محیط مجازی، در تعامل با بافت نرم سبب ایجاد پرش مدل نشده و در تمامی لحظات شفافیت سیستم بسیار بالاست.

سیگنال کنترلی راهبر همان نیروی عکس‌العمل راهبر که در شکل 10 قابل مشاهده است.

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سیستم تله‌پراتوری دوجانبه یک درجه آزادی با استفاده از

موقعیت اولیه ربات پیرو به‌اندازه 0.1 mm عقب‌تر از ربات راهبر در نظر گرفته شده است. منظور از خطای موقعیت سیستم در نتایج به‌دست‌آمده همان خطایی است که در رابطه (28) تعریف شده است، همچنین خطای نیرو نیز شبیه خطای موقعیت مطابق رابطه (43) تعریف می‌شود،

$$\text{Force Error} = U_m^d - k_f F_e \quad (43)$$

که $k_f = 1$ در نظر گرفته می‌شود.

تعیین میزان مناسب تأخیر زمانی τ در سیستم به عوامل گوناگونی از جمله گام زمانی حل الگوریتم تخمین پارامترهای محیط بستگی دارد. تأخیر زمانی زیاد سبب تشدید پدیده پرش مدل شده و نیازمند کاهش گام زمانی حل الگوریتم بازگشتی است. از طرفی کاهش بیش از حد تأخیر زمانی نیز دور از واقعیت سیستم است؛ بنابراین فرآیند شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف τ جهت یافتن مقدار مناسب انجام شده و مقدار مناسب به‌صورت تجربی برابر 60 میلی‌ثانیه تعیین شد و مقادیر سایر پارامترها نیز در ادامه در جداول مربوطه آورده شده است. گرچه با تنظیمات مختلف پارامترها می‌توان مقادیر مختلفی برای τ به دست آورد، اما مقدار تعیین‌شده با توجه به [23] مقدار مناسبی است.

اکنون در ادامه نتایج شبیه‌سازی برای دو بافت سخت و نرم آورده شده است.

1-6- بافت سخت

مشخصات در نظر گرفته‌شده برای بافت سخت به همراه پارامترهای مورد نیاز برای تخمین امپدانس بافت در جدول 5 قابل مشاهده است. منظور از I_2 ماتریس واحد دوبعدی و پارامترهای الگوریتم تخمین به‌صورت تجربی تعیین شده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی با بافت سخت نیز در شکل‌های 4-9 نشان داده شده است. در شکل 8 می‌توان مشاهده کرد که الگوریتم ارائه‌شده به درستی موقعیت بافت مجازی را تعیین می‌کند. در این شکل در لحظات حرکت آزاد، با توجه به این که نیازی به وجود محیط مجازی نیست (که به همین دلیل 1 در رابطه (21) بزرگ در نظر گرفته می‌شود)، مقدار خطا به‌صورت دستی برابر صفر قرار داده شده است.

در شکل 4 ملاحظه می‌شود که پرش مدل در نخستین لحظات برخورد ایجاد شده که تأثیر آن در شکل 9 نیز قابل مشاهده است؛ بنابراین در تعامل با بافت سخت، نیاز است که این پرش مدل کاهش یابد، اما در سایر لحظات به‌جز لحظه نخست برخورد ملاحظه می‌شود که شفافیت سیستم بسیار بالا بوده و موقعیت و نیرو به‌خوبی دنبال می‌شوند.

سیگنال کنترلی راهبر همان نیروی عکس‌العمل راهبر که در شکل 4 قابل مشاهده است.

2-6- بافت نرم

مشخصات در نظر گرفته‌شده برای بافت نرم به همراه پارامترهای مورد نیاز برای تخمین امپدانس بافت در جدول 6 قابل مشاهده است که در آن منظور از I_4 ماتریس واحد چهاربعدی است. پارامترهای الگوریتم تخمین به‌صورت تجربی تعیین شده‌اند.

نتایج حاصل‌شده از شبیه‌سازی با بافت نرم نیز در شکل‌های 10-15 نشان داده شده است. در شکل 14 می‌توان مشاهده کرد که الگوریتم ارائه‌شده به روشنی موقعیت بافت مجازی را تعیین می‌کند. مقدار خطا در حرکت آزاد در این شکل نیز مانند شکل 8 به‌صورت دستی برابر صفر قرار داده شده است. از

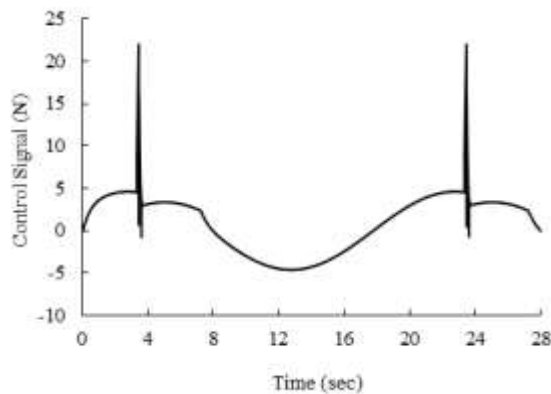


Fig. 9 Slave control signal in interaction with the hard tissue

شکل 9 سیگنال کنترلی پیرو در تعامل با بافت سخت

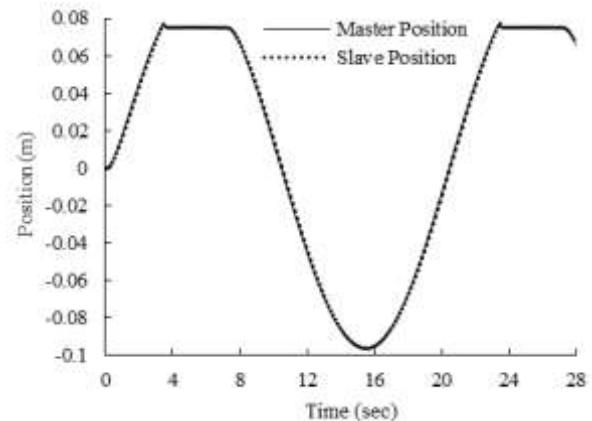


Fig. 6 Master and slave position in interaction with the hard tissue

شکل 6 موقعیت راهبر و پیرو در تعامل با بافت سخت

 جدول 6 پارامترهای دینامیکی و الگوریتم تخمین بافت نرم
 Table 6 Dynamic and SPRLS parameters of the soft tissue

واحد	مقدار	پارامتر
N/m	1000	K_{hc}
Ns/m	30	B_{hc}
-	1.5	n_{hc}
-	19000	γ
-	1	β
-	$[400 \ 400 \ 13 \ 13]^T$	θ_0
-	I_4	P_0
-	2	$\hat{e}_0$
s	0.0002	گام زمانی SPRLS
N/m	2500	K_{th}
s	0.1	t_{th}

تعیین مدل مناسب برای محیط‌های مختلف از جمله فرآیندهایی است که معمولاً سیستم را دچار پیچیدگی می‌کند. در مقاله حاضر مدل‌های مناسب برای بافت‌های سخت و نرم به همراه اصلاحات انجام‌شده روی آن‌ها تعیین شد و از رویکردهای نوین جهت تخمین پارامترهای آن‌ها استفاده شد.

بحث تعیین موقعیت محیط مجازی در سمت راهبر در حضور تأخیر زمانی در سیستم و هم‌زمان با در نظر گرفتن مدل‌های پیچیده‌تر برای بافت‌ها از جمله چالش‌های جدی در رویکرد مدل میانجی است. در این مقاله الگوریتم جدیدی جهت تعیین موقعیت محیط مجازی و زمان نخستین برخورد ربات پیرو با محیط ارائه شد که در با سادگی، ایجاد شفافیت بسیار بالا در سیستم را در حضور تأخیر زمانی بدون ساده‌سازی مدل‌بافت و بدون استفاده از سنسورهای اضافی تضمین می‌کند.

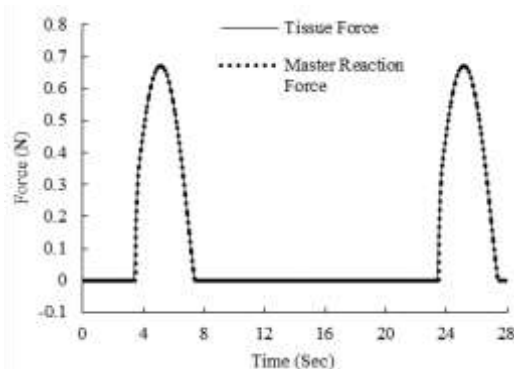


Fig. 10 Force applied by the soft tissue and master reaction force

شکل 10 نیروی واردشده از سوی بافت نرم و نیروی عکس‌العمل راهبر

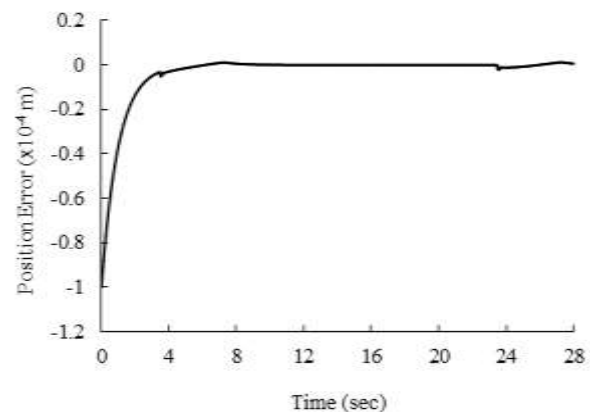


Fig. 7 Position error of the system in interaction with the hard tissue

شکل 7 خطای موقعیت سیستم در تعامل با بافت سخت

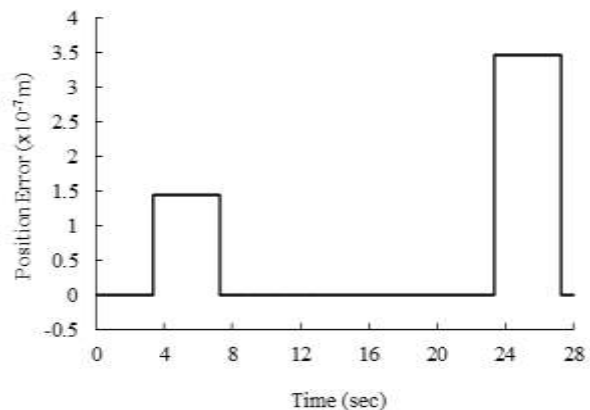


Fig. 8 Position error of the virtual tissue in interaction with the hard tissue (the error is manually set to zero in free motion)

شکل 8 خطای موقعیت بافت مجازی در تعامل با بافت سخت (در حرکت آزاد مقدار خطا به‌صورت دستی برابر صفر قرار داده شده است)

رویکرد مدل میانجی (ایجاد محیط مجازی در سمت راهبر) تحلیل و کنترل شد. طبق این روش به‌جای این‌که مستقیم از نیروی محیط (بافت) فیدبک به سمت راهبر فرستاده شود، امپدانس یا پارامترهای محیط در سمت پیرو تخمین زده شده و به سمت راهبر فرستاده می‌شود. در سمت راهبر یک محیط مجازی از طریق این پارامترهای دریافتی ایجاد و فرض می‌شود که ربات راهبر با این محیط تماس فیزیکی دارد.

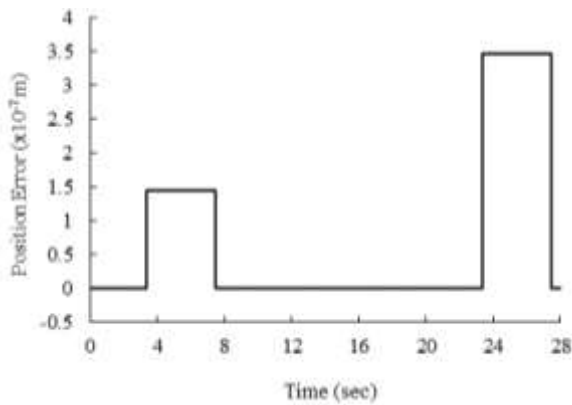


Fig. 14 Position error of the virtual tissue in interaction with the soft tissue (the error is manually set to zero in free motion)

شکل 14 خطای موقعیت بافت مجازی در تعامل با بافت نرم (در حرکت آزاد مقدار خطا به صورت دستی برابر صفر قرار داده شده است)

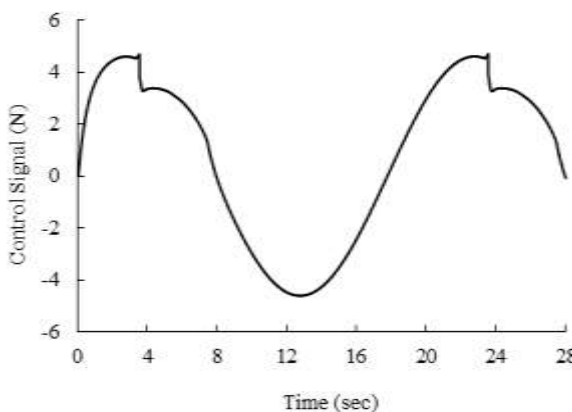


Fig. 15 Slave control signal in interaction with the soft tissue

شکل 15 سیگنال کنترلی پیرو در تعامل با بافت نرم

ایجاد نیرویی به نسبت بالا در سیستم در یک لحظه ایجاد شود، اما عملکرد سیستم در سایر لحظات تعامل با بافت سخت و همچنین در حرکت آزاد بسیار مطلوب است. بحث پرسش مدل در تعامل با بافت نرم بسیار اندک بوده و می‌توان اذعان داشت سیستم در تمامی لحظات بدون مشکل و با شفافیت بسیار بالا عمل می‌کند.

در نظر گرفتن تأخیر متغیر با زمان در کانال‌های ارتباطی هنگام استفاده از الگوریتم ارائه‌شده به همراه کاهش پدیده پرسش مدل در تعامل با بافت سخت (بدون کاهش شفافیت سیستم) از جمله مهم‌ترین مواردی هستند که باید در پژوهش‌های آینده در نظر قرار گیرد.

8- مراجع

- [1] P. F. Hokayem, M. W. Spong, Bilateral teleoperation: An historical survey, *Automatica*, Vol. 42, No. 12, pp. 2035-2057, 2006.
- [2] F. Hashemzadeh, M. Tavakoli, Position and force tracking in nonlinear teleoperation systems under varying delays, *Robotica*, Vol. 33, No. 04, pp. 1003-1016, 2015.
- [3] A. Achhammer, C. Weber, A. Peer, M. Buss, Improvement of model-mediated teleoperation using a new hybrid environment estimation technique, *Proceedings of The 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, Alaska, USA, pp. 5358-5363, May 3-8, 2010.
- [4] R. Monfaredi, K. Razi, S. S. Ghydari, S. M. Rezaei, Achieving high transparency in bilateral teleoperation using stiffness observer for passivity control, *Proceedings of The 2006 IEEE/RSJ*

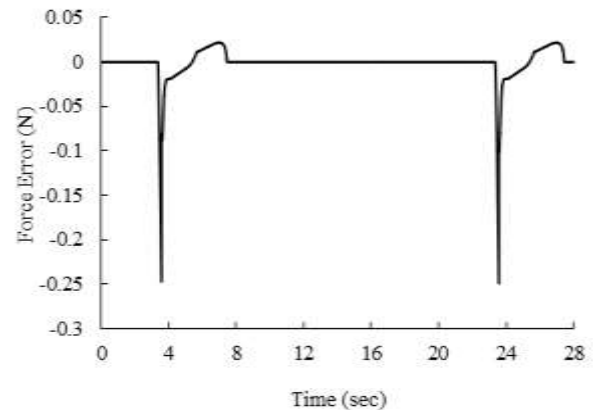


Fig. 11 Force error of the system in interaction with the soft tissue

شکل 11 خطای نیروی سیستم در تعامل با بافت نرم

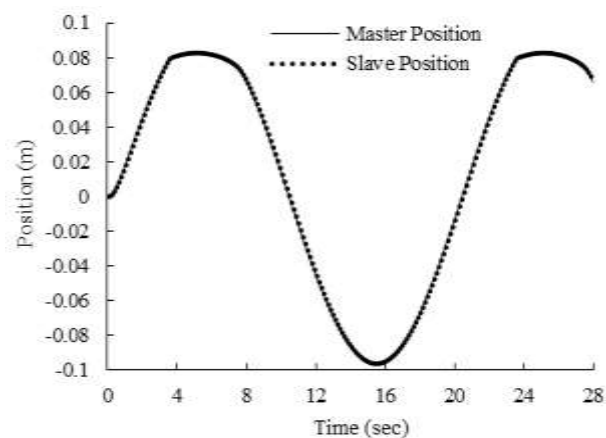


Fig. 12 Master and slave position in interaction with the soft tissue

شکل 12 موقعیت راهبر و پیرو در تعامل با بافت نرم

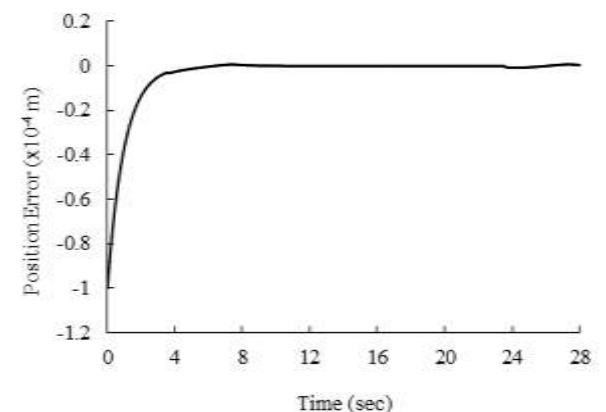


Fig. 13 Position error of the system in interaction with the soft tissue

شکل 13 خطای موقعیت سیستم در تعامل با بافت نرم

در نهایت جهت کنترل سیستم از کنترلر امپدانس در سمت راهبر و از کنترلر مد لغزشی در سمت پیرو استفاده شد. عدم قطعیت‌های سیستم در سمت پیرو در کنترلر مد لغزشی نیز مورد نظر قرار گرفت.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی در حضور دو نوع بافت مختلف سخت و نرم نشان داد که در تعامل با هر دو نوع بافت شفافیت سیستم بسیار بالاست. پرسش مدل در لحظه اول برخورد در تعامل با بافت سخت رخ می‌دهد که سبب

- [13] J. E. Speich, L. Shao, M. Goldfarb, Modeling the human hand as it interacts with a telemanipulation system, *Mechatronics*, Vol. 15, No. 9, pp. 1127-1142, 2005.
- [14] V. Pasandi, M. Naraghi, S. M. Rezaei, M. Zareinejad, K. Baghestan, Design of A Nonlinear Bilateral Teleoperation System coupled with non-passive Environments, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 387-386, 2016. (in Persian فارسی)
- [15] D.-J. Park, B.-E. Jun, Selfperturbing recursive least squares algorithm with fast tracking capability, *Electronics Letters*, Vol. 28, No. 6, pp. 558-559, 1992.
- [16] N. Diolaiti, C. Melchiorri, S. Stramigioli, Contact impedance estimation for robotic systems, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 5, pp. 925-935, 2005.
- [17] A. Haddadi, K. Hashttrudi-Zaad, Real-time identification of Hunt-Crossley dynamic models of contact environments, *IEEE transactions on robotics*, Vol. 28, No. 3, pp. 555-566, 2012.
- [18] R. Schindeler, K. Hashttrudi-Zaad, Polynomial linearization for real-time identification of environment Hunt-Crossley models, *Proceedings of The 2016 IEEE Haptics Symposium*, Pennsylvania, USA, pp. 173-178, April 8-11, 2016.
- [19] P. Mitra, G. Niemeyer, Model-mediated telemanipulation, *Robotics Research*, Vol. 27, No. 2, pp. 253-262, 2008.
- [20] M. S. Sadeghi, H. R. Momeni, R. Amirifar, h_∞ and l_1 Control of a Teleoperation System via LMIs, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 206, No. 2, pp. 669-677, 2008.
- [21] H. C. Cho, J. H. Park, K. Kim, J.-O. Park, Sliding-mode-based impedance controller for bilateral teleoperation under varying time-delay, *Proceedings of The 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, Korea, pp. 1025-1030, May 21-26, 2001.
- [22] A. Alfi, A. Bakhshi, M. Yousefi, H. A. Talebi, Design and implementation of robust-fixed structure controller for telerobotic systems, *Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 83, No. 2, pp. 1-17, 2016.
- [23] K. C. Walker, Y.-J. Pan, J. Gu, Bilateral teleoperation over networks based on stochastic switching approach, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, Vol. 14, No. 5, pp. 539-554, 2009.
- International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, pp. 1686-1691, October 9-15, 2006.
- [5] C. Tzafestas, S. Velanas, G. Fakiridis, Adaptive impedance control in haptic teleoperation to improve transparency under time-delay, *Proceedings of The 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, pp. 212-219, May 19-23, 2008.
- [6] C. Weber, V. Nitsch, U. Unterhinninghofen, B. Farber, M. Buss, Position and force augmentation in a telepresence system and their effects on perceived realism, *Proceedings of The Third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, Salt Lake City, UT, USA, pp. 226-231, March 18-20, 2009.
- [7] I. Aliaga, A. Rubio, E. Sanchez, Experimental quantitative comparison of different control architectures for master-slave teleoperation, *IEEE transactions on control systems technology*, Vol. 12, No. 1, pp. 2-11, 2004.
- [8] X. Xu, B. Cizmeci, C. Schuwerk, E. Steinbach, Model-mediated teleoperation: toward stable and transparent teleoperation systems, *IEEE Access*, Vol. 4, pp. 425-449, 2016.
- [9] X. Xu, G. Paggetti, E. Steinbach, Dynamic model displacement for model-mediated teleoperation, *Proceedings of The 2013 IEEE World Haptics Conference*, Daejeon, Korea, pp. 313-318, April 14-18, 2013.
- [10] B. Willaert, H. Van Brussel, G. Niemeyer, Stability of model-mediated teleoperation: discussion and experiments, *Proceedings of The International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, Tampere, Finland, pp. 625-636, June 13-15, 2012.
- [11] T. Hilliard, Y.-J. Pan, Stabilization of asymmetric bilateral teleoperation systems for haptic devices with time-varying delays, *Proceedings of The 2013 American Control Conference*, Washington, DC, USA, pp. 4538-4543, June 17-19, 2013.
- [12] J. H. Park, H. C. Cho, Sliding mode control of bilateral teleoperation systems with force-reflection on the internet, *Proceedings of The 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, Japan, pp. 1187-1192, October 30-November 5, 2000.