



تحلیل و طراحی سیستم تله‌اپراتوری دوجانبه غیر خطی در تماس با محیط غیر منفعل

ونوس پسندی¹، مهیار نراقی²، سید مهدی رضاعی³، محمد زارعی‌نژاد⁴، کیوان باغستان⁵

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

5- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، کد پستی 1591633311، mzare@aut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 دی 1394

پذیرش: 14 اردیبهشت 1395

ارائه در سایت: 23 تیر 1395

کلیدواژگان:

سیستم تله‌اپراتوری دوجانبه

محیط غیرمنفعل

تکنیک انفعال محور

پایداری

کنترلر تناسبی - مشتقی

فراهم آوردن شفافیت هرچه بیشتر به همراه تامین پایداری ابتدایی‌ترین اهداف سیستم‌های تله‌اپراتوری دوجانبه محسوب می‌شود. تاکنون برای طراحی این سیستم‌ها، روش‌های مختلفی ارائه شده است که در این بین، تکنیک انفعال محور به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در این تکنیک، محیط و اپراتور دو سیستم منفعل در نظر گرفته می‌شوند. منفعل در نظر گرفتن اپراتور چندان دور از واقعیت نیست زیرا اپراتور باعث ناپایداری سیستم حلقه بسته نشده و علاوه بر آن در برابر اعمال نیروهای خارجی به صورت منفعل عمل می‌کند. اما با توجه به برخی از کاربردهای جدید سیستم‌های تله‌اپراتوری مانند جراحی قلب، توانبخشی و غیره، فرض منفعل بودن محیط به هیچ وجه قابل قبول نخواهد بود. در این مقاله طراحی سیستم تله‌اپراتوری غیرخطی دوجانبه در تعامل با محیط‌های غیرمنفعل مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، ابتدا معیاری برای سنجش میزان فعال بودن محیط ارائه شده است. سپس یک کنترلر تناسبی - مشتقی توسعه یافته برای تامین هماهنگی موقعیت‌ها و بازتاب نیرو معرفی گردیده است. در ادامه، پایداری سیستم حلقه بسته با کمک روش لیاپانوف اثبات شده است. پس از آن، شبیه سازی‌هایی برای بررسی عملکرد سیستم تله‌اپراتوری پیشنهاد شده در تعامل با محیط‌های منفعل و غیرمنفعل انجام گرفته است. در نهایت آزمایش‌های عملی برای صحت‌گذاری نتایج تئوری آورده شده است.

Design of a nonlinear bilateral teleoperation system coupled with non-passive environments

Venus Pasandi, Mahyar Naraghi, Seyed Mehdi Rezaei, Mohammad Zareinejad*, Keyvan Baghestan

New Technology Research Center, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1591633311 Tehran, Iran, mzare@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 January 2016
Accepted 03 May 2016
Available Online 13 July 2016

Keywords:
Bilateral Teleoperation
Active Environment
Passivity, Stability
Proportional-Derivative (PD) control

ABSTRACT

Stability and transparency are both very important conditions in bilateral teleoperation systems. For the design of such systems, different methods have been suggested. Among the approaches presented, passivity framework is widely utilized in which human and environment is considered passive. The operator does not make the closed-loop system unstable. In addition, it is passive against an external input. Thus the adoption of this assumption is correct for the human. Nevertheless it is a conservative presumption for the environment and according to some modern applications of teleoperation systems such as cardiac surgery, it is absolutely not acceptable. In this paper a novel control structure for nonlinear bilateral teleoperation systems interacting with active environments is addressed. In this approach, first a criterion for measuring activity of the environment is presented. Then by developing a PD controller, an algorithm that guarantees master-slave position coordination and static force reflection is introduced. The overall stability of closed loop system is proved using passivity concept and Lyapunov-Krasovskii technique. Simulations are performed to verify the performance of the proposed bilateral teleoperation systems in contact with passive and non-passive environments. Experimental results were carried out to validate the theoretical consequences.

1- مقدمه

حرکت‌های راهبر را دنبال کند. در ضمن، کنترلر راهبر وظیفه دارد نیروی وارد شده از طرف محیط به پیرو را به دست اپراتور انتقال دهد که این سیستم، سیستم تله‌اپراتوری دوجانبه نامیده می‌شود [1,2]. تاکنون روش‌های مختلفی برای طراحی سیستم‌های تله‌اپراتوری ارائه شده است. در این بین، تکنیک‌های انفعال محور به دو علت، توجه اغلب

یک سیستم تله‌اپراتوری از سه بخش اصلی تشکیل شده است: اپراتور، محیط و تله‌اپراتور که تله‌اپراتور شامل ربات‌های راهبر و پیرو، کنترلرهای آن‌ها و کانال‌های ارتباطی است (شکل 1). راهبر در اختیار اپراتور قرار دارد درحالی‌که، پیرو در محیط قرار گرفته و سعی می‌کند با دریافت سیگنال‌های کنترلی،

Please cite this article using:

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. 378-386, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

در نتیجه، نیروهای وارد شده با سرعت ربات در یک جهت بوده و این نیروها به عنوان منبع فعال انرژی عمل می‌کنند. در کاربردهای میکرو، نیروهای کشش سطح مهمترین نیروهای وارد شده از طرف محیط به پیرو هستند. نیروهای کشش سطح شامل نیروهای مویینگی در محیط‌های مرطوب و نیروهای الکترواستاتیک در محیط‌های خشک می‌شود که حضور این نیروها باعث فعال شدن محیط می‌شود [18]. علاوه بر آن، در برخی از کاربردهای معمول سیستم‌های تله‌اپراتوری، محیط یک سیستم دینامیکی به همراه ورودی‌های خارجی است. به عنوان مثال، به هنگام جابه‌جا کردن یک جسم، محیط یک سیستم خطی نامتغیر با زمان به همراه نیروی گرانش زمین (به عنوان ورودی خارجی) است. در چنین سیستم‌هایی محیط می‌تواند در بازه‌هایی از زمان به تله‌اپراتور انرژی تزریق کند. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که فرض منفعل بودن محیط، در حالت کلی، فرض قابل قبولی نیست.

برخلاف سیستم‌های تله‌اپراتوری، تعامل با محیط‌های غیرمنفعل در سیستم‌های لمسی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [19-21]. البته محیط‌های سیستم‌های تله‌اپراتوری و سیستم‌های لمسی اساساً متفاوت هستند. زیرا سیستم‌های تله‌اپراتوری با محیط‌های پیوسته کار می‌کنند در حالی که در سیستم‌های لمسی محیط گسسته است. در حقیقت، منفعل بودن محیط در سیستم‌های تله‌اپراتوری، ویژگی فیزیکی این محیط‌هاست ولی در سیستم‌های لمسی، به علت عملیات ریاضی (عملیات گسسته‌سازی) ایجاد می‌شود.

حدادی و هستروودی‌زاد الگوریتمی برای یافتن دسته محیط‌هایی که به ازای آن‌ها سیستم حلقه بسته پایدار است و یا به عکس تعیین پارامترهای کنترلی که می‌تواند دسته محیط‌های مورد نظر را پایدار کند ارائه می‌دهند. این الگوریتم با فرض منفعل بودن کاربر و خطی بودن معادلات دینامیکی محیط و ربات‌های راهبر و پیرو بدست آمده است [22]. پولوشین و همکارانش عنوان کرده‌اند با توجه به غیرمنفعل بودن محیط در سیستم‌های تله‌اپراتوری مشارکتی برای طراحی این سیستم‌ها نمی‌توان از تکنیک‌های انفعال محور استفاده نمود [23]. آن‌ها با استفاده از روش بهره کوچک توسعه داده شده برای سیستم‌های چند کاناله [24]، یک ساختار کنترلی برای تضمین پایداری و شفافیت سیستم تله‌اپراتوری مشارکتی غیرخطی ارائه داده‌اند. در این روش دینامیک کاربر در نظر گرفته نشده است. ضمن آن که تنها ثابت می‌شود که با به کارگیری این روش‌ها، سیستم پایدار ورودی به خروجی خواهد بود. اما، تضمینی برای پایداری متغیرهای حالت سیستم وجود ندارد. علاوه بر آن، تضمین نمی‌شود قانون کنترلی در نظر گرفته شده در این روش هماهنگی موقعیت‌ها و نیروها را نیز تامین می‌کند.

در نهایت، این مسأله که اگر در سیستم‌های تله‌اپراتوری محیط غیرمنفعل باشد چه خواهد شد، نکته‌ای بسیار مهم و حائز اهمیت است. در این مقاله به بررسی این موضوع پرداخته شده و سعی شده است راه‌حلی مناسب برای آن ارائه شود. بدین منظور ابتدا مفاهیم مورد نیاز از سیستم‌های منفعل و غیرمنفعل معرفی شده است. در ادامه، در اولین گام، معیاری برای سنجش میزان فعال بودن محیط ارائه گردیده و پس از آن یک سیستم کنترلی برای تضمین پایداری و فراهم آوردن شفافیت پیشنهاد شده است.

2- تکنیک انفعال محور

منفعل بودن مفهومی بر مبنای انرژی ورودی و خروجی سیستم‌هاست بدین معنا که این روش تنها بر نحوه تغییرات انرژی سیستم‌ها تمرکز دارد. لذا یک سیستم پیچیده به تعدادی زیرسیستم ساده تقسیم شده و تبادل انرژی

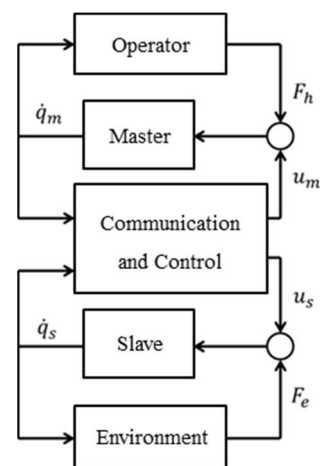


Fig. 1 Block Diagram of a teleoperation system

شکل 1 بلوک دیاگرام یک سیستم تله‌اپراتوری

محققان را به خود جلب کرده است؛ اول آن که در این تکنیک نحوه تبادل انرژی بین زیرسیستم‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. دوم آن که این تکنیک یک روش انرژی محور بوده و بر ورودی و خروجی انرژی سیستم تمرکز دارد. در نتیجه، در این تکنیک نیازی به مدل دینامیکی دقیق سیستم نبوده و تنها اطلاعاتی درباره نحوه تبادل انرژی کفایت می‌کند [3]. این ویژگی برای طراحی سیستم‌های تله‌اپراتوری بسیار ارزشمند است زیرا رفتار اپراتور و محیط غیرقابل پیش‌بینی بوده و ارائه یک مدل دینامیکی برای این دو سیستم بسیار دشوار خواهد بود [4].

اگرچه در برخی از تحقیقات گذشته، اپراتور به صورت یک سیستم خطی نامتغیر با زمان در نظر گرفته شده ولی هم‌چنان مدل دقیقی از رفتار دینامیکی اپراتور ارائه نشده است [6,5]. لذا در تمامی کنترلرهای انفعال محوری که تاکنون برای سیستم‌های تله‌اپراتوری پیشنهاد شده، اپراتور و محیط سیستم‌هایی منفعل در نظر گرفته شده‌اند [7-12].

شایان ذکر است که تکنیک‌های انفعال محور محافظه‌کارانه بوده و باعث کاهش شفافیت سیستم می‌شود [13]. از این رو، هانافورد و همکارانش در تحقیقی، الگوریتم کنترلی انفعال محور جدیدی ارائه کرده‌اند که ادعا می‌شود ضمن حفظ پایداری سیستم، کمترین میزان افت شفافیت را خواهد داشت [14].

اپراتور باعث ناپایداری سیستم حلقه بسته نشده و علاوه بر آن نشان داده می‌شود که در مقابل اعمال نیروی خارجی رفتاری منفعل از خود نشان می‌دهد. بنابراین فرض منفعل بودن اپراتور چندان دور از ذهن نیست. اما، فرض منفعل بودن محیط، فرضی محافظه‌کارانه و غیر قابل قبول است. در حقیقت، منفعل بودن یک سیستم بدین معنا است که ورودی انرژی به آن غیر منفی است [15]. اگرچه در بسیاری از کاربردهای امروزی سیستم‌های تله‌اپراتوری مانند جراحی قلب، توانبخشی، عملیات‌های زیر آب، ربات‌های همکار و عملیات در مقیاس میکرو و نانو محیط منفعل نبوده و می‌تواند انرژی تولید کند. در سیستم‌های تله‌اپراتوری مشارکتی، دو یا چند جفت راهبر و پیرو عملیاتی را در یک محیط مشترک انجام می‌دهند. در این حالت، هریک از ربات‌ها به عنوان منبع فعال انرژی برای سایر ربات‌ها محسوب شده و تعامل بین ربات‌های پیرو غیرمنفعل خواهد بود [16,17]. در کاربردهای نانو، پیرو با اجسامی در ابعاد نانو کار می‌کند. در این محیط‌ها، زمانی که ربات سعی می‌کند به سطح جسم نزدیک شود، نیروهای واندروالس ربات را جذب می‌کنند.

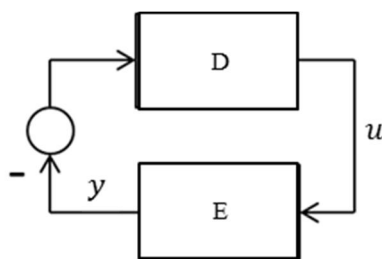


Fig. 2 Coupled systems

شکل 2 تعامل حلقه بسته دو سیستم دینامیکی

3- محیط‌های غیرمنفعل

یک محیط در حالت کلی یک سیستم دینامیکی است که نیروی آن می‌تواند تابعی غیرخطی از موقعیت و سرعت پیرو به صورت رابطه (8) در نظر گرفته شود [27].

$$f_e = \psi(x(t), v(t)) = \psi(x(t), \dot{x}(t)) \quad (8)$$

که f_e نیروی محیط بوده و تابع غیرخطی ψ شرایط 1 تا 3 را ارضا می‌کند: شرط 1) تابع غیرخطی ψ قطعه قطعه پیوسته است.

شرط 2) تابع غیرخطی ψ در نامساوی رابطه (9) صدق می‌کند.

$$\inf_x \int_0^x \psi(\xi, 0) d\xi > -\infty \quad (9)$$

شرط 3) ثابت مثبتی مانند β وجود دارد بطوری که رابطه (10) برقرار است.

$$\beta = \sup_{v \neq 0} \frac{\psi(x, 0) - \psi(x, v)}{v} \quad (10)$$

که β بیانی از ضریب استهلاک محیط است.

این سه شرط به هیچ‌وجه محدودکننده نیستند. زیرا، اولاً تقریباً تمام محیط‌های معمول قطعه قطعه پیوسته هستند. دوماً، قید دوم حد پایینی برای انرژی پتانسیل سیستم قرار می‌دهد که واضح است شرط محدودکننده‌ای نخواهد بود. سوماً، شرط آخر بیان می‌کند که مقدار نیروی تولید شده بر اثر تغییر سرعت پیرو به ازای مقدار تغییر سرعت، بایستی محدود باشد. لذا طبق این قید، تغییر کوچکی در اندازه سرعت پیرو نمی‌تواند باعث ایجاد نیروی بی‌نهایت گردد که شرط کاملاً منطقی است. اما محیط معرفی شده در قالب این سه شرط یک محیط غیرمنفعل است که با یک بازخورد مثبت مناسب یک سیستم منفعل ایجاد می‌کند.

برای بررسی انفعال‌پذیری یک سیستم دینامیکی ابتدا بایستی ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم معرفی شوند. در دینامیک معرفی شده برای محیط در این پژوهش، تابع غیرخطی ψ نگاهی از موقعیت و سرعت پیرو به نیروی محیط است. بنابراین نیروی محیط خروجی این سیستم و موقعیت و سرعت پیرو ورودی‌های آن است. برای بررسی انفعال‌پذیری سیستم بایستی سیگنال‌های نیرو و سرعت به عنوان ورودی و خروجی انتخاب شوند.

تئوری 1) اگر یک سیستم دینامیکی در شرایط 1 تا 3 صدق کند، در این صورت یک سیستم منفعل با بازخورد α است که α در رابطه (11) صدق می‌کند.

$$\alpha \geq \frac{3}{2}\beta \quad (11)$$

اثبات:

اگر سیستمی منفعل با بازخورد α باشد، با اضافه کردن بازخوردی به اندازه α سیستم حلقه بسته ایجاد شده، منفعل خواهد بود. بنابراین سیستم دینامیکی بیان شده با رابطه (8) به همراه بازخوردی به اندازه α به صورت نمایش داده شده در شکل 3، در نظر گرفته شده و ثابت می‌شود که سیستم حلقه بسته

هریک از زیرسیستم‌ها به صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین این تکنیک، ابزاری قدرتمند برای مطالعه سیستم‌های بزرگ و پیچیده محسوب می‌گردد.

تعریف 1) فرض کنید برای یک سیستم دینامیکی با سیگنال ورودی u و سیگنال خروجی y ، تابع نامنفی W (تابع ذخیره) که تابعی از متغیرهای حالت سیستم است وجود داشته باشد بطوری که رابطه (1) برقرار باشد. در این صورت این سیستم دینامیکی از نظر انفعال‌پذیری در یکی از گروه‌های شش‌گانه زیر قرار خواهد گرفت.

$$W(x(t)) \leq W(x(0)) + \int_0^t y(\tau)u(\tau)d\tau - \rho \int_0^t y^2(\tau)d\tau - \varphi \int_0^t u^2(\tau)d\tau \quad (1)$$

الف) سیستم منفعل است اگر

$$\rho = \varphi = 0 \quad (2)$$

ب) سیستم خروجی منفعل است اگر

$$\varphi = 0, \rho > 0 \quad (3)$$

ج) سیستم ورودی منفعل است اگر

$$\rho = 0, \varphi > 0 \quad (4)$$

د) سیستم منفعل با بازخورد خروجی است اگر

$$\varphi = 0, \rho < 0 \quad (5)$$

ه) سیستم منفعل با بازخورد ورودی است اگر

$$\rho = 0, \varphi < 0 \quad (6)$$

و) سیستم غیرمنفعل است اگر منفعل نباشد.

برای اطلاعات بیشتر به مرجع [25] مراجعه نمایید.

در حقیقت، برای سیستم‌های دینامیکی منفعل، ثابتی مانند C به صورت رابطه (7) وجود دارد.

$$\int_0^t y(\tau)u(\tau)d\tau \geq -C^2 \quad (7)$$

این نامساوی نشان می‌دهد که سیستم‌های منفعل تنها مقدار محدودی انرژی اعمال می‌کنند، بدین معنا که این سیستم‌ها توانایی تولید انرژی ندارند. لذا انرژی اولیه آن‌ها بیشترین مقدار انرژی است که می‌توانند اعمال کنند.

در تعریف 1، حالت‌های ب و ج شرایط محدودتری نسبت به شرط الف هستند درحالی‌که در حالت‌های د و ه شرایط آزادتری را نسبت به شرط الف در نظر گرفته شده است. این تعاریف بر این اساس بیان شده است که پسخورد منفی و پیشخورد مثبت سیستم را به سمت انفعال سوق می‌دهد. بالعکس پسخورد مثبت و پیشخورد منفی، می‌تواند شرایط انفعال را برهم بزند. سیستم‌های منفعل با بازخورد ورودی و منفعل با بازخورد خروجی سیستم‌های غیرمنفعلی هستند که به ترتیب با پیشخورد مثبت و پسخورد منفی سیستم‌هایی منفعل ایجاد می‌کنند. از طرف دیگر، سیستم‌های منفعل ورودی و منفعل خروجی سیستم‌هایی هستند که به ترتیب حتی با اضافه شدن پیشخورد منفی و پسخورد مثبت همچنان خاصیت انفعال خود را حفظ می‌کنند.

در رابطه با بررسی انفعال تعامل دو سیستم دینامیکی دو قانون کلی وجود دارد که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است. قانون انفعال‌پذیری: مدار حلقه بسته تشکیل شده از دو سیستم منفعل، منفعل است [25].

قانون انفعال‌پذیری توسعه یافته: فرض کنید سیستم E که منفعل خروجی است به صورت نشان داده شده در شکل 2، در تعامل با سیستم D که منفعل با بازخورد ورودی است، قرار گیرد. اگر $\alpha \geq \beta$ باشد، سیستم حلقه بسته منفعل خواهد بود [26].

در محیط حرکت کند. در محیط‌های منفعل، اگر اپراتور سیستم را رها کند، پس از گذشت مدت زمان کمی، پیرو در درون محیط متوقف می‌شود. اما، در تعامل با محیط‌های غیرمنفعل، اگر سیستم بدون اپراتور رها شود، محیط پیرو را به دلخواه به حرکت واداشته و به واسطه وجود بازتاب نیرو، راهبر پیرو را دنبال خواهد کرد!

یک نمونه ساده از محیط غیرمنفعل، سیستم فنر و دمپر با ضریب استهلاک منفی است. این سیستم با رابطه (20) مدل‌سازی می‌شود.

$$f_e = K_e x(t) + C_e \dot{x}(t) \quad K_e \geq 0, C_e \leq 0 \quad (20)$$

در این سیستم، ضریب استهلاک (C_e) برابر با ضریب β تعریف شده در شرط سوم است. در اکثر تحقیقات یک دیوار یا فنر و دمپر مثبت مدل‌سازی می‌شود. بر این اساس، سیستم معرفی شده در رابطه (20) در این پژوهش، دیوار غیرمنفعل نام‌گذاری شده است.

البته در اغلب سیستم‌های فیزیکی، ضریب استهلاک مثبت است. در این حالت، اگر سیستم به ارتعاش درآمده، به حال خود رها شود، ارتعاشات آن دمپ شده و به سکون می‌رسد. اما سیستم‌هایی وجود دارند که با پدیده‌هایی مانند ارتعاش شبه رزونانسی، خود تحریکی آیرودینامیکی، پدیده چسبندگی - لغزش همراه هستند که در این سیستم‌ها ضریب استهلاک منفی است. البته در بسیاری از سیستم‌های غیرخطی، در صورت خطی‌سازی، ضریب استهلاک منفی می‌شود [28]. استهلاک منفی نشان می‌دهد که اگر سیستم به ارتعاش درآمده به حال خود رها شود، دامنه ارتعاشات آن مرتب بزرگ و بزرگ‌تر خواهد شد.

4- بیان مسأله

اپراتور، محیط و تله‌اپراتور بخش‌های اصلی یک سیستم تله‌اپراتوری هستند. برای بررسی پایداری سیستم حلقه بسته، ابتدا هریک از این سیستم‌ها به صورت مجزا مورد مطالعه قرار داده شده است.

تله‌اپراتور از سه بخش راهبر، پیرو و کنترلرهای آن‌ها تشکیل شده است. راهبر و پیرو سیستم‌های رباتیکی غیرخطی n درجه آزادی هستند. معادلات دینامیکی این ربات‌ها به صورت رابطه‌های (21) و (22) خواهد بود.

$$M_m(q_m)\ddot{q}_m(t) + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m(t) = T_m(t) + f_h(t) \quad (21)$$

$$M_s(q_s)\ddot{q}_s(t) + C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s(t) = T_s(t) + f_e(t) \quad (22)$$

که q_m و q_s بردارهای موقعیت زاویه‌ای مفاصل، M_m و M_s ماتریس‌های اینرسی، C_m و C_s ماتریس‌های شتاب جانب مرکز و کریولیس و T_s و T_m بردارهای کنترلی به ترتیب ربات‌های راهبر و پیرو هستند. نیروی اعمال شده از طرف دست اپراتور به راهبر و f_e نیروی وارد شده بر پیرو از طرف محیط است.

معادلات دینامیکی ربات‌ها دارای ویژگی‌های حائز اهمیتی است از جمله [29]:

$$(1) \text{ ماتریس اینرسی متقارن و مثبت معین است.}$$

$$(2) \text{ ماتریس } N(q, \dot{q}) = M(q) - 2C(q, \dot{q}) \text{ پادمقارن است.}$$

برای بررسی پایداری سیستم حلقه بسته، اپراتور یک سیستم منفعل در نظر گرفته شده است. لذا عدد ثابتی مانند σ وجود دارد بطوری‌که در رابطه (23) صدق می‌کند.

$$\int_0^t f_h(\tau)\dot{q}_m(\tau)d\tau \leq \sigma^2 \quad (23)$$

در بخش قبل توضیح داده شد که محیط یک سیستم دینامیکی غیرخطی منفعل با بازخورد ورودی است. بنابراین اگر تله‌اپراتور یک سیستم منفعل

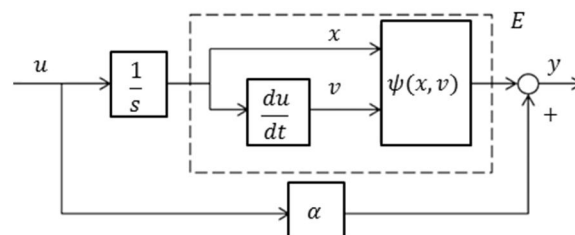


Fig. 3 The Schematic of an environment with positive feedforward

شکل 3 نمایشی از محیط به همراه بازخورد مثبت

سیستمی منفعل است.

انرژی پتانسیل محیط به صورت رابطه (12) تعریف می‌گردد.

$$U(x) = \int_0^x \psi(\xi, 0)d\xi - \inf_x \int_0^x \psi(\xi, 0)d\xi \quad (12)$$

براساس شرط 2، رابطه (12) مثبت معین است. بنابراین تابع ذخیره به صورت مجموع انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی محیط به شکل رابطه (13) در نظر گرفته شده است.

$$V_e(x, \dot{x}) = U(x) + \frac{1}{2} \int_0^t \beta \dot{x}^2(\tau)d\tau \quad (13)$$

اگر سیستم قبل از حرکت، در حالت سکون باشد، تغییرات تابع ذخیره در حین حرکت با رابطه (14) محاسبه می‌گردد.

$$\begin{aligned} \Delta V_e &= V_e(x(t), \dot{x}(t)) - V_e(x(0), \dot{x}(0)) \\ &= \int_{x_0}^x \psi(\xi, 0)d\xi + \frac{1}{2} \int_0^t \beta \dot{x}^2(\tau)d\tau \\ &= \int_0^t \psi(x, 0)\dot{x}d\tau + \frac{1}{2} \int_0^t \beta \dot{x}^2(\tau)d\tau \end{aligned} \quad (14)$$

از طرف دیگر، براساس شرط 3، رابطه (15) برای ثابت β برقرار است.

$$\beta \geq \frac{\psi(x, 0) - \psi(x, v)}{v} = \frac{\psi(x, 0) - \psi(x, \dot{x})}{\dot{x}} \quad (15)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه (15)، رابطه (14) به صورت رابطه (16) ساده می‌شود.

$$\Delta V_e \leq \int_0^t \psi(x, \dot{x})\dot{x}d\tau + \frac{3}{2} \int_0^t \beta \dot{x}^2(\tau)d\tau \quad (16)$$

اضافه بر آن، مطابق تعریف دینامیک محیط، رابطه بین ورودی و خروجی به صورت رابطه (17) خواهد بود.

$$y = \psi(x, \dot{x}) + \alpha u \quad (17)$$

بنابراین رابطه (16) براساس ورودی، خروجی و متغیرهای حالت سیستم به صورت رابطه (18) نوشته می‌شود.

$$\Delta V_e \leq \int_0^t (y - \alpha u)\dot{x}d\tau + \frac{3}{2} \int_0^t \beta \dot{x}^2(\tau)d\tau \quad (18)$$

نهایتاً، با توجه به این حقیقت که $\dot{x} = u$ است، رابطه (19) نتیجه‌گیری شده است.

$$\Delta V_e \leq \int_0^t u y d\tau + \int_0^t \left(\frac{3}{2} \beta - \alpha \right) \dot{x}^2(\tau)d\tau \quad (19)$$

بنابراین اگر $\alpha \geq \frac{3}{2} \beta$ باشد، سیستم حلقه بسته منفعل است.

در نتیجه، محیط در نظر گرفته شده یک سیستم غیرمنفعل است که با اضافه کردن پیشخورد ثابت مثبت یک سیستم منفعل را تشکیل می‌دهد. حداقل مقدار پیشخورد ثابت مورد نیاز برای منفعل کردن سیستم غیرمنفعل، می‌تواند به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری میزان غیرمنفعل (یا فعال) بودن سیستم مورد استفاده قرار گیرد.

با مقایسه رفتار محیط‌های منفعل و غیرمنفعل، مشخص می‌گردد که محیط‌های منفعل تمایل دارند از حرکت ربات در داخل محیط جلوگیری کنند درحالی‌که، محیط‌های غیرمنفعل تمایل دارند ربات با سرعت بیشتری

$$V = \frac{1}{2} \dot{q}_m^T M_m \dot{q}_m + \frac{1}{2} \dot{q}_s^T M_s \dot{q}_s + \frac{1}{2} q_e^T K_p q_e \quad (28)$$

ماتریس‌های M_m ، M_s و K_p متقارن و مثبت معین هستند بنابراین، تابع لیپانوف انتخاب شده تابعی مثبت معین است. مشتق زمانی این تابع لیپانوف بر روی مسیر سیستم به صورت رابطه (29) خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \dot{q}_m^T M_m \ddot{q}_m + \frac{1}{2} \dot{q}_m^T \dot{M}_m \dot{q}_m + \dot{q}_s^T M_s \ddot{q}_s + \frac{1}{2} \dot{q}_s^T \dot{M}_s \dot{q}_s \\ & + \dot{q}_e^T K_p q_e = \dot{q}_m^T T_m(t) + \dot{q}_m^T f_h(t) \\ & + \frac{1}{2} \dot{q}_m^T (\dot{M}_m - 2C_m) \dot{q}_m + \dot{q}_s^T T_s(t) + \dot{q}_s^T f_e(t) \\ & + \frac{1}{2} \dot{q}_s^T (\dot{M}_s - 2C_s) \dot{q}_s + \dot{q}_e^T K_p q_e \end{aligned} \quad (29)$$

با توجه به ویژگی‌های معادلات دینامیکی ربات‌ها، رابطه (29) به صورت رابطه (30) ساده می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \dot{q}_m^T T_m(t) + \dot{q}_m^T f_h(t) + \dot{q}_s^T T_s(t) + \dot{q}_s^T f_e(t) \\ & + \dot{q}_e^T K_p q_e \end{aligned} \quad (30)$$

با جایگذاری الگوریتم کنترلی در رابطه (30)، رابطه (31) حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\dot{q}_e^T K_v \dot{q}_e - \dot{q}_s^T K_d \dot{q}_s + \dot{q}_m^T f_h(t) + \dot{q}_s^T f_e(t) \\ \leq & \dot{q}_m^T f_h(t) + \dot{q}_s^T f_e(t) - \dot{q}_s^T K_d \dot{q}_s \end{aligned} \quad (31)$$

با توجه به این که $K_d \geq \alpha$ انتخاب می‌شود، رابطه (32) نتیجه‌گیری می‌شود.

$$\dot{V} \leq \dot{q}_m^T f_h(t) + \dot{q}_s^T f_e(t) - \alpha \dot{q}_s^T \dot{q}_s \quad (32)$$

f_e و f_h سیگنال‌های ورودی و $\dot{q}_s$ و $\dot{q}_m$ سیگنال‌های خروجی تله‌اپراتور هستند. بنابراین رابطه (32) نشان می‌دهد که تله‌اپراتور یک سیستم خروجی منفعل با بازخورد α است.

ب) هماهنگی موقعیت‌ها

برای اثبات هماهنگی موقعیت‌ها، تابع لیپانوفی برای سیستم حلقه بسته انتخاب شده است. این تابع لیپانوف مجموع تابع لیپانوف‌های معرفی شده برای محیط (رابطه (13)) و تله‌اپراتور (رابطه (28)) در نظر گرفته شده است.

$$V_c = V + V_e \quad (33)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (33) و با توجه به این که $\alpha \geq \frac{3}{2}\beta$ است، مشتق تابع لیپانوف به صورت رابطه (34) بدست می‌آید.

$$\dot{V}_c \leq -\dot{q}_s^T \alpha \dot{q}_s - \dot{q}_e^T K_v \dot{q}_e \quad (34)$$

رابطه (34) نشان می‌دهد که $\dot{V}_c$ منفی نیمه معین است و لذا $\dot{q}_e$ ، $\dot{q}_s$ و $\dot{q}_e$ محدود بوده و براساس لم باربالت نتیجه‌گیری می‌شود که در نهایت سیستم به $q_e = 0$ میل می‌کند.

ج) برگرداندن نیروی استاتیکی

اگر سرعت و شتاب ربات‌ها به صفر برسد، براساس معادلات دینامیکی و الگوریتم کنترلی، رابطه‌های (35) و (36) نتیجه گرفته می‌شود.

$$f_h(t) = -T_m(t) = K_p q_e(t) \quad (35)$$

$$f_e(t) = -T_s(t) = -K_p q_e(t) \quad (36)$$

بنابراین $f_h(t) = -f_e(t)$ است.

بدین ترتیب الگوریتم کنترلی پیشنهاد شده هر سه هدف کنترلی خواسته شده را برآورده می‌کند.

نکته: معمولاً در کانال‌های ارتباطی یک سیستم تله‌اپراتوری مقداری تأخیر وجود دارد که می‌تواند منفعل بودن سیستم حلقه بسته و در نتیجه پایداری آن را مختل کند. در این حالت، اگر محیط منفعل باشد، لی و اسپانگ ثابت می‌کنند که الگوریتم کنترلی آورده شده در رابطه‌های (37) و (38) می‌تواند پایداری سیستم را تضمین کند [8].

ورودی مناسب باشد، طبق قانون انفعال‌پذیری توسعه یافته، مجموع محیط و تله‌اپراتور منفعل خواهد بود. از آن‌جا که اپراتور سیستمی منفعل فرض شده، براساس قانون انفعال‌پذیری، نتیجه گرفته می‌شود که سیستم حلقه بسته منفعل و پایدار است. در حقیقت در این تکنیک، سیستم کنترلی به نحوی طراحی می‌شود که انرژی تولید شده توسط محیط را دمپ نموده و بدین ترتیب منفعل بودن سیستم حلقه بسته تضمین می‌گردد.

در نهایت سیستم کنترلی بگونه‌ای طراحی می‌شود که سه هدف اساسی زیر تضمین شود:

(1) هماهنگی موقعیت‌ها: در حرکت آزاد که هیچ نیرویی از طرف محیط و اپراتور به سیستم اعمال نمی‌شود ($f_h = f_e = 0$)، با گذشت زمان، موقعیت‌های راهبر و پیرو همگرا شوند:

$$q_e(t) := q_m(t) - q_s(t) \rightarrow 0 \quad (24)$$

(2) برگرداندن نیروی استاتیکی: زمانی که سرعت و شتاب راهبر و پیرو صفر است، نیرویی که به دست اپراتور انتقال داده می‌شود با نیروی محیط دقیقاً برابر باشد:

$$f_h \rightarrow -f_e \quad (25)$$

(3) تله‌اپراتور بایستی یک سیستم منفعل خروجی با بازخورد α باشد. اهداف اول و دوم شفافیت سیستم را فراهم می‌کند که یکی از ابتدایی‌ترین شرایط سیستم تله‌اپراتوری دوجانبه است. هدف سوم پایداری سیستم کنترلی را تضمین می‌کند.

5- طراحی سیستم کنترلی

قوانین کنترلی برای ربات‌های راهبر و پیرو به صورت رابطه‌های (26) و (27) در نظر گرفته می‌شوند.

$$T_m(t) = -K_v(\dot{q}_m(t) - \dot{q}_s(t)) - K_p(q_m(t) - q_s(t)) \quad (26)$$

$$\begin{aligned} T_s(t) = & -K_v(\dot{q}_s(t) - \dot{q}_m(t)) - K_p(q_s(t) - q_m(t)) \\ & - K_d \dot{q}_s(t) \end{aligned} \quad (27)$$

K_p و K_v ماتریس‌های متقارن و مثبت معین هستند و K_d ماتریس بهره متقارن است.

این الگوریتم کنترلی از دو بخش اصلی تشکیل شده است: کنترل تناسبی-مشتقی به همراه ترم اتلافی. کنترل تناسبی-مشتقی هماهنگی موقعیت‌ها و برگرداندن نیروی استاتیکی را فراهم می‌کند. درحالی‌که ترم اتلافی سبب پایداری سیستم می‌گردد. در حقیقت، محیط غیرمنفعل انرژی تولید می‌کند و به همین علت در سیستم کنترلی بایستی یک ترم اتلافی وجود داشته باشد تا این انرژی را مستهلک کرده و انفعال سیستم حلقه بسته را تضمین نماید. ضرایب K_p و K_v بایستی با توجه به دوگانگی شفافیت و تلاش کنترلی بر اساس تجربه انتخاب شوند. اما K_d بایستی بزرگ‌تر از α (مقدار غیرمنفعل بودن محیط) انتخاب گردد.

تئوری (2) برای سیستم تله‌اپراتوری غیرخطی بیان شده در رابطه‌های (21) و (22) که با محیط غیرمنفعل معرفی شده در رابطه (8) در تعامل است اگر از الگوریتم کنترلی پیشنهاد شده در رابطه‌های (26) و (27) استفاده گردد هر سه هدف کنترلی خواسته شده (پایداری سیستم حلقه بسته، هماهنگی موقعیت‌ها و برگرداندن استاتیکی نیرو) تضمین می‌گردد.

اثبات:

الف) تله‌اپراتور منفعل خروجی با بازخورد α است.

تابع لیپانوف به صورت رابطه (28) در نظر گرفته شده است.

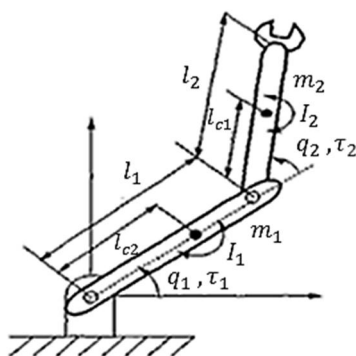


Fig.4 Schematic of a 2 DOF revolute planar robot

شکل 4 شماتیکی از ربات دو درجه آزادی صفحه‌ای مفصلی [26]

ثانیه به سمت دیوار حرکت کرده و در موقعیت (0.3,0) قرار می‌گیرد. در نهایت، در موقعیت (0,0.75) در زمان $t = 200$ s به حرکت خود خاتمه می‌دهد. براساس این استراتژی، سیستم تله‌اپراتوری همواره در تعامل با محیط خواهد بود.

موقعیت‌های راهبر و پیرو در راستای x و y به ترتیب در شکل‌های 5 و 6 نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد پیرو به خوبی حرکت راهبر را تعقیب کرده است. این نکته حائز اهمیت است که محیط تنها در راستای x به پیرو نیرو اعمال می‌کند و نیرویی در راستای y وارد نمی‌شود. در این‌جا این نکته لازم به ذکر است که هنگام برخورد ربات با دیوار منفعل، نیروهایی که از طرف محیط به آن وارد می‌شود سبب متوقف شدن ربات می‌گردد. در حقیقت دیوار منفعل مانند یک مانع عمل می‌کند. اما، دیوار غیرمنفعل (فنر و دمپر با ضرایب منفی) مانند یک چاه است که ربات را به

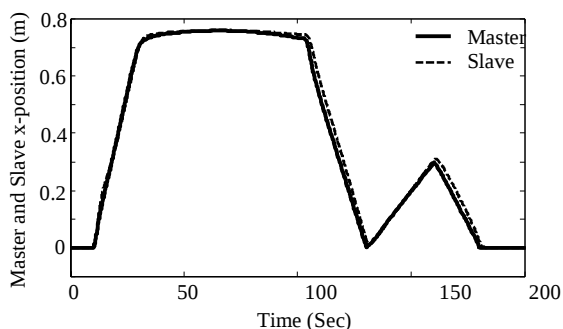


Fig. 5 Master and slave x-position

شکل 5 موقعیت راهبر و پیرو در راستای x

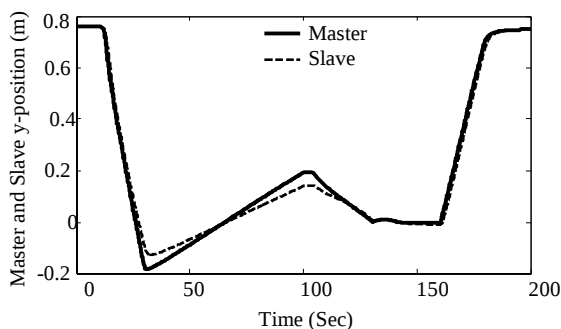


Fig. 6 Master and slave y-position

شکل 6 موقعیت راهبر و پیرو در راستای y

$$T_m(t) = -K_v(\dot{q}_m(t) - \dot{q}_s(t - \tau_2)) - K_p(q_m(t) - q_s(t - \tau_2)) - K_d\dot{q}_m(t) \quad (37)$$

$$T_s(t) = -K_v(\dot{q}_s(t) - \dot{q}_m(t - \tau_1)) - K_p(q_s(t) - q_m(t - \tau_1)) - K_d\dot{q}_s(t) \quad (38)$$

در رابطه‌های (37) و (38)، τ_1 و τ_2 تأخیرهای رفت و برگشتی کانال‌های ارتباطی هستند و بهره K_d بایستی به صورتی انتخاب شود که در رابطه (39) صدق کند.

$$K_d \geq \left(\frac{\sin \frac{\omega(\tau_1 + \tau_2)}{2}}{\omega} \right)^2 \quad (39)$$

اما در حالتی که سیستم تله‌اپراتوری با یک محیط غیرمنفعل در تعامل بوده و در کانال‌های ارتباطی تأخیر وجود داشته باشد، همین الگوریتم کنترلی می‌تواند پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین نماید با این تفاوت که بهره K_d باید رابطه (40) را برآورده کند.

$$K_d \geq \left(\frac{\sin \frac{\omega(\tau_1 + \tau_2)}{2}}{\omega} \right)^2 + \alpha \quad (40)$$

در نهایت، بایستی دقت شود که در صورتی که در کانال‌های ارتباطی تأخیر وجود نداشته باشد، تنها یک ترم اتلافی در کنترلر پیرو، پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین می‌کند. درحالی‌که در صورت وجود تأخیر، بایستی دو ترم اتلافی یکی برای پیرو و یکی برای راهبر در نظر گرفته شود. وجود ترم اتلافی در کنترلر راهبر سبب می‌شود شفافیت سیستم تضعیف شود. زیرا هنگامی که هیچ نیرویی از جانب محیط به پیرو اعمال نمی‌شود، به اپراتور نیرو اعمال شده و گمان می‌کند که پیرو تحت اعمال نیرو است.

6- شبیه‌سازی

در این شبیه‌سازی، عملکرد سیستم کنترلی در تعامل با محیط غیرمنفعل مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور تله‌اپراتور به همراه اپراتور و یک دیوار غیرمنفعل شبیه‌سازی شده تا پایداری سیستم حلقه بسته، هماهنگی موقعیت‌ها و شفافیت سیستم به هنگام مواجهه با محیط غیرمنفعل ارزیابی گردد. همچنین به منظور مقایسه رفتار محیط منفعل و غیرمنفعل و تأثیر آن‌ها بر سیستم تله‌اپراتوری، در مرحله دوم همین سیستم در مواجهه با دیوار منفعل شبیه‌سازی شده است.

در شبیه‌سازی‌ها، دو ربات صفحه‌ای دو درجه‌آزادی مفصلی به عنوان راهبر و پیرو مدل شده است (شکل 4). جزئیات معادلات دینامیکی این ربات‌ها در مرجع [30] آورده شده است.

در شبیه‌سازی‌ها، اپراتور به صورت یک کنترلر تناسبی-مشتقی با ضرایب $K_p = 1000 (\text{Nm}^{-1})$ و $K_d = 200 (\text{Nsm}^{-1})$ مدل شده است.

برای بررسی رفتار سیستم کنترلی پیشنهاد شده در تعامل با محیط غیرمنفعل، ابتدا یک دیوار غیرمنفعل عمودی در مبدا پیرو به عنوان محیط نظر گرفته شده است. این دیوار غیرمنفعل با یک فنر و دمپر با ضرایب منفی مدل شده است ($C_e = -20 (\text{Nsm}^{-1})$ و $K_e = -10 (\text{Nm}^{-1})$). بدین ترتیب، منفی بودن ضرایب فنر و دمپر باعث غیرمنفعل شدن محیط شود. لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی از تأخیر در کانال‌های ارتباطی صرف‌نظر گردیده است.

در این شبیه‌سازی، اپراتور در ثانیه دهم، از موقعیت (0,0.75) به سمت دیوار غیرمنفعل حرکت می‌کند. پس از آن، در $t = 30$ s به موقعیت (0.2, -0.75) رسیده و برای مدت 70 ثانیه در همین موقعیت می‌ماند. سپس به سمت مبدا حرکت کرده و از دیوار خارج می‌شود. دوباره بعد از گذشت 30

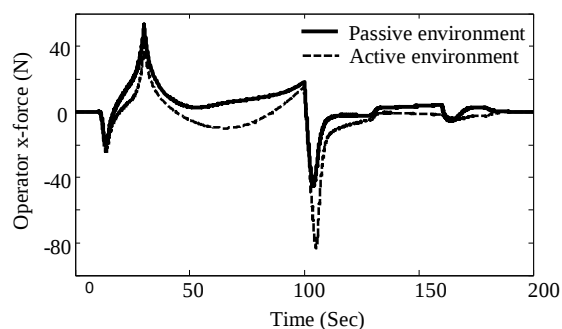


Fig. 7 Force applied to the master by the operator

شکل 7 نیروی اعمال شده به راهبر از طرف اپراتور

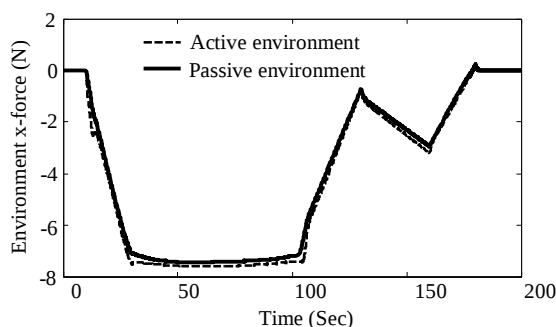


Fig. 8 Force applied to the slave by the environment

شکل 8 نیروی اعمال شده به پیرو از طرف محیط

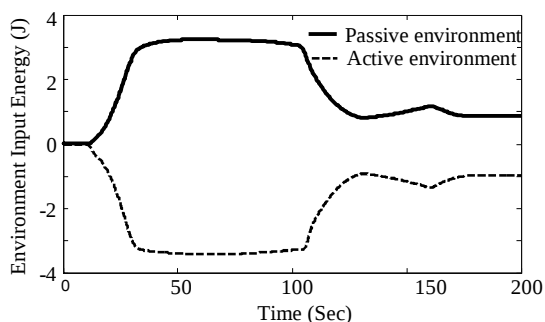


Fig. 9 Energy applied to the environment by the slave

شکل 9 انرژی اعمال شده به محیط از طرف پیرو

شکل 10 شمای کلی این آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد از یک ربات فانتوم به عنوان راهبر استفاده شده و پیرو به همراه محیط در رایانه با نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. یک ربات مفصلی دو درجه آزادی صفحه‌ای به عنوان پیرو مدل‌سازی گردیده است. جدول 1 پارامترهای پیرو که از نظر سینماتیکی مشابه با راهبر انتخاب شده را نشان می‌دهد. از یک برد جمع‌آوری داده (dSpace 1104) به عنوان رابط بین نرم-افزار متلب و ربات فانتوم استفاده گردیده است.

یک دیوار غیرمنفعل عمودی با ضرایب فنری و استهلاک $K_e = 10 \left(\frac{N}{m} \right)$ و $C_e = -2 \left(\frac{N \cdot s}{m} \right)$ در موقعیت $x = 0.2(m)$ به عنوان محیط شبیه‌سازی شده است.

کنترلرهای راهبر و پیرو در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب به صورت زمان واقعی پیاده‌سازی شده است. ضرایب این کنترلرها به این صورت انتخاب شده است: $K_d = 2 \left(\frac{N}{m} \right)$ و $K_v = 0.5 \left(\frac{N \cdot s}{m} \right)$ ، $K_p = 10(Nm)$.

درون خود می‌کشد. درواقع، رفتار دیوار غیرمنفعل دقیقاً برعکس دیوار منفعل است. هنگامی که ربات در داخل دیوار منفعل پیش می‌رود، نیروهای اعمال شده باعث استهلاک انرژی ربات و در نهایت توقف آن می‌شود. درحالی که، در این حالت دیوار غیرمنفعل به ربات انرژی تزریق کرده و ربات را با سرعت بیشتری به درون خود می‌کشد. برعکس، هنگامی که ربات سعی می‌کند از محیط خارج شود، دیوار منفعل به آن انرژی می‌دهد تا هرچه سریع‌تر خارج گردد ولی، دیوار غیرمنفعل انرژی ربات را می‌گیرد تا اجازه ندهد که از محیط خارج شود. بنابراین، هنگام تعامل با محیط منفعل، بیشترین مقدار انرژی که محیط به ربات اعمال می‌کند برابر با مقدار انرژی است که هنگام پیشروی در محیط، ربات به آن تزریق کرده است. لذا، اپراتور می‌تواند این مقدار انرژی را مستهلک کرده و پایداری سیستم را حفظ کند. اما، محیط غیرمنفعل می‌تواند به صورت نامحدودی به ربات انرژی اعمال کند. بنابراین در سیستم کنترلی به یک ترم اتلافی نیاز است تا این انرژی را که ممکن است از حد توان اپراتور بیشتر باشد، مستهلک کرده و پایداری سیستم حلقه بسته را حفظ کند.

در ادامه، به منظور مقایسه رفتار محیط‌های منفعل و غیرمنفعل، همین شبیه‌سازی با دیوار منفعل (فتر و دمپر با ضرایب مثبت) تکرار شده و نیروهای اعمال شده به راهبر و پیرو و انرژی محیط در این حالت با حالت قبل مقایسه شده است.

نیروهای اعمال شده به راهبر و پیرو در تعامل با دیوار منفعل و غیرمنفعل در شکل‌های 7 و 8 آورده شده است. شکل 8 نشان می‌دهد که نیروی اعمال شده به پیرو از طرف دیوار منفعل و غیرمنفعل خلاف جهت یکدیگر بوده ولی از نظر اندازه دقیقاً با هم برابر است. در شکل 7 مشاهده می‌گردد که به علت آن که اپراتور استراتژی یکسانی را در دو محیط پیش گرفته است، نیروی اعمال شده به راهبر در دو حالت دقیقاً یکسان است. همان‌طور که در شکل‌های 5 و 6 ملاحظه می‌شود، تعقیب موقعیت بدون هیچ‌گونه خطایی انجام می‌گیرد در این حالت (براساس قانون کنترلی طراحی شده) هیچ نیرویی از جانب تله‌اپراتور به راهبر اعمال نشده و اپراتور هیچ حسی از محیط نخواهد داشت. بدین ترتیب نیروی اعمال شده به اپراتور تنها به علت دینامیک ربات راهبر و نیروی اعمال شده به پیرو تنها ناشی از تعامل با محیط است. این دو نیرو زمانی با هم برابر می‌شوند (یا به عبارتی زمانی اپراتور نسبت به محیط احساس دارد) که در تعقیب موقعیت‌ها خطا ایجاد گردد.

انرژی اعمال شده از طرف پیرو به دیوار منفعل و غیرمنفعل در شکل 9 نمایش داده شده است. مشاهده می‌گردد که مقدار انرژی وارد شده به محیط منفعل مثبت و به محیط غیرمنفعل منفی است. هرچند نمودار دریافت انرژی یک محیط نمی‌تواند دلیلی برای منفعل یا غیرمنفعل بودن آن باشد، اما می‌تواند نتایج بدست آمده را تایید کند. این نکته نیز قابل تأمل است که یک محیط غیرمنفعل (منفعل) ممکن است تمام مدت انرژی تولید (مصرف) نکند، اما در هر حال، مقدار انرژی که تولید کرده به مراتب از مقدار انرژی که مستهلک کرده بیشتر (کمتر) خواهد بود.

7- نتایج عملی

نتایج تئوری و حتی شبیه‌سازی‌ها همواره با فرض‌ها و ساده‌سازی‌های بسیار همراه است. این بخش به منظور صحت‌گذاری بر نتایج تئوری به نتایج عملی اختصاص داده شده است.

در این تست عملی، از یک واسطه لمسی فانتوم 6 درجه آزادی که تنها از 2 درجه آزادی آن بهره گرفته شده به عنوان راهبر استفاده گردیده است.

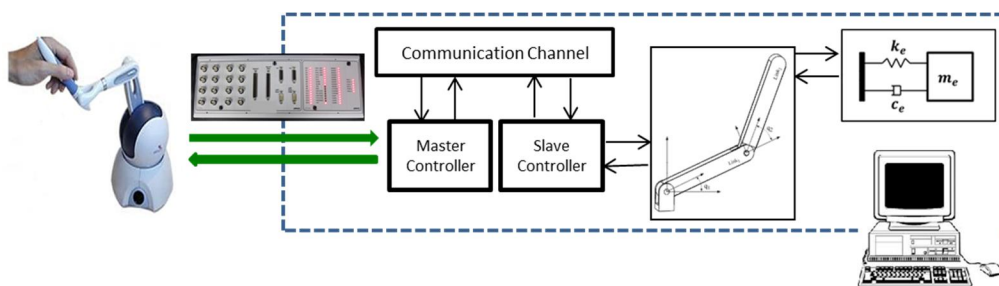


Fig. 10 The Schematic of Experimental Setup

شکل 10 شمای کلی آزمایش

مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس با در نظر گرفتن فرض‌هایی که برای اغلب محیط‌های منفعل و غیرمنفعل صادق است، نشان داده شد که این سیستم‌های دینامیکی با یک پیش‌خورد مثبت ثابت، یک سیستم منفعل را تشکیل می‌دهند. همان‌طور که نشان داده شد، اندازه این پیش‌خورد تنها به ضریب استهلاک سیستم بستگی داشته و ضریب فنریت نقشی در آن نخواهد داشت.

جدول 1 پارامترهای ربات پیرو

Table 1 Parameters of the Slave

جرم (kg)	طول (m)	ممان اینرسی (kgm^2)
0.3	0.135	$4.5563e^{-4}$
0.2	0.235	$9.2042e^{-4}$

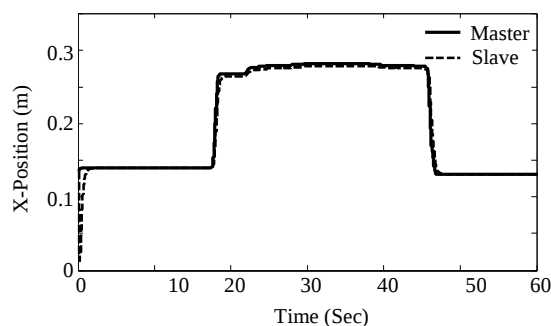


Fig. 11 Master and Slave x-position

شکل 11 موقعیت‌های راهبر و پیرو در راستای x

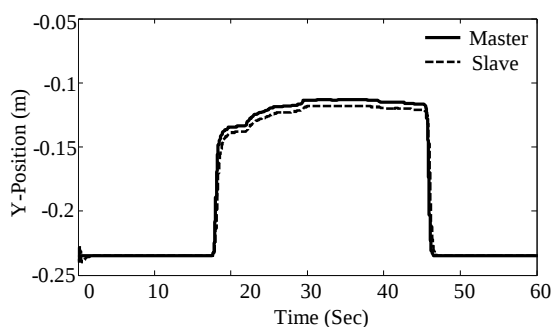


Fig. 12 Master and Slave y-position

شکل 12 موقعیت‌های راهبر و پیرو در راستای y

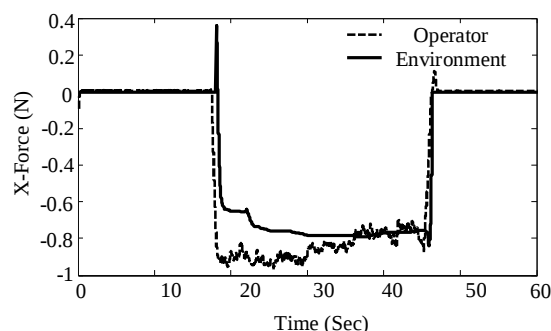


Fig. 13 Master and Slave x-force

شکل 13 نیروهای راهبر و پیرو در راستای x

سناریوی حرکت به این صورت است که ابتدا اپراتور در خارج دیوار حرکت کرده سپس به سمت دیوار رفته و داخل محیط می‌شود. کمی در داخل محیط حرکت کرده و سپس از محیط خارج می‌گردد. بدین ترتیب رفتار سیستم کنترلی در حالت آزاد (خارج از محیط)، در تعامل با محیط و نیز در لحظه برخورد با محیط به خوبی نشان داده خواهد شد.

همان‌طور که در شکل‌های 11 و شکل 12 نمایش داده شده، در حالت آزاد (20 ثانیه ابتدای حرکت و 15 ثانیه انتهای حرکت) و در هنگام تعامل با محیط (از $t = 20$ s تا $t = 45$ s)، پیرو به خوبی حرکت راهبر را تعقیب می‌کند. در این‌جا این نکته حائز اهمیت است که همان‌طور که قبلاً گفته شد، در تعامل با دیوار منفعل، هنگام برخورد پیرو با محیط، دیوار از پیروی ربات جلوگیری کرده و بدین ترتیب پیرو در داخل محیط نمی‌تواند تمامی حرکت‌های راهبر را دنبال کند. اما، در تعامل با دیوار غیرمنفعل، محیط سبب توقف ربات نشده و لذا انتظار می‌رود در داخل محیط نیز پیرو تمامی حرکت‌های راهبر را به صورت کامل دنبال کند. شکل 13 نیروهای اعمال شده به راهبر و پیرو از طرف اپراتور و محیط را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد اپراتور تقریباً همان نیروی محیط را تجربه می‌کند. بنابراین سیستم کنترلی پیشنهاد شده سطح خوبی از شفافیت را فراهم کرده است.

در این حالت، به علت سناریو انتخاب شده محیط در تمام طول آزمایش انرژی تولید می‌کند. در آزمایش دوم، سناریوی دیگری طراحی شده که سبب می‌شود محیط در بازه‌هایی از زمان انرژی تولید کرده و در بازه‌هایی نیز انرژی مصرف نماید. این سناریو در شکل 14 نمایش داده شده است. در این حالت محیط برای 7 sec انرژی مصرف کرده و پس از آن انرژی تولید می‌کند (شکل 15). بنابراین مصرف یا تولید انرژی توسط محیط به طور کامل به سناریوی انتخاب شده بستگی دارد. لذا امکان دارد در یک سناریو محیط تنها انرژی مصرف کرده و رفتاری شبیه به محیط منفعل از خود به نمایش بگذارد. به همین علت نمودار مقدار انرژی تبادل شده یک سیستم نمی‌تواند دلیلی برای منفعل یا غیرمنفعل بودن آن باشد. همان‌طور که در شکل 14 نمایش داده شده، در این حالت نیز پیرو به خوبی رفتار راهبر را تعقیب نموده است.

8- جمع‌بندی

در این پژوهش به طور خاص، محیط‌های غیرمنفعل مورد بررسی قرار داده شده و رفتار آن‌ها در مقایسه با محیط‌های منفعل در سیستم‌های تله‌اپراتوری

- [8] D. Lee, M. W. Spong, Passive bilateral teleoperation with constant time delay, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No. 2, pp. 269-281, 2006.
- [9] E. nuno, R. Ortega, N. Barabanov, L. Basanez, A globally stable PD controller for bilateral teleoperators, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 3, pp. 753-758, 2008.
- [10] H. Kawada, T. Namerikawa, Bilateral control of nonlinear teleoperation with time varying communication delay, *American Control Conference*, Seattle, WA, June 11-13, 2008.
- [11] R. Lozano, N. Chopra, M. W. Spong, Passivation of force reflecting bilateral teleoperators with time varying delay, *Proceeding of Mechatronics*, Enschede, Netherlands, June 24-26, 2002.
- [12] S. Islam, P. X. Liu, A. El Saddik, Y. B. Yang, Bilateral control of teleoperation systems with time delay, *IEEE Transactions on Mechatronics*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-12, 2014.
- [13] A. K. Bejczy, M. Handlykken, Generalization of bilateral force reflecting control of manipulators, *Proceeding of 4th RoMan-Sys*, Warsaw, 1981.
- [14] B. Hannaford, J. H. Ryu, Time domain passivity control of haptic interface, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 1, pp. 1-10, 2002.
- [15] K. Krishnaswamy, *Passive Teleoperation of Hydraulic Systems*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, Minnesota, 2004.
- [16] I. G. Polushin, A. Takahmar, R. V. Patel, Small gain design of networked cooperative bilateral teleoperation, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, May 9-13, 2011.
- [17] Sh. Sirouspour, Modeling and control of cooperative teleoperation system, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 6, pp. 1220-1225, 2005.
- [18] C. D. Onal, C. Pawashe, M. Sitti, A scaled bilateral control system for experimental 1-D teleoperated nano manipulation applications, *IEEE International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, San Diego, USA, October 29 – Nov 2, 2007.
- [19] B. E. Miller, J. E. Colgate, R. A. Freeman, Passive implementation for a class of static nonlinear environments in haptic display, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, USA, May 10-15, 1999.
- [20] J. E. Colgate, G. G. Schenkel, Passivity of a class of sampled data systems: application to haptic interface, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 37-47, 1997.
- [21] B. E. Miller, J. E. Colgate, R. A. Freeman, Guaranteed stability of haptic systems with nonlinear virtual environments, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 6, pp. 712-719, 2000.
- [22] A. Haddadi, K. Hashtrudi-Zaad, Bounded-impedance absolute stability of bilateral teleoperation control systems, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, No. 1, pp. 15-27, 2010.
- [23] I. G. Polushin, H. J. Marquez, A. Tayebi, P. X. Liu, A Multichannel IOS small gain theorem for systems with multiple time-varying communication delays, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 54, No. 2, pp. 404-409, 2009.
- [24] I. G. Polushin, A. Tayebi, H. J. Marquez, Stabilization scheme for force-reflecting teleoperation with time-varying communication delay based on IOS small gain theorem, *Presented at the 16th IFAC world congress*, Prague, Czech Republic, July 4-8, 2005.
- [25] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, pp. 227-259, New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- [26] B.E. Miller, *Stability of haptic system with non-passive virtual environments*, PhD Thesis, Northwestern University, Evanston, 2000.
- [27] V. Pasandi, M. Naraghi, S. M. Rezaei, M. Zareinejad, et al., Design of a control architecture for nonlinear bilateral teleoperation system coupled with non-passive environment, *20th ISME Conference*, Shiraz, Iran, 2012.
- [28] M. R. Popovic, G. Liu, A. A. Goldenberg, Experimental study on low velocity friction compensation and tracking control, *Automatic Control*, Vol. 13, No. 2, pp. 17-22, 2003.
- [29] M. W. Spong, S. Hutchinson, m. Vidyasagar, *Robot Modeing and Control*, pp. 239-282, New York: John Wiley and Sons, 2006.
- [30] J. E. Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*, pp. 208-229, New Jersey: Prentice-Hall, 1991.

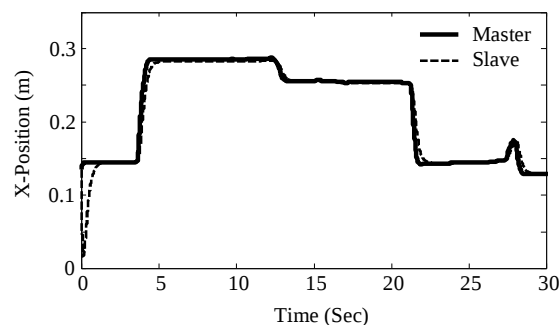


Fig. 14 Master and Slave x-position in second test

شکل 14 موقعیت‌های راهبر و پیرو در راستای x در آزمایش دوم

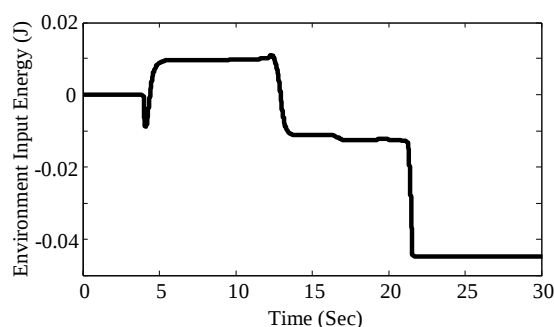


Fig. 15 Energy applied to the environment in second test

شکل 15 انرژی داده شده به محیط توسط پیرو در آزمایش دوم

اما از کم‌ترین اندازه پیش‌خورده مورد نیاز برای تشکیل یک سیستم حلقه بسته منفعل از یک سیستم غیرمنفعل می‌توان به عنوان معیاری برای سنجش میزان غیرمنفعل بودن سیستم استفاده نمود. در نهایت، یک الگوریتم کنترلی برای سیستم تله‌اپراتوری غیرخطی دوجانبه در تعامل با محیط غیرمنفعل که در حقیقت یک کنترلر تناسبی- مشتقی توسعه‌یافته است، ارائه گردید. این الگوریتم کنترلی برای یک سیستم دو درجه آزادی شبیه‌سازی و پیاده‌سازی شد که نتایج آن‌ها، نتایج تئوری را تأیید می‌کند.

9- مراجع

- [1] P. F. Hokayem, M. W. Spong, Bilateral teleoperation: An historical survey, *Automatica*, Vol. 42, No. 12, pp. 2035-2057, 2006.
- [2] X. Yang, C. Hua, J. Yan, X. Guan, New stability criteria for networked teleoperation system, *Information Sciences*, Vol. 233, No. 1, pp. 244-254, 2013.
- [3] B. Maschke, O. Egeland, B. Brogliato, *Dissipative Systems Analysis and Control; Theory and Applications*, pp. 125-138, London, Springer-Verlag, 2000.
- [4] J. Ryu, D. Kwon, B. Hannaford, Stable teleoperation with time domain passivity control, *IEEE transaction on Robotics and Automation*, Vol. 20, No. 2, pp. 365-373, 2004.
- [5] E. Laroche, L. Barbe, B. Bayle, M. Mathelin, A methodology for identification of uncertain LFR model of the human operator for telemanipulation with force-feedback, *Proceeding of IEEE International Conference on Decision and Control*, Atlanta, GA, December 15-17, 2010.
- [6] H. Gollee, A. Mamma, A. D. Loram, P. J. Gawthrop, Frequency domain identification of the human controller, *Biological Cybernetics*, Vol. 106, No. 6, pp. 359-372, 2012.
- [7] T. A. Varkonyi, I. J. Rudas, P. Pausits, T. Haidegger, Survey on the control of time delay teleoperation systems, *Proceeding of 18th International Conference on Intelligent Engineering Systems*, Tihany, July 3-5, 2014.