



کنترل ربات‌های برون‌پوش کاربر - محور در مواجهه همزمان با نیروهای تعاملی و اغتشاشات محیطی

حسین شاهی¹، عقیل یوسفی کما^{2*}، مجید محمدی مقدم³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استاذ، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی 11155-4563، aykoma@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 مرداد 1396

پذیرش: 17 مهر 1396

ارائه در سایت: 19 آبان 1396

کلید واژگان:

کنترل ادmittانس

کنترل امیدانس

ربات برون‌پوش کاربر-محور

نیروی تعاملی

اغتشاش محیطی

چکیده

در این مقاله رویکردی متفاوت در طراحی کنترلر ادmittانس برای ربات‌های برون‌پوش کاربر-محور در مواجهه با اغتشاشات محیطی پیشنهاد می‌گردد. از آن‌جا که در این دسته از ربات‌ها، مسئله حفظ تعادل مجموعه ربات و انسان برعهده کاربر است، لذا علاوه بر نیروی تعاملی، اغتشاشات محیطی که به ربات وارد می‌شوند نیز می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. تاکنون رویکردهای کنترلی پیشنهاد شده فارغ از پرداختن به این مسئله، صرفاً تمرکز خود را بر روی ارائه یک رابطه دینامیکی مناسب مابین نیروی تعاملی و حرکت ربات قرار داده‌اند. این مسئله می‌تواند در برخی موارد سبب ایجاد مشکل برای کاربر در ارائه واکنشی مناسب نسبت به اغتشاش وارده و برهم خوردن تعادل مجموعه گردد. در این مقاله به ارائه راهکاری برای کنترل همزمان نیروی تعاملی و اغتشاش پرداخته و کنترل‌های ترکیبی برپایه کنترل‌های کلاسیک ادmittانس و امیدانس برای کنترل ربات پیشنهاد می‌گردد. بدین منظور ارزیابی عملکرد کنترل‌های پیشنهادی در مقایسه با دیگر کنترل‌های مرسوم، شبیه‌سازی‌ای بر روی پای یک ربات برون‌پوش که در فاز آویزان قرار دارد انجام می‌پذیرد. نتایج نشان می‌دهد برخلاف کنترل‌های رایج که هر یک در ارائه پاسخ کنترل شده نسبت به اغتشاش محیطی ناتوان ظاهر می‌گردند، رویکردهای کنترلی پیشنهادی می‌توانند در عین ارائه عملکرد مطلوب در غیاب اغتشاش، در مواجهه با آن نیز عملکردی مطلوب برپایه یک دینامیک مرجع داشته باشند.

Control of user-in-charge exoskeletons in the presence of interaction forces and environmental disturbances

Hossein Shahi¹, Aghil Yousefi koma^{1*}, Majid Mohammadi Moghaddam²

1- School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 11155-4563, Tehran, Iran, aykoma@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 August 2017
Accepted 09 October 2017
Available Online 10 November 2017

Keywords:

Admittance Control
Impedance Control
User-in-charge Exoskeleton
Interaction Force
Environmental Disturbance

ABSTRACT

In this paper, a new design approach for an admittance control method is presented to deal with the environmental disturbances for user-in-charge exoskeletons. Since the challenge of maintaining the stability of the robot and the human is met by the user, environmental disturbances as a set of external forces should be considered. However, the proposed control methods have already ignored the issue and focused on presenting a desired dynamic relation between the interaction forces and the robot motion. This paper aims to find a control solution to maintain the desired behavior of the classical controllers in response to the interaction forces as well as to deal with disturbances properly. For this purpose, a control structure is developed by substituting an impedance control method for the low-level layer of an admittance controller. A simulation on an exoskeleton leg is conducted to evaluate the performance of the proposed controller in comparison with the classical control methods for user-in-charge exoskeletons. In contrast to conventional control methods, the results shows that the proposed controller can deal with both the interaction forces and the disturbances properly as a consequence of establishing different dynamic mappings for each of them.

1- مقدمه

ترکیب هوشمندی انسان و قدرت ربات می‌باشند. در این دسته از ربات‌ها، تعامل انسان و ربات برون‌پوش، دو ضعف عمده انسان و ربات را که به ترتیب تولید نیروی کم در انسان و سطح هوشمندی پایین ربات است، مرتفع

ربات‌های برون‌پوش¹ نسل نوینی از ربات‌های هوشمند هستند که حاصل

¹ Exoskeleton

Please cite this article using:

H. Shahi, A. Yousefi koma, M. Mohammadi Moghaddam, Control of user-in-charge exoskeletons in the presence of interaction forces and environmental disturbances, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 97-108, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

می‌سازد. ربات‌های برون‌پوش، سامانه‌های رباتیکی هستند که توسط کاربر پوشیده شده و در حالی که به‌طور موزای با بدن عمل می‌کنند، به بیمار/کاربر کمک می‌کنند تا نحوه راه رفتن طبیعی را بازیابی نموده و یا با سرعت بیشتر و یا همراه با بار بیشتر حرکت کند [1].

در میان ربات‌های کاربر-محور، کنترل ادمیتانس رایج‌ترین کنترلر به کار گرفته شده به ویژه برای پیاده‌سازی بر روی پای آویزان می‌باشد [2]. در این روش کنترلی کنترلر سعی می‌کند تا دینامیک ربات را با یک ادمیتانس مطلوب جایگزین نماید تا از منظر ورودی سیستم (در سیستم‌های چند ورودی، ورودی‌های اندازه‌گیری شده)، ربات دینامیک ظاهری مشابه ادمیتانس مطلوب از خود به نمایش گذارد. به‌صورت کلی در این دسته از ربات‌ها، ربات در هر لحظه در معرض دو دسته نیروی خارجی (ورودی) است: نیروهای وارد شده از سوی کاربر (نیروهای تعاملی) و نیروهای وارد شده از سوی محیط اطراف که معمولاً به‌عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شوند. در تمامی تحقیقات ارائه شده در زمینه کنترلر ادمیتانس که در آن‌ها امکان اندازه‌گیری نیرو و یا گشتاور (به غیر از عملگرها) فراهم آمده است، تنها نیروهای تعاملی بین ربات و کاربر اندازه‌گیری شده است.

یکی از چالش‌های مطرح در حوزه کنترل تعاملی، بحث تعیین ادمیتانس/ ادمیتانس مطلوب است که در نهایت به‌عنوان دینامیک حلقه بسته ظاهر می‌شود. با توجه به کاربری ربات برون‌پوش، تحقیقات بسیاری در این حوزه مطرح شده‌اند تا کنترلی طراحی گردد که در عین کوچک نگه داشتن نیروی تعاملی، این امکان را فراهم آورد تا ربات بتواند کاربر و یا حرکت صحیح را تعقیب نماید. در حوزه کنترل ادمیتانس از میان مقالات موجود، می‌توان به [3,4] برای تعیین پارامترهای ادمیتانس مطلوب اشاره نمود. به‌رغم ادبیات نسبتاً غنی و تعدد تحقیقات صورت پذیرفته به‌منظور کاهش اندازه نیروی تعاملی (به‌عنوان یکی از اهداف طراحی کنترلر)، متأسفانه مقاله‌ای که به صورت جامع به بررسی رفتار دینامیکی مناسب ربات در برابر سایر نیروهای محیطی وارده بپردازد وجود ندارد. معدود مقالاتی که در حوزه تعامل انسان-ربات، به موضوع نحوه مواجهه ربات با ورودی‌های محیطی اشاره داشته‌اند، مقالاتی هستند که در آنها معمولاً از کنترل ادمیتانس با حلقه داخلی کنترل موقعیت [5] و یا کنترلر مود لغزشی [6] استفاده شده و این دسته از نیروها به صورت یک اغتشاش در حلقه کنترلی در نظر گرفته شده است. در صورت تعیین مناسب کنترلر حلقه داخلی، اثر این عوامل در خروجی سیستم حلقه بسته حذف و یا کاهش می‌یابد.

در [7] بیان شده است که استفاده از کنترلر PID به عنوان کنترلر موقعیت می‌تواند در شرایط ناخواسته‌ای نظیر تماس ناگهانی ربات با محیط، سبب بروز ریسک‌هایی در هدایت ربات شود. لذا در این مقاله استفاده از یک کنترلر مود لغزشی مبتنی بر پروکسی به‌عنوان جایگزینی برای کنترلر موقعیت PID پیشنهاد شده است تا بتواند علاوه بر تعقیب دقیق مسیر مطلوب در فضای آزاد، در هنگام مواجهه با اتفاقات ناخواسته و در نتیجه خطاهای بزرگ موقعیت، با یک دینامیک فوق میرا و نرم، موقعیت مطلوب را خود را بازیابی کند. در [8] از این روش به عنوان حلقه داخلی یک کنترلر ادمیتانس استفاده شده است.

در [9] اتصال بین ربات و کاربر نرم و ارتجاعی در نظر گرفته شده و در نتیجه از یک رابطه دینامیکی فنر-دمپر برای محاسبه نیروی تعاملی مابین ربات و کاربر (به عنوان جایگزینی برای اندازه‌گیری مستقیم آن) استفاده شده است. در ادامه با به‌کارگیری یک کنترلر ادمیتانس پایداری سیستم اثبات شده است. همچنین نشان داده شده است بسته به میزان سختی و میرایی

دینامیک مطلوب، ربات توانایی مقابله با اغتشاشاتی با دامنه محدود و حذف اثر آنها را دارد. همچنین با اضافه نمودن عبارت Kr (که در آن r خطای تعقیب و K یک بهره مثبت است) به کنترلر ادمیتانس می‌توان این حاشیه تحمل را بیشتر نمود.

¹ Push Recovery
² Stability Margin
³ Single Support

ادمیتانس را می‌توان به صورت مستقیم (برپایه پارامترهای ادمیتانسی) نیز بیان نمود:

$$\begin{aligned} \dot{x}_d(s) &= \left(M_a s + B_a + \frac{D_a}{s} \right) f_d(s) \\ x_d(t) &= \int_0^t \dot{x}_d(v) dv \end{aligned} \quad (2)$$

رابطه (2) فرمی مشابه یک کنترلر PID دارد و پارامترهای کنترلی می‌تواند براساس سینماتیک و دینامیک کاربر تعیین شوند.

با توجه به آن‌که در برخی ربات‌های برون‌پوش توان‌افزا به جای استفاده از کنترلر موقعیت در لایه پایینی کنترل ادمیتانس [15,14]، امکان بهره‌گیری از کنترل نیرو و در نتیجه تعامل بهتر ربات با کاربر فراهم آمده است، لذا رویکرد دیگری که در طراحی کنترلر ادمیتانس برای سامانه‌های برون‌پوش می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، برپایه اعمال دینامیک معکوس می‌باشد. در این فرم از کنترلر ادمیتانس، برپایه رویکرد کنترل گشتاور مجازی⁶، ترم‌های نامطلوب (و یا به‌عبارت دیگر دینامیک نامطلوب) حذف و یک دینامیک مطلوب جایگزین آن می‌گردد. بدین ترتیب از منظر کاربر، ربات رفتار دینامیکی ظاهری‌ای همانند دینامیک مطلوب از خود نشان می‌دهد (شکل 3). البته لازم به ذکر است شرط تحقق این تغییر ادمیتانس، اندازه‌گیری نیروی تعاملی و نیز در دست داشتن مدل دقیقی از دینامیک ربات می‌باشد. عدم اندازه‌گیری نیروی تعاملی موجب می‌گردد امکان اصلاح اینرسی در دینامیک ظاهری ربات وجود نداشته باشد. همچنین در صورت استفاده از یک تقریب نادقیق از دینامیک معکوس سیستم در کنترلر، سیستم حلقه بسته رفتار دینامیکی متفاوت از دینامیک مطلوب را به نمایش می‌گذارد.

در رویکرد کنترل ادمیتانس برپایه حذف دینامیک معکوس ربات برخلاف کنترلر ادمیتانس، نقطه مرجعی برای تعقیب وجود ندارد. به عبارت صحیح‌تر در این رویکرد نقطه مرجع صفر بوده و برخلاف رویکرد ادمیتانسی که بر پایه پاسخ گذرای یک معادله دیفرانسیل همگن بنا نهاده شده است [17,16]، رفتار سیستم حلقه بسته برپایه پاسخ حالت ماندگار (جواب خصوصی یک معادله دیفرانسیل ناهمگن) توصیف می‌گردد.

$$u = \hat{M} \left(\frac{c}{m} \dot{q} + \frac{k}{m} q + \frac{1}{m} F_{int} \right) + V_M \dot{q} + C \dot{q} + G + f - F_{int} \quad (3)$$

دینامیک مطلوب

در این مقاله با اعمال تغییراتی در روش نخست ذکر شده، از این الگو به عنوان ساختار پایه در روش کنترل ادمیتانس استفاده می‌گردد.

در ربات‌های برون‌پوش کاربر-مسئول⁷، کاربر به‌عنوان منبع نیرو شناخته شده و لذا طبیعتی ادمیتانسی دارد. ربات نیز به‌صورت یک ادمیتانس که در تعامل با کاربر می‌باشد در نظر گرفته می‌شود. لذا در این دسته از ربات‌ها کنترل ادمیتانس بسیار به کار گرفته شده است. با توجه به آن‌که در این مقاله فرض شده است علاوه بر نیروی اعمالی از سوی کاربر، اغتشاش محیطی نیز به‌عنوان یک نیروی خارجی دیگر به ربات وارد می‌شود لذا در عمل با دو محیط سروکار داریم با این تفاوت که نحوه تعامل ربات با محیط دوم تغییر کرده و این بار ربات به‌عنوان منبع نیرو در نقش ادمیتانسی ظاهر می‌گردد. عامل محیطی (تولید اغتشاش) نیز از نظر سینماتیکی مقید فرض شده و طبیعتاً رفتاری ادمیتانسی دارد. این توصیف مشابه رفتار تعاملی ربات و کاربر در ربات‌های برون‌پوش ربات-مسئول نظیر ربات‌های توان‌بخش می‌باشد.

در روش‌های کلاسیک کنترل به دنبال تعقیب دقیق نقطه مرجع همراه با

حلقه فیدبک منفی می‌باشد، در کنترلرهای طراحی شده برای آن‌ها تاکنون، صرفاً به نحوه تعامل ربات و کاربر پرداخته شده و راهکاری برای مقابله و یا ارائه عکس‌العملی مناسب در مواجهه با نیروهای اغتشاشی وارده به ربات ارائه نگردیده است. در یک انسان فیدبک برخورد حس لامسه و یا درد می‌باشد و بدین وسیله کاربر از برخورد با مانع آگاه شده و از خود عکس‌العمل نشان می‌دهد، حال آن‌که در یک ربات برون‌پوش با توجه به محدودیت‌های هپتیک، این فیدبک می‌بایست به طریقی دیگر به کاربر منتقل شود. شرایطی را در نظر بگیرید که در آن پای ربات در حین تعقیب پای کاربر، به مانعی برخورد کند. با توجه به آن‌که غالب ربات‌ها آنتروپومورفیک¹ بوده و کاربر به صورت نسبتاً محکم به ربات بسته می‌شود، در صورتی که کاربر فیدبکی از مانع مذکور دریافت نکند بدون اصلاح ترجکتوری‌های مفاصل، به اعمال نیروی تعاملی به ربات ادامه می‌دهد که این خود می‌تواند ناپایداری مجموعه ربات و کاربر را به ویژه در ربات‌های توان‌افزا به همراه داشته باشد (شکل d-1). در برخی از ربات‌ها یا قابلیت برگشت‌پذیری² وجود ندارد که طبیعتاً موجب می‌گردد ربات عکس‌العملی در برابر اغتشاش وارده از خود نشان ندهد و یا در صورت وجود این ویژگی و نیز استفاده از کنترلر نیرو در لایه پایینی سیستم کنترلی، امپدانس مکانیکی ربات (ذاتاً) بالا می‌باشد که سبب می‌گردد دامنه عکس‌العمل ربات بسیار کوچک باشد. حتی در صورتی که ربات از امپدانس پایینی برخوردار باشد، هیچ تضمینی برای نمایش رفتاری مناسب از سوی ربات در برابر اغتشاش وارده وجود ندارد. ممکن است ربات به‌دلیل امپدانس کم سیستم حلقه بسته در مواجهه با مانع، انحراف شدید و ناگهانی از خود نشان دهد (شکل c-1). در صورتی که کاربر به‌صورت مستقیم فیدبکی از اغتشاش دریافت نکرده باشد، ممکن است فرصت کافی برای نشان دادن عکس‌العملی متناسب و حفظ پایداری خود نداشته باشد.

با توجه به خلاء ذکر شده، در این مقاله به ارائه بستر و راهکاری برای پیاده‌سازی یک کنترلر مناسب در برابر اغتشاشات محیطی در یک ربات برون‌پوش در عین تأمین دینامیک مطلوب ربات در برابر نیروی تعاملی وارده از سوی کاربر پرداخته می‌شود. این رویکرد به ویژه برای ربات‌های برون‌پوش توان‌افزا³ کاربرد دارد.

2- کنترل ادمیتانس

راهکار مرسوم که برای پیاده‌سازی این رویکرد کنترلی وجود دارد عبور نیروی تعاملی از یک نگاشت ادمیتانسی⁴ مطلوب در لایه بالایی کنترلر و تعقیب مسیر حرکتی حاصله در لایه پایینی کنترلر می‌باشد (شکل 2). این رویکرد کنترلی غالباً در سیستم‌هایی کاربرد دارد که از کنترل موقعیت برای کنترل عملگر استفاده می‌شود و دینامیک مطلوب سیستم نیز رفتاری خطی از خود به نمایش می‌گذارد.

در [14,5]، به دو رویکرد برای پیاده‌سازی کنترل ادمیتانس اشاره شده است. در نخستین رویکرد، از یک رابطه که برپایه مشخصات امپدانس⁵ تعریف شده برای تولید سیگنال مرجع استفاده می‌شود:

$$x_d(s) = \frac{1}{M_i s^2 + B_i s + D_i} f_d(s) \quad (1)$$

معادله (1) یک فیلتر ادمیتانسی می‌باشد. مشخصات امپدانس اعضای کاربر و داده‌های بیومکانیکی می‌توانند در انتخاب مقادیر درست برای اینرسی و میرایی در معادله (1) به طراح کمک کنند. از منظری دیگر رابطه

¹ Anthropomorphic

² Back-drivability

³ Augmentation Exoskeleton

⁴ Admittance Mapping

⁵ Impedance Characteristics

⁶ Computed Torque Control

⁷ User-in-Charge

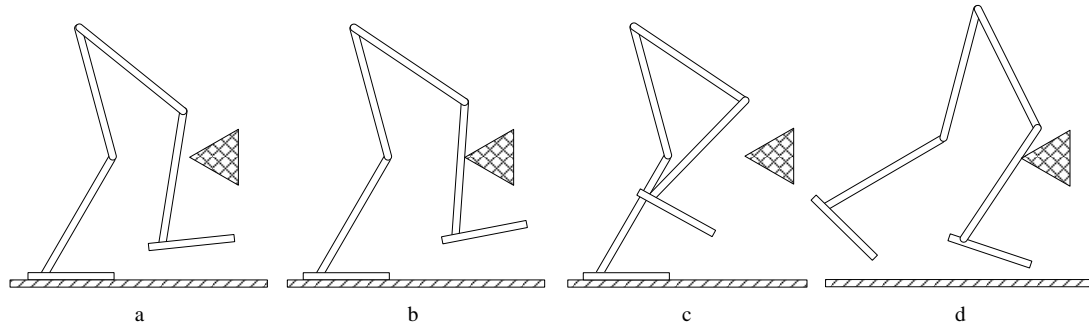


Fig. 1 The robot leg posture a) before impact b) at the impact time c) after impact in the presence of an admittance controller designed based on the inverse dynamics of the robot d) after impact in the presence of an ideal position controller as the lower level of the admittance controller

شکل 1 a) وضعیت پای ربات پیش از برخورد b) در لحظه برخورد c) پس از برخورد در حضور کنترلر ادیتمانس مبتنی بر معکوس دینامیک سیستم d) پس از برخورد در حضور کنترلر موقعیت ایده‌آل در لایه پایین کنترلر ادیتمانس

به کاربر و محل اعمال اغتشاش می‌باشد.

نخستین گام در طراحی یک کنترلر ادیتمانس، انتخاب ادیتمانس و یا دینامیک مطلوب می‌باشد که کنترلر می‌بایست از ربات به نمایش گذارد. اگرچه در این زمینه تحقیقات بسیاری انجام پذیرفته شده است، اما از آنجا که این موضوع خارج از محدوده این پژوهش می‌باشد، از یک فرم عام برای نمایش آن استفاده می‌گردد. همان‌طور که ذکر گردید از میان دو رویکرد

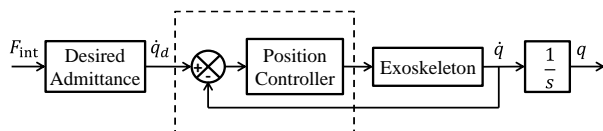


Fig. 2 The conventional structure of the admittance controller

شکل 2 ساختار کلاسیک کنترلر ادیتمانس برپایه حلقه داخلی کنترلر موقعیت

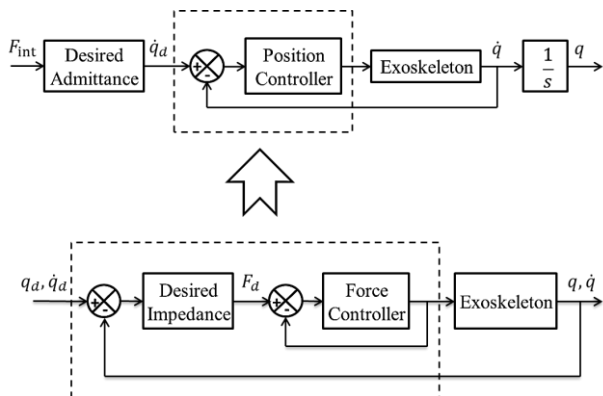


Fig. 3 The combination of the admittance and impedance control methods in the proposed controller

شکل 3 نحوه ترکیب کنترلر ادیتمانس و امپدانس در کنترلر پیشنهادی

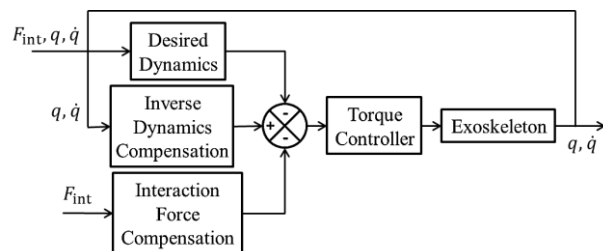


Fig. 4 The structure of the admittance controller based on the dynamics inverse

شکل 4 ساختار کنترلر ادیتمانس مبتنی بر دینامیک معکوس

حذف و یا کاهش حداکثری اثر اغتشاش هستیم. در حالی که با توجه به توضیحات ذکر شده در بخش 1، هدف کنترلی در ربات‌های برون‌پوش مدنظر می‌بایست متفاوت باشد. در این‌جا می‌بایست مسیر سینماتیکی مرجع، تعقیب گردد در حالی که اثر اغتشاش تا حد مطلوبی در خروجی سیستم، کنترل (و نه حذف) گردد. در ادامه برای پیاده‌سازی این استراتژی کنترلی متفاوت، کنترلر ادیتمانسی با ساختاری کاملاً متفاوت پیشنهاد می‌گردد.

همانند کنترلر ادیتمانس نوع 1 این روش کنترلی از ساختاری چند لایه بهره می‌برد. همان‌طور که در "شکل 4" نشان داده شده است، در لایه بالایی، نیروی تعاملی اندازه‌گیری شده از ادیتمانس مطلوب عبور کرده و مسیر سینماتیکی مرجعی را به دست می‌دهد. در لایه پایینی به جای یک کنترلر موقعیت و یا خطی‌ساز فیدبک از یک کنترلر امپدانس برپایه دینامیک معکوس استفاده می‌گردد. همچنین نقطه تعادل به صورت مسیر سینماتیکی مرجع به دست آمده از لایه بالایی تعریف می‌گردد. در این لایه، در صورت اعمال اغتشاش، ربات برپایه یک دینامیک مطلوب از مسیر تعادل خارج شده و مسیر سینماتیکی دیگری را می‌پیماید. در صورت حذف اغتشاش، کنترلر ربات را دوباره بر روی مسیر تعادل باز می‌گرداند.

با نگاهی کلی به این ساختار کنترلی مشاهده می‌شود که با یک ترکیب از کنترلرهای ادیتمانس و امپدانس روبه‌رو هستیم (شکل 4). برای ارائه یک دینامیک مطلوب در برابر نیروی تعاملی وارد شده به ربات، کنترلر پیشنهادی همانند یک کنترلر ادیتمانس ظاهر می‌شود، در حالی که برای کنترل بازخورد (رفتار) سیستم در برابر اغتشاش، کنترلر پیشنهادی عملکردی همانند یک کنترلر امپدانس را به نمایش می‌گذارد. نحوه برخورد با اغتشاش و تعریف لایه کنترلی سطح پایین به این صورت در واقع الهام گرفته از استراتژی کنترلی در ربات‌های توان‌بخشی می‌باشد.

3- طراحی کنترلر مرتبه یک

به منظور پیاده‌سازی این کنترلر، فرض می‌شود دینامیک ربات به صورت زیر باشد:

$$M(q)\ddot{q} + V_M(q, \dot{q})\dot{q} + C\dot{q} + G(q) + f(q, \dot{q}) = u + J_1^T d + J_2^T F_{int} \quad (4)$$

که در آن M ماتریس اینرسی، V_M ماتریس بیان‌کننده گشتاور حاصل از گریز از مرکز و کوریولیس، C میرایی لزجی سیستم و f اصطکاک حاکم بر حرکت باشد. G نیز نمایش‌دهنده گشتاور گرانشی است. u گشتاور موتورها و نیروی تعاملی وارد از سوی کاربر و d اغتشاش وارد به ربات می‌باشد. همچنین J_1 و J_2 به ترتیب بیانگر ماتریس‌های ژاکوبین در نقاط اتصال ربات

کاربر شود.

$$u = M \left[\ddot{q}_d - \left(\frac{c_{dist}}{m_{dist}} \dot{e} + \frac{k_{dist}}{m_{dist}} e \right) \right] + V_M q + C_q + G + f - J^T F_{int} \quad (10)$$

بنابراین دینامیک حلقه بسته (شکل 5) به صورت زیر در می‌آید:

$$\ddot{e} + \frac{c_{dist}}{m_{dist}} \dot{e} + \frac{k_{dist}}{m_{dist}} e = M^{-1} J_2^T d \quad (11)$$

4- استخراج رفتار کنترلی از منظری متفاوت

در این بخش نخست به بررسی عملکرد کنترلی پیشنهادی به کمک تابع لیاپانوف پرداخته و سپس کنترلی مشابه کنترلی بالا و برپایه روش کنترلی گشتاور محاسبه شده ارائه می‌شود. در پایان هم ارزی این دو کنترلی نشان داده می‌شود. لازم به ذکر است از آنجا که در این مقاله هدف اثبات پایداری در حضور اغتشاش نمی‌باشد، لذا بررسی پایداری سیستم از منظر تئوری لیاپانوف نتیجه‌ای جدید در بر نداشته و صرفاً نحوه همگرایی عملکرد تعقیب در مواجهه با یک اغتشاش را به نمایش می‌گذارد.

4-1- بررسی عملکرد تعقیب سیستم به کمک تئوری لیاپانوف

تابع لیاپانوف زیر را در نظر بگیرید:

$$V = \frac{1}{2} r^2 \quad (12)$$

با مشتق‌گیری از تابع فوق و جایگذاری رابطه (4) در آن خواهیم داشت:

$$\dot{V} = r^T [-M^{-1}(u + J_1^T F_{int} + J_2^T d - V_M \dot{q} - C \dot{q} - G - f) + \dot{q}_d + \lambda \dot{q}] \quad (13)$$

جایگذاری کنترلی پیشنهادی با معادله (7) در رابطه \dot{V} ، آن را به صورت زیر ساده می‌کند:

$$\dot{V} = r^T \left[- \left(\frac{c_{dist}}{m_{dist}} \dot{e} + \frac{k_{dist}}{m_{dist}} e \right) + \lambda \dot{e} - M^{-1} J_2^T d \right] \quad (14)$$

رابطه فوق مقدار تابع \dot{V} را در حضور اغتشاش به دست می‌دهد. نکته بسیار مهمی که باید بدان اشاره شود آنست که در اینجا هدف بررسی پایداری سیستم از منظر ورودی به متغیر حالت نمی‌باشد؛ چرا که چنین موضوعی در صورت معتبر بودن سبب می‌گردد که سیستم حتی در برابر ورودی اعمال شده نیز پایدار و یا کراندار¹ بوده و در نتیجه اثر اغتشاش در خروجی به تدریج کاهش و حذف گردد (به رغم آنکه اغتشاش همچنان به سیستم اعمال می‌شود) و لذا سیستم حلقه بسته (8) نسبت به ورودی اغتشاش حساس نخواهد بود تا کاربر بتواند بازخورد شفافی از اغتشاش وارده را احساس نماید، حال آنکه این مقاله به دنبال بررسی پاسخ‌گذاری سیستم می‌باشد. به عبارت دیگر با در نظر گرفتن سیستم دینامیکی ربات به صورت یک سیستم خودگردان، به بررسی سرعت همگرایی آن در غیاب اغتشاش پرداخته و در ادامه با مقایسه تابع لیاپانوف و مشتق آن در دو سیستم خودگردان² (حاصل از دو کنترلی پیشنهادی)، مشابهت‌های این دو سیستم از منظر همگرایی بررسی گردد. بدین منظور، نخست می‌بایست نحوه حضور اغتشاش (ضریب عبارت اغتشاش) در تابع \dot{V} را مقایسه نموده و سپس تابع \dot{V} (سرعت همگرایی) را در غیاب آن بررسی نمود.

در نگاه نخست به نظر می‌رسد رابطه (14) را نمی‌توان مختصرتر بیان نمود، در بخش بعد این موضوع بررسی شده و نشان داده می‌شود که می‌توان آن را همراه با ساده نمودن، برحسب متغیر r نیز نمایش داد، اگرچه نتیجه‌ای که در این مقاله از آن استفاده گردد به‌دست نمی‌دهد. زیرا همان‌طور که ذکر

پایده‌سازی کنترل ادمیتانس، رویکرد کلاسیک (مبتنی بر حلقه داخلی کنترل موقعیت) انتخاب می‌گردد. لذا برای به دست آوردن مسیر مرجع می‌بایست در هر لحظه پاسخ یک/چند معادله دیفرانسیل ناهمگن به‌دست آید (در حوزه زمان) و یا نیروی تعاملی از میان یک فیلتر ادمیتانسی عبور نموده و مسیر (سینماتیکی) مرجع را به‌دست دهد. البته استفاده از روش فیلتر ادمیتانسی، منوط به انتخاب ادمیتانس مطلوب در فرم خطی و یا شبه‌خطی (ماتریس‌های دینامیکی تابع q و \dot{q}) می‌باشد.

فرض کنید در غیاب اغتشاش، دینامیک مطلوب ربات به‌صورت زیر بیان شود:

$$m \ddot{q}_d + c \dot{q}_d + k q_d = J^T F_{int} \quad (5)$$

لذا تحت اثر نیروی F_{int} ، مسیر سینماتیکی به دست آمده از این دینامیک به عنوان ورودی مرجع کنترلی سطح پایین در نظر گرفته می‌شود. غالباً کمیت سرعت سیستم بیان‌کننده این مسیر سینماتیکی می‌باشد [16]. در حوزه فرکانس ادمیتانس مطلوب را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

$$\frac{v_d(s)}{F_{int}(s)} = \frac{1}{ms + c + \frac{k}{s}} \quad (6)$$

که در آن s متغیر تبدیل لاپلاس می‌باشد. موقعیت زاویه‌ای مطلوب از انتگرال سرعت زاویه‌ای به دست می‌آید. با طراحی لایه کنترلی سطح بالا و تعیین خروجی آن، می‌توان کنترلی سطح پایین را طراحی نمود. با پیروی از روش کنترل امپدانس برپایه معکوس دینامیک، سیگنال کنترلی به‌صورت زیر طراحی می‌گردد:

$$u = M \left[\ddot{q}_d - \left(\frac{c}{m} \dot{e} + \frac{k}{m} e \right) \right] + V_M q + C_q + G + f - J^T F_{int} \quad (7)$$

که در آن $e = q_d - q$ می‌باشد. با اعمال این سیگنال کنترلی به دینامیک سیستم (معادله (4)(4))، معادله سیستم حلقه بسته به‌صورت زیر در می‌آید:

$$\ddot{e} + \frac{c}{m} \dot{e} + \frac{k}{m} e = -M^{-1} J_2^T d \quad (8)$$

همان‌طور که از معادله (8) نتیجه می‌شود، در غیاب اغتشاش، سیستم حلقه بسته مسیر مرجع را دنبال کرده و با بدان همگرا می‌شود. به عبارت دیگر $\dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d$ نقش مسیر تعادلی را برای سیستم حلقه بسته (8) ایفا می‌کند. همچنین در حضور اغتشاش، سیستم از مسیر تعادل خود منحرف شده و مسیر دیگری را طی می‌کند. با توقف اغتشاش، به دلیل پایداری دینامیک (یا ادمیتانس) مطلوب، سیستم حلقه بسته پس از مدتی دوباره مسیر مرجع را دنبال می‌کند.

در طراحی ارائه شده در بالا از یک دینامیک برای کنترل ادمیتانس و امپدانس استفاده گردید. به عبارت دیگر فرض شده است ربات (سیستم حلقه بسته) رفتار دینامیکی مشابهی از خود در برابر نیروی تعاملی و اغتشاش نشان می‌دهد، حال آن‌که این موضوع مغایر با رفتار دوگانه مدنظر است. برای حل این چالش، از دو دینامیک متفاوت در لایه بالایی و پایینی کنترلی ادمیتانس استفاده می‌شود. در لایه بالایی، دینامیک (یا ادمیتانس) مطلوب به‌صورت زیر فرض می‌شود:

$$m_{int} \ddot{q}_d + V_{m,int} \dot{q}_d + c_{int} \dot{q}_d + k_{int} q_d = J^T F_{int} \quad (9)$$

با توجه به هدف ربات برون‌پوش، دینامیک مربوطه می‌بایست امپدانس پایینی را از خود به نمایش گذارد. در لایه پایینی (کنترلر امپدانس) از دینامیکی کاملاً متفاوت (یا امپدانس نسبتاً بالا) استفاده می‌گردد تا از یک سو در برابر اغتشاش وارده، سینماتیک ربات تغییر کند و از سوی دیگر این تغییر چندان بزرگ نباشد که خود سبب ایجاد چالشی جدی در هدایت ربات توسط

¹ Ultimate Bounded
² Autonomous System

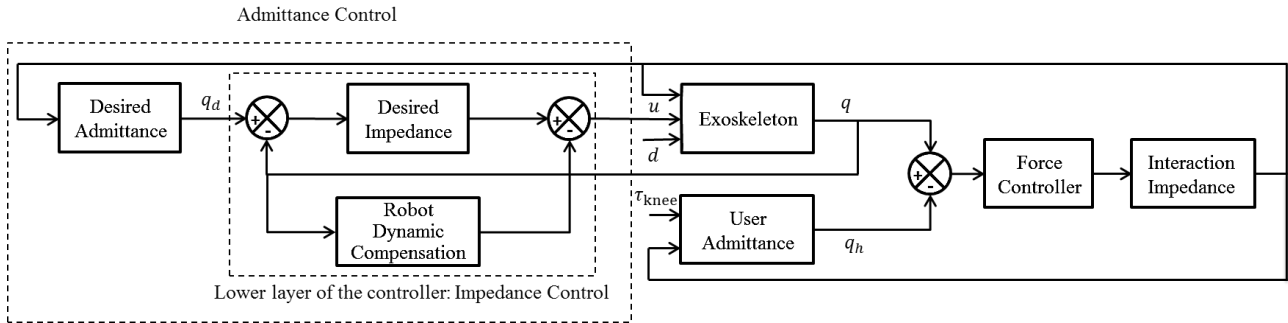


Fig. 5 The schematic layout of the proposed controller

شکل 5 ساختار کنترلر پیشنهادی

$$\dot{r} = -Kr - \lambda_3^2 e = -\lambda_1 r - \lambda_3^2 e \quad (19)$$

بر پایه تعاریف (15) و (16) و روش کنترلی مود لغزشی مرتبه یک،

کنترلی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$u = +M\ddot{q}_d - (V_M\dot{q} + C\dot{q} + G + f) - J_1^T F_{int} + M[(\lambda_1 + \lambda_2)\dot{e} + \lambda_1\lambda_2 e + \lambda_3^2 e] \quad (20)$$

توجه شود سه ترم نخست کنترلی تعریف شده مشابه کنترلی قبلی بوده و تنها بخش بیان‌کننده دینامیک حلقه بسته در این دو کنترلی در ظاهر متفاوت است. حال تابع لیاپانوف زیر را در نظر بگیرید:

$$V = \frac{1}{2} r^2 \quad (21)$$

مشتق تابع لیاپانوف برابر خواهد بود با:

$$\dot{V} = r^T \dot{r} = r^T [\dot{q}_d + \lambda_2 \dot{e} - M^{-1}(u + J_1^T F_{int} + J_2^T d - V_M \dot{q} - C\dot{q} - G - f)] \quad (22)$$

با جایگذاری معادله (20) در (22) عبارت \dot{V} به صورت زیر ساده خواهد شد:

$$\dot{V} = r^T \dot{r} = r^T [-M^{-1}J_2^T d - \lambda_1 r - \lambda_3^2 e] \quad (23)$$

در صورتی که بخواهیم رابطه فوق را برحسب پارامترهای دینامیک

مطلوب بازنویسی کنیم، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= r^T [-M^{-1}J_2^T d - \lambda_1(\dot{e} + \lambda_2 e) - \lambda_3^2 e] \\ &= r^T [-M^{-1}J_2^T d - (\lambda_1 + \lambda_2)\dot{e} - (\lambda_1\lambda_2 + \lambda_3^2)e + \lambda_2\dot{e}] \\ &= r^T \left[-M^{-1}J_2^T d - \frac{c_{dist}}{m_{dist}}\dot{e} - \frac{k_{dist}}{m_{dist}}e + \lambda_2\dot{e} \right] \end{aligned} \quad (24)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود تابع لیاپانوف و تابع مشتق آن مشابه توابع به‌دست آمده در رویکرد کنترلی قبل است. لذا می‌توان این دو کنترلی را هم‌ارز نامید. به عبارت دیگر طراحی کنترلی برپایه دینامیک معکوس را می‌توان همانند یک کنترلی مود لغزشی بدون در نظر گرفتن ترم قوام آن دانست. البته اثبات این هم‌ارزی به کمک نگارش سیستم حلقه بسته برای این رویکرد و مقایسه آن با تابع حلقه بسته رویکرد کنترلی یک نیز امکان‌پذیر است که انجام آن بر عهده خواننده گذاشته می‌شود.

5- انتخاب ضرایب

نکته قابل توجه در معادله (11) آنست که به دلیل عدم اندازه‌گیری مقدار اغتشاش، امکان حذف M که به صورت ضریب تأثیر اغتشاش در معادله سیستم حلقه بسته ظاهر می‌شود و نیز تغییر اینرسی، وجود ندارد. در این حالت از منظر سیستم حلقه بسته (11)، اثر اغتشاش (فارغ از دینامیک حلقه بسته) حداقل به میزان $\lambda_{\min}(M^{-1})$ تضعیف می‌گردد. لازم به ذکر است که می‌توان به کمک یک رویکرد مناسب نظیر رویکرد مود لغزشی¹ [20,19]، اغتشاش را تخمین زد که از این موضوع در این مقاله به جهت عدم نیاز به

شد هدف از استفاده از تئوری لیاپانوف در این مقاله اثبات پایداری سیستم در حضور اغتشاش نمی‌باشد.

4-2- استخراج کنترلی پیشنهادی بر پایه رویکردی متفاوت

همان‌طور که ذکر شد این کنترلی برپایه یک کنترلی امیدانس پیشنهاد شده است که در حلقه داخلی آن از یک کنترلی امیدانس مبتنی بر دینامیک معکوس ربات بهره گرفته شده است. اما این کنترلی پیشنهادی را می‌توان از منظری دیگر نیز بررسی نمود. سیستم کنترلی حلقه بسته‌ای در نظر بگیریم که در آن از کنترلی گشتاور محاسبه شده (و یا یک کنترلی مود لغزشی بدون در نظر گرفتن ترم مقاوم آن) استفاده شده باشد. برای طراحی چنین کنترلی ابتدا می‌بایست خطای فیلتر شده تعقیب (r) را تعریف نمود.

$$r = \dot{e} + \lambda e \quad (15)$$

حال می‌توان دینامیک مود لغزش را تعریف نمود. غالباً این دینامیک

همانند روش کنترلی مود لغزشی مرتبه اول، به صورت یک دینامیک ساده مرتبه یک در نظر گرفته می‌شود:

$$\dot{r} = -Kr \quad (16)$$

اما در ادامه همان‌طور که خواهیم دید، در این مقاله دینامیک تعقیب به صورت ترکیبی از توابع خطا (e) و خطای تعقیب (r) تعریف می‌گردد. در روابط (15) و (16) بهره‌های K و λ می‌بایست ترم‌هایی مثبت (و یا مثبت معین) انتخاب شوند تا دو دینامیک مربوطه پایدار باشند. در کنترلی پیشنهادی در رویکرد نخست نیز ماتریس‌های k_{dist}/m_{dist} و c_{dist}/m_{dist} می‌بایست به گونه‌ای تعریف شوند که سیستم حلقه بسته سطح پایین (امیدانس مطلوب) را پایدار نمایند؛ به عبارت دیگر ریشه‌های امیدانس مطلوب باید دارای جزء حقیقی منفی باشند. با فرض پایداری امیدانس مطلوب، ریشه‌های این دو معادله، به صورت دو عدد حقیقی منفی و یا دو عدد مزدوج با قسمت‌های حقیقی منفی مشابه ظاهر می‌شوند. شریفی و همکاران در [18] پیشنهاد دادند که از ریشه‌های امیدانس مطلوب در تعریف معادلات دیفرانسیل خطای تعقیب و نیز دینامیک مدل مرجع استفاده شود.

$$\begin{aligned} \ddot{e} + \frac{c_{dist}}{m_{dist}}\dot{e} + \frac{k_{dist}}{m_{dist}}e &= \left(\frac{d}{dt} + \lambda_1 - i\lambda_3 \right) \left(\frac{d}{dt} + \lambda_2 + i\lambda_3 \right) e \end{aligned} \quad (17)$$

که در آن λ_1 ، λ_2 و λ_3 مقادیری غیرمنفی دارند. در صورتی که $\lambda_3 \neq 0$ به دست آید، می‌بایست شرط $\lambda_1 = \lambda_2 < 0$ نیز رعایت شود. با فرض آن که $|\lambda_1| \geq |\lambda_2|$ باشد، خطای تعقیب فیلتر شده r به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$r = \dot{e} + \lambda e = \dot{e} + \lambda_2 e \quad (18)$$

و نیز

¹ Sliding Mode Observer

تابع گسسته در انتگرالده^۲، مشتق‌پذیری تابع خروجی انتگرال و در نتیجه نرم‌تر^۳ بودن سیگنال کنترلی را سبب می‌شود. با جایگذاری این کنترلر در معادله دینامیک ربات، دینامیک حلقه بسته به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\ddot{e} + \beta_1 r_1 + \beta_2 \left(1 + \frac{\lambda_3^2}{\beta_2}\right) r_2 + \lambda_2 \dot{e} = -MJ_2^T d \quad (26)$$

و یا

$$\ddot{e} + (\beta_1 + \lambda_2) \dot{e} + (\beta_1 \lambda_2 + \lambda_3^2) e + (\beta_2 + \lambda_3^2) \int_0^t r_1 dt = -MJ_2^T d \quad (27)$$

با فرض آنکه در زمان آغاز $e = 0$ باشد،

$$\ddot{e} + (\beta_1 + \lambda_2) \dot{e} + (\beta_1 \lambda_2 + \beta_2 + \lambda_3^2) e + \lambda_2 (\beta_2 + \lambda_3^2) \int_0^t e dt = -MJ_2^T d \quad (28)$$

در صورتی که ضرایب کنترلر به صورت زیر در نظر گرفته شوند:

$$\beta_1 = \lambda_1 + \lambda_2, \beta_2 = \lambda_1 \lambda_2 \quad (29)$$

رابطه (28) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\ddot{e} + (\lambda_1 + 2\lambda_2) \dot{e} + (2\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2) e + \lambda_2 (\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_3^2) \int_0^t e dt = -MJ_2^T d \quad (30)$$

رابطه (30)، یک معادله دیفرانسیل خطی با ضرایب ثابت می‌باشد؛ لذا می‌توان با در نظر گرفتن $MJ_2^T d$ به عنوان ورودی سیستم حلقه بسته، آن را در فضای s بازنویسی کرده و ساده نمود:

$$\frac{e(s)}{D(s)} = \frac{s}{(s + \lambda_1 + \lambda_3 i)(s + \lambda_2 - \lambda_3 i)(s + \lambda_2)} = \frac{1}{\left(s^2 + \frac{c_{dist}}{m_{dist}} s + \frac{k_{dist}}{m_{dist}}\right) s + \lambda_2} \quad (31)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه فوق را می‌توان همانند دینامیک سیستم حلقه بسته به ازای کنترلر مرتبه یک (بخش 3) دانست که از یک فیلتر بالاگذر عبور کرده است. در صورتی که قطب این فیلتر بر روی مبدأ تنظیم گردد، دینامیک سیستم کاهش یافته و تبدیل به سیستم حلقه بسته با کنترلر مرتبه یک می‌گردد. با حرکت قطب بر روی نیمه منفی محور حقیقی، فیلتر محتوای فرکانس پایین سیگنال را تضعیف کرده و در نتیجه دینامیک حلقه بسته، زمان‌های برخاست کوچک‌تر و فراجش‌هایی با دامنه کمتر را تجربه خواهد کرد.

7- شبیه‌سازی

در این بخش به منظور ارزیابی عملکرد کنترلر پیشنهادی و صحت‌گذاری نتایج به‌دست آمده از تئوری، شبیه‌سازی بر روی پای یک ربات برون‌پوش در حالت آویزان صورت می‌پذیرد. بدون از دست دادن کلیت موضوع، مدل شبیه‌سازی، یک پای ربات برون‌پوش با دو درجه آزادی در لگن و زانو در نظر گرفته می‌شود. دلیل آن که مفصل مچ در نظر گرفته نشده است آنست که در برخی از ربات‌ها، این مفصل غیرفعال می‌باشد.

در سیستم توصیف شده، ربات آنتروپومورفیک^۴ فرض شده و در نقاطی از کمر، ساق و ران به پای کاربر متصل می‌گردد. همچنین نقطه اتصال کمر به عنوان چهارچوب مرجع در نظر گرفته می‌شود. با توجه به درجه آزادی در نظر گرفته شده برای مفصل لگن، حرکت پا محدود به صفحه سجیتال^۵ خواهد بود. هر مفصل مجهز به عملگری می‌باشد تا گشتاور لازم به ربات را اعمال

ارائه دقیق یک رفتار دینامیکی در برابر اغتشاش صرف‌نظر می‌شود. تخمین اغتشاش سبب می‌گردد بتوان دینامیک حلقه بسته را به‌صورت کامل تغییر داده و ماتریس M را نیز از معادله حلقه بسته به‌صورت کامل حذف نمود. همچنین باید توجه نمود که پیاده‌سازی این رویکرد کنترلی تنها در ربات‌های برون‌پوش برگشت‌پذیر با قابلیت کنترل نیرو امکان‌پذیر است.

چالش موجود در مسیر بهره‌گیری از این روش کنترلی پیشنهادی، تعیین پارامترهای کنترلی در معادلات (5) و (11) می‌باشد. اگرچه روش‌های متعددی نظیر [21,4] برای تعیین بهینه ضرایب ادمیتانسی پیشنهاد شده‌اند، اما به دلیل آن‌که زمانی که از اغتشاش سخن به میان می‌آید با یک منبع واحد تولید اغتشاش با یک رفتار دینامیک مشخص سروکار نداریم، لذا امکان تعیین بهینه ضرایب امیدانسی برخلاف حالت قبل وجود ندارد. تنها رویکردهای موجود در این زمینه را می‌توان به روش‌های تعیین ضرایب PID نظیر زیگلر-نیکولز و موارد مشابه نظیر [5] با هدف بهبود پاسخ گذرای سیستم در مواجهه با یک اغتشاش پله دانست. اگرچه مواجهه با این نوع اغتشاش چندان دور از ذهن نمی‌باشد، اما نمی‌تواند تمامی مدل‌های کلی این سیگنال را پوشش دهد. لذا در این زمینه تنها می‌توان به این نکات بسنده کرد که در رابطه (11) پارامتر m_{dist} به صورت معکوس به صورت یک ضریب کاهش تأثیر در دامنه اغتشاش d اثر می‌کند. پارامتر c_{dist} در زمان نشست سیستم تأثیر دارد؛ لذا می‌بایست چندان کوچک در نظر گرفته نشود. همچنین ضریب میرایی و سختی سیستم (c_{dist}, k_{dist}) نیز باید به گونه‌ای طراحی گردند که پاسخ تا حد امکان به دور از فراجشی با دامنه بزرگ باشد. انتخاب نسبت k_{dist}/m_{dist} می‌بایست به گونه‌ای باشد که از یک سو دامنه پاسخ به اغتشاشات وارده نه آنچنان زیاد باشد که حذف آن برای کاربر سبب ایجاد ناراحتی کند و نه آنچنان کم که کاربر درکی از اغتشاش محیطی وارده نداشته باشد. رسیدن به یک میرایی بحرانی می‌تواند معیاری مناسب برای تعیین این پارامتر باشد.

6- طراحی کنترلر مرتبه دو

هم‌ارزی نشان داده شده در بخش 5، این ایده را به دست می‌دهد تا در صورتی که در کنار هدف کنترلی ذکر شده، حذف سریع‌تر پاسخ گذرا نیز مدنظر باشد بتوان از مراتب بالاتر رویکرد کنترلر مود لغزشی استفاده نمود. یکی از روش‌های رایج در این میان کنترلر مود لغزشی مرتبه دو برپایه الگوریتم فرا-پیچش^۱ است. در این بخش، از این رویکرد کنترلی استفاده نموده و اثر آن بر روی دینامیک حلقه بسته (نسبت به رویکرد 1) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

کنترلر مرتبه دو زیر را در نظر بگیرید:

$$u = M\ddot{q}_d + (V_M \dot{q} + C\dot{q} + G + f) - J_1^T F_{int} + M \left(\beta_1 r_1 + \beta_2 \left(1 + \frac{\lambda_3^2}{\beta_2}\right) r_2 + \lambda_2 \dot{e} \right) \quad (25)$$

که در آن $r_1 = r$ بوده و r_2 به صورت $\dot{r}_2 = \beta_2 r_1$ تعریف می‌شود که در آن β_2 یک بهره مثبت می‌باشد. این کنترلر مشابه کنترلر مود لغزشی فرا-پیچش می‌باشد، با این تفاوت که در دینامیک r_2 از تابع r_1 به جای $\text{sign}(r_1)$ استفاده شده است. دلیل این انتخاب آنست که این سیستم کنترلی به دنبال حذف فوری و یا سریع اثر اغتشاش نمی‌باشد و لذا استفاده از تابع $\text{sign}(r_1)$ که در این مورد به ازای مقادیر کوچک خطای تعقیب مؤثرتر عمل می‌کند ضرورتی ندارد. از سوی دیگر جایگزینی ترم پیوسته r_1 به جای

¹ Super-twisting

² Integrant

³ Smoother

⁴ Anthropomorphic

⁵ Sagittal Plane

توصیه می‌گردد، روش کنترلی پیشنهادی به این قید محدود نشده و امکان بهره‌گیری از زوج قطب‌های مزدوج به عنوان ریشه‌های دینامیک حلقه بسته و در نتیجه تعریف شاخص‌های بهینه‌سازی مختلف را نیز به دست می‌دهد. پیش از بررسی عملکرد کنترلرهای پیشنهادی، لازم است مختصری در

جدول 1 پارامترهای مدل ربات

مقدار	نماد	عنوان
3.783 (kgm)	X_1	ممان جرمی اول (لینک ران)
-0.160 (kgm)	Y_1	
2.055 (kgm)	X_2	ممان جرمی اول (لینک ساق)
0.0578 (kgm)	Y_2	
2.497 (kgm ²)	J_1	ممان اینرسی ران (در مرکز جرم)
0.891 (kgm ²)	J_2	ممان اینرسی ران (در مرکز جرم)
0.469 (m)	L_t	طول ران
0.468 (m)	L_s	طول ساق

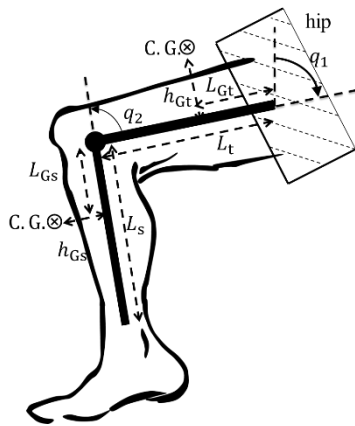


Fig. 6 The schematic of the robot model

شکل 6 شماتیک مدل ربات

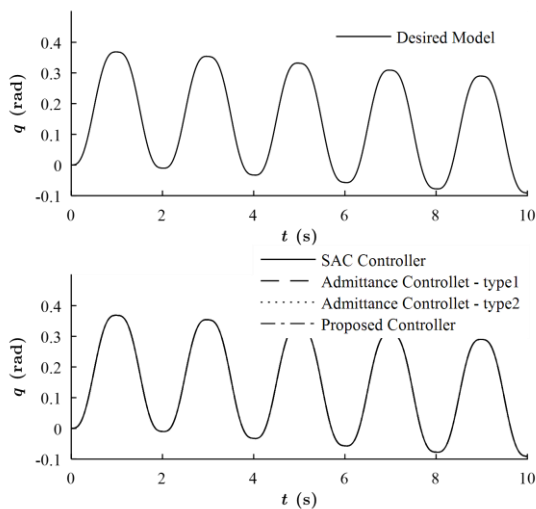


Fig. 7 The positions of the desired model and the robot using the different controllers

شکل 7 نمودار زاویه مفصل لگن ربات در برابر نیروی تعاملی

نماید.

فرض کنید که جرم ساق و ران ربات به ترتیب با m_s و m_t نمایش داده می‌شود. I_t و I_s نیز ممان اینرسی لینک‌های ران و ساق پای ربات نسبت به مرکز جرمشان باشند. L_t و L_s نیز بیانگر طول لینک ران و ساق و L_{Gt} و L_{Gs} موقعیت مرکز جرم ران به ترتیب در راستای لینک و عمود بر آن نسبت به مفصل لگن نشان می‌دهد (شکل 6). در مورد لینک ساق نیز، L_{Gs} و h_{Gs} موقعیت مرکز جرم را در راستای لینک و عمود بر آن نسبت به مفصل زانو نشان می‌دهد. معادلات دینامیکی حاکم بر پای آویزان، در [22] آورده شده است. در این مدل، ربات به صورت یک مدل خطی در پارامتر براساس شش پارامتر مستقل بیان شده است.

$$X_2 = m_s(L_s - L_{Gs}) \quad (32\text{-الف})$$

$$Y_2 = m_s h_{Gs} \quad (32\text{-ب})$$

$$X_1 = m_t(L_t - L_{Gt}) + m_s L_t \quad (32\text{-ج})$$

$$Y_1 = m_t h_{Gt} \quad (32\text{-د})$$

$$J_2 = I_s + m_s[(L_s - L_{Gs})^2 + h_{Gs}^2] \quad (32\text{-ه})$$

$$J_1 = J_2 + I_t + m_t[(L_t - L_{Gt})^2 + h_{Gt}^2] + m_s L_t^2 \quad (32\text{-و})$$

پارامترهای فوق در شبیه‌سازی حاضر، مشابه مقادیر ذکر شده برای ربات بلیکس¹ در [22] نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترها در جدول 1 آورده شده است.

به منظور تحلیل سیستم، در نقاط اتصال دو نیروی متناوب متشکل از ترکیب توابع هارمونیک به عنوان ورودی تعاملی به ران و ساق وارد می‌شود در حالی که دینامیک مطلوب به صورت ضریب یک‌دوم از دینامیک ربات (به جز ترم غیرخطی نیروی گرانشی) در نظر گرفته می‌شود. همچنین فرض می‌گردد که پا از حالت کاملاً صاف شروع به حرکت نماید. نیروی اعمالی از فیلتر ادمیتانس مطلوب عبور کرده و در هر لحظه متناسب با نیروی اعمالی، مسیر مطلوبی را به عنوان خروجی مدل (ادمیتانس) به دست می‌دهد. مسیرهای سینماتیکی مطلوب برای زاویه، سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای به ترتیب در "شکل 7، 8 و 9" برای مفصل لگن نشان داده شده است.

8- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به بررسی عملکرد کنترلر پیشنهادی در کنار روش‌های مرسوم کنترل ربات‌های کاربر-مسئول پرداخته می‌شود. کنترلرهای معیار در نظر گرفته شده در ادامه، کنترلر ادمیتانس برپایه حلقه داخلی کنترل موقعیت ایده‌آل (کنترل ادمیتانس نوع 1)، کنترلر ادمیتانس برپایه دینامیک معکوس ربات و کنترل نیروی ایده‌آل (کنترل ادمیتانس نوع 2) و کنترلر افزایش حساسیت² که در ربات بلیکس [23] به کار گرفته شده است، می‌باشد.

مقدار ضرایب c_{dist}/m_{dist} و k_{dist}/m_{dist} در کنترلر پیشنهادی به ترتیب برابر 8 و 16 در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است با توجه به آنکه در این مقاله معیاری برای تعیین یک پاسخ حالت گذرای مناسب در نظر گرفته نشده است، در انتخاب این ضرایب، بهینه‌سازی‌ای صورت نپذیرفته و ضرایب صرفاً به روش سعی و خطا و با هدف نمایش عملکرد کلی کنترلر انتخاب شده‌اند. در انتخاب این دو ضریب تنها معیاری که در نظر گرفته شد، آنست که سیستم حلقه بسته مرتبه 2 دارای میرایی بحرانی باشد تا در عین به حداقل رساندن نوسانات پاسخ در مواجهه با اغتشاش وارده، زمان نشست سیستم را حداقل نماید. اگرچه رعایت این معیار به ویژه از منظر راحتی کاربر

¹ BLEEX

² Sensitivity Amplification Control (SAC)

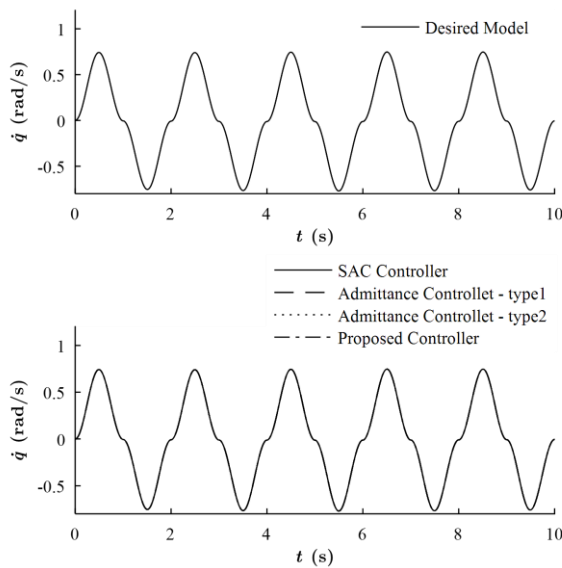


Fig. 8 The angular velocity of the hip joint generated by the interaction forces

شکل 8 سرعت زاویه‌ای مفصل لگن ربات در برابر نیروی تعاملی

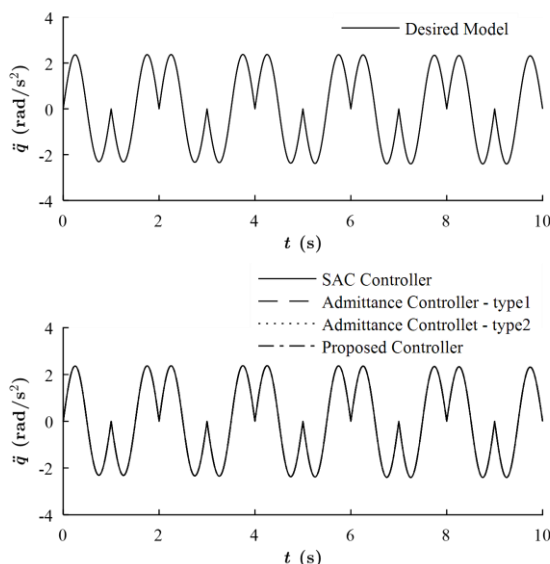


Fig. 9 The angular acceleration of the hip joint generated by the interaction forces

شکل 9 شتاب زاویه‌ای مفصل لگن ربات در برابر نیروی تعاملی

در صورت عدم آگاهی کاربر از اغتشاش وارده سبب عدم تعادل وی و ربات گردد. نمونه این اتفاق را می‌توان در برخورد پای آویزان ربات با مانع ثابت در نظر گرفت. در صورت بهره‌گیری از کنترلر افزایش حساسیت به عنوان روش کنترل ربات در تعامل با کاربر، همان‌طور که در "شکل 12 و شکل 13" مشاهده می‌شود اغتشاش نیز به همان میزان نیروی تعاملی تقویت می‌گردد. در صورت استفاده از یک کنترلر ادیمیتانس برپایه دینامیک معکوس (کنترلر ادیمیتانس نوع 2) نیز اگرچه ربات در برابر اغتشاش وارده از خود پاسخ نشان می‌دهد، اما رفتار دینامیکی پاسخ، مشابه دینامیک مطلوب ربات (با ضریب mM^{-1}) می‌باشد. به عبارت دیگر هر قدر در دینامیک مطلوب سعی گردد اثرات سختی فنریت و تا حدودی میرایی لزجی کاهش داده شود، این تغییر به صورت مستقیم خود را در نحوه برخورد با اغتشاش نیز نشان می‌دهد و لذا رفتار ربات در مواجهه با اغتشاش می‌تواند همراه با نوسانات زیاد و افست

مورد ماهیت اغتشاشاتی که ربات برون‌پوش در حین حرکت ممکن است با آنها مواجه گردد پرداخته شود. در میان مجموعه فازهای حرکتی دو پا در حین گام برداری یک فرد، غالباً پای آویزان به دلیل پیشرو بودن و نیز سرعت و جابه‌جایی زیاد آن در معرض اغتشاش قرار می‌گیرد. لذا در این مقاله دامنه مطالعه به اغتشاشات وارده به پای آویزان محدود می‌گردد.

با در نظر گرفتن این فرض، عموماً دو دسته مانع و عامل فیزیکی را می‌توان منشأ وارد شدن اغتشاش به پا دانست: نخست عواملی که سبب می‌گردند اغتشاش به صورت لحظه‌ای به پا اعمال شده و لذا بتوان نحوه اعمال نیرو را به صورت یک تابع ضربه در نظر گرفت. دسته دوم موانع ثابت موجود در مسیر حرکت می‌باشند. نحوه اعمال نیرو به ربات در صورت برخورد پای ربات به این دسته از موانع، وابسته به کنترلر مورد استفاده در لایه پایین سیستم کنترلی و نیز ساختار عملگرها دارد. برای نمونه در صورتی که کنترل‌کننده مذکور، یک کنترلر موقعیت ایده‌آل در نظر گرفته شود، پس از لحظه تماس اولیه، به رغم اعمال نیروی برخورد از سوی مانع، به دلیل افزایش گشتاور تولیدی، پای ربات همانند یک برخورد پلاستیک در تماس با مانع باقی مانده و کنترلر تلاش می‌کند تا حد توان عملگرها به مانع نیرو وارد نموده تا از آن عبور نماید. لذا اغتشاش را می‌توان به صورت یک تابع پیوسته و مانا در نظر گرفت. حال آنکه در صورتی که سیستم کنترل ربات، کنترلی ادیمیتانس مبتنی بر معکوس دینامیک سیستم بوده و یا عملگرهای ربات برگشت‌پذیر باشند، برخورد ماهیتی شبه‌الاستیک داشته و اغتشاش به صورت یک تابع ضربه به ربات اعمال می‌شود.

کنترلرهای پیشنهادی در این مقاله اگرچه توانایی قرارگیری در هر کدام از دسته‌های فوق را می‌توانند داشته باشد (صرف‌نظر از محدودیت‌های پیاده‌سازی)، اما در ادامه پارامترهای آن به گونه‌ای تنظیم می‌گردد تا در دسته دوم قرار گرفته و لذا این امکان را فراهم آورد تا کاربر بازخورد و درکی از وجود مانع بر سر راه را به دست آورد. لذا در ادامه به منظور ارزیابی عملکرد کنترلرهای پیشنهادی و مقایسه آن‌ها با دیگر روش‌های مرسوم، اغتشاش تنها به صورت یک تابع ضربه در نظر گرفته می‌شود.

لازم به ذکر است تغییرات در پارامترهای دینامیکی و یا مدل دینامیکی ربات را نیز می‌توان به عنوان اغتشاش به موارد فوق اضافه نمود؛ اما توجه به اثر بلندمدت (غیرمقطعی) آن و استراتژی کنترلی متفاوت برای مواجهه با آن، در این مقاله این دسته مورد بررسی قرار نگرفته و بدان پرداخته نمی‌شود.

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در "شکل 7 تا شکل 13" نشان داده شده است. همان‌طور که در "شکل 7 تا شکل 9" مشاهده می‌شود کنترلرهای مذکور در غیاب اغتشاش، به خوبی توانسته‌اند مسیر مطلوب (مرجع) را دنبال نموده و نمایش دقیقی از رفتار دینامیک مرجع (معادله (5)) به نمایش گذارند. لازم به ذکر است با این توصیف، دلیل ایده‌آل در نظر گرفتن کنترلر موقعیت و نیرو در لایه پایینی کنترلرهای ادیمیتانس مشخص می‌گردد.

در "شکل 10 تا شکل 13" عملکرد لایه پایینی کنترلر در حضور اغتشاش به نمایش گذاشته شده است. در این حالت فرض شده است که در ثانیه نخست، اغتشاش به صورت یک سیگنال ضربه با طول زمانی 0.1 ثانیه و دامنه 10N به ران ربات وارد شده و اثر روش‌های کنترلی مختلف در مواجهه با این اغتشاش رایج بررسی می‌شود. نمودار زاویه مفصل لگن و زانوی ربات در مواجهه با اغتشاش مذکور در "شکل 10 و 11" آورده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود کنترلر ادیمیتانس کلاسیک با فرض استفاده از یک کنترلر موقعیت ایده‌آل (کنترلر ادیمیتانس نوع 1) در لایه پایینی آن در مواجهه با اغتشاش، پاسخی از خود نشان نمی‌دهد که می‌تواند

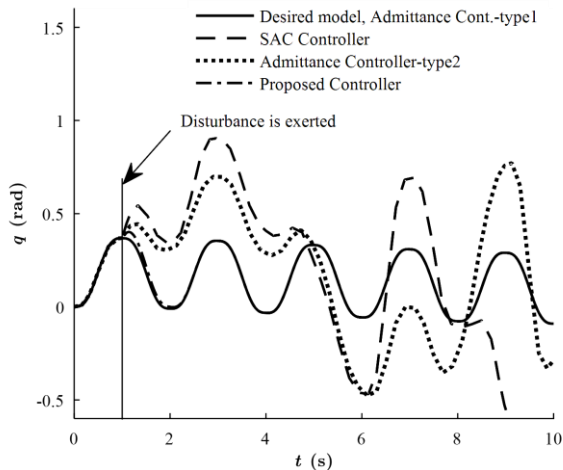


Fig. 12 Hip joint positions based on the different controllers in the presence of a disturbance

شکل 12 نمودار زاویه مفصل لگن ربات برای دینامیک مرجع، کنترلرهای ادیتمانس نوع 1، نوع 2، کنترلر افزایش حساسیت و کنترلر پیشنهادی در حضور اغتشاش

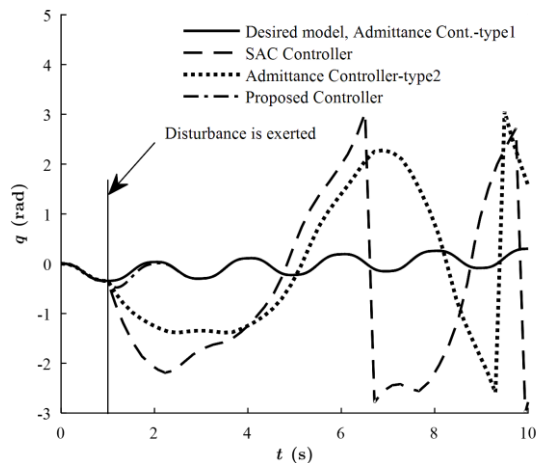


Fig. 13 The knee joint positions based on the different controllers in the presence of a disturbance

شکل 13 نمودار موقعیت زاویه مفصل زانوی ربات برای دینامیک مرجع، کنترلرهای ادیتمانس نوع 1، نوع 2، کنترلر افزایش حساسیت و کنترلر پیشنهادی در حضور اغتشاش

را در ادامه مسیر تصحیح نماید.

با بررسی نتایج فوق مشاهده می‌گردد که در میان موارد مورد بررسی، کنترلر پیشنهادی تنها گزینه‌ای است که از یک سو توانایی ارائه پاسخی دقیق در مواجهه با نیروی تعاملی را به دست می‌دهد و از سوی دیگر در مواجهه با اغتشاشات محیطی، پاسخی (انحرافی از مسیر مرجع) با دامنه محدود (و برپایه یک دینامیک مشخص) را فراهم آورده و با حذف آن نیز می‌تواند دوباره مسیر مرجع را دنبال نماید.

به‌منظور ارزیابی عملکرد روش‌های کنترلی پیشنهادی، علاوه بر کنترلر مرتبه یک که در شبیه‌سازی قبل به کار گرفته شد، در ادامه دو کنترلر پیشنهادی دیگر که برپایه رویکرد کنترلی دینامیک خطای مرتبه دو طراحی شده‌اند نیز در نظر گرفته می‌شود. نخستین کنترلر مرتبه دو (که در ادامه کنترلر مرتبه دو نوع 1 نامیده می‌شود)، براساس معادله (25) پیاده‌سازی می‌شود که در آن ضرایب β_1 و β_2 به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا زیردینامیک

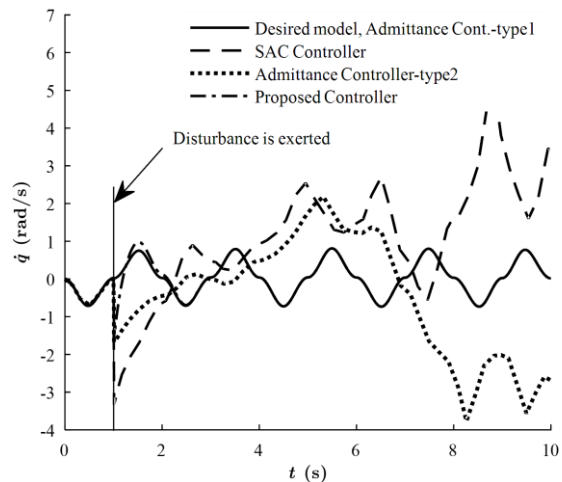


Fig. 10 The angular velocity of the knee joint for the different controllers in the presence of a disturbance

شکل 10 نمودار سرعت زاویه مفصل زانوی ربات برای دینامیک مرجع، کنترلرهای ادیتمانس نوع 1، نوع 2، کنترلر افزایش حساسیت و کنترلر پیشنهادی در حضور اغتشاش

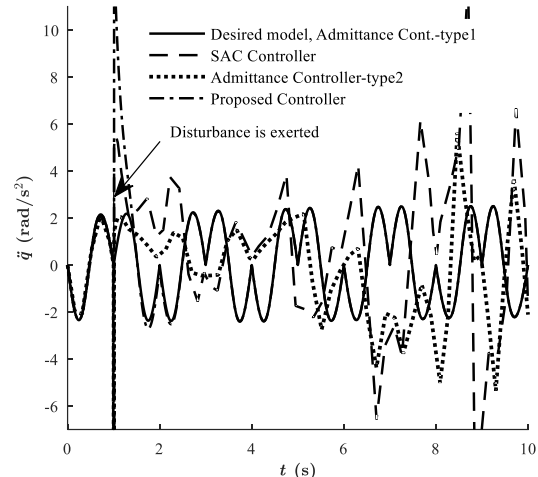


Fig. 11 The angular acceleration of the knee joint for the different controllers in the presence of a disturbance

شکل 11 نمودار شتاب زاویه مفصل زانوی ربات برای دینامیک مرجع، کنترلرهای ادیتمانس نوع 1، نوع 2، کنترلر افزایش حساسیت و کنترلر پیشنهادی در حضور اغتشاش

حالت ماندگار باشد.

نکته دیگری که باید بدان توجه نمود عملکرد کنترلرها پس از رفع اغتشاش می‌باشد. همان‌طور که در "شکل 10 و 11" مشاهده می‌شود در کنترلر ادیتمانس برپایه دینامیک معکوس و نیز کنترلر SAC، با حذف اغتشاش، کنترلرها نمی‌توانند دوباره به سمت مسیر مرجع همگرا شده و آن را در ادامه مسیر دنبال کنند. به عبارت دیگر اغتشاش وارده، اثری مشابه تغییر شرایط اولیه دینامیک سیستم حلقه بسته برای لحظات پس از حذف اغتشاش دارد (فارغ از این‌که به صورت ضربه وارد شود)؛ حال آن‌که کنترلر پیشنهادی توانسته است در سطح شتاب، سرعت و حتی موقعیت زاویه‌ای، خود را به مسیر مرجع رسانده و در ادامه، مسیر آن را دنبال نماید.

ارزیابی کنترلر موقعیت ادیتمانس با کنترلر موقعیت ایده‌آل نیز در این شبیه‌سازی بدون معنی می‌باشد؛ زیرا سیستم حلقه بسته مبتنی بر این کنترلر در برابر اغتشاش موردنظر، دچار هیچ گونه انحرافی نشده است که بخواد آن

بسته، وابسته به انتخاب طراح و ملاحظات کنترلی مدنظر (تظیر نمایش یک رفتار نرم و یا حذف سریع اثر اغتشاش) دارد.

9- نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختار جدیدی برای کنترل ربات و تعامل با کاربر در ربات‌های برون‌پوش کاربر-محور معرفی گردید که در عین امکان اعمال یک دینامیک مطلوب در پاسخ به نیروی تعاملی وارد شده از سوی کاربر، می‌توان رفتار ربات را در برابر اغتشاشات محیطی وارده کنترل نمود. این مزیت این امکان را فراهم می‌آورد که در صورت برخورد ربات با یک مانع و یا اعمال یک اغتشاش محیطی، در صورتی که کاربر به صورت مستقیم اطلاعاتی از اعمال اغتشاش وارده نداشته باشد، ربات با ارائه عکس‌العملی محدود بتواند کاربر را از وجود آن آگاه نموده تا به‌عنوان کنترلر سطح بالا در ربات برون‌پوش بتواند برای مواجهه با آن و حفظ تعادل مجموعه ربات و کاربر، عکس‌العمل لازم را از خود نشان دهد. شایان ذکر است که با در نظر گرفتن آنکه در ربات‌های برون‌پوش کاربر-محور غالباً کنترلرها سعی در افزایش پهنای باند دینامیک مطلوب (مرجع) دارند، اهمیت این مسئله دوچندان می‌شود.

بدین منظور از یک کنترلر ادمیتانس برپایه معکوس دینامیک سیستم، به عنوان لایه پایینی کنترلر ادمیتانس استفاده گردید. این رویکرد این امکان را می‌دهد تا بتوان دو رفتار دینامیکی مرجع برای سیستم حلقه بسته تعریف نمود و لذا دینامیک سیستم در مواجهه با نیروی تعاملی متفاوت از پاسخ آن در برابر اغتشاش محیطی باشد. در ادامه روش کنترلی مذکور بر روی پای یک ربات برون‌پوش در فاز آویزان شبیه‌سازی شده و عملکرد آن در مقایسه با دیگر روش‌های کنترلی رایج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که این روش می‌تواند ربات را به گونه‌ای کنترل نماید که در مواجهه با اغتشاشات رفتار مناسبی از خود بروز داده و کاربر را آگاه نماید و پس از رفع عامل اغتشاش نیز به صورت خودکار به سمت مسیر مطلوب بازگشته و این مسیر مرجع (حاصل از دینامیک مطلوب) را دنبال نماید.

در ادامه روش کنترلی پیشنهادی توسعه یافته و برپایه یک دینامیک خطای تعقیب مرتبه دو بازنویسی گردید. نتایج حاصله نشان داد که این تغییر در ساختار کنترلر سبب کاهش محسوس دامنه خطا گردیده و سبب می‌گردد اغتشاش وارده تأثیر کمتری بر روی میزان انحراف سیستم حلقه بسته از رفتار مطلوب داشته باشد.

10- مراجع

- [1] M. R. Tucker, J. Olivier, A. Pagel, H. Bleuler, M. Bouri, O. Lamercy, J. del R Millán, R. Riener, H. Vallery, R. Gassert, Control strategies for active lower extremity prosthetics and orthotics: a review, *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, Vol. 12, No. 1, pp. 1, 2015.
- [2] K. Anam, A. A. Al-Jumaily, Active exoskeleton control systems: State of the art, *Procedia Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 988-994, 2012.
- [3] U. Nagarajan, G. Aguirre-Ollinger, A. Goswami, Integral admittance shaping for exoskeleton control, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, USA, May 26-30, 2015, pp. 5641-5648.
- [4] A. Taherifar, G. Vossoughi, A. Selk Ghafari, Optimal target impedance selection of the robot interacting with human, *Advanced Robotics*, Vol. 31, No. 8, pp. 428-440, 2017.
- [5] W. Yu, J. Rosen, X. Li, PID admittance control for an upper limb exoskeleton, *Proceedings of The American Control Conference*, San Francisco, USA, June 29 - July 1, 2011, pp. 1124-1129.
- [6] A. Wege, K. Kondak, G. Hommel, Force control strategy for a hand exoskeleton based on sliding mode position control, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, Oct. 9-15, 2006, pp. 4615-4620.
- [7] R. Kikuuwe, H. Fujimoto, Proxy-based sliding mode control for accurate and safe position control, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, USA, May 15-19, 2006, pp. 25-30.
- [8] R. Kikuuwe, A sliding-mode-like position controller for admittance control

مرتبه 2 معرفی شده در رابطه (31) مشابه دینامیک حلقه بسته در کنترلر مرتبه یک باشد. به منظور تحقق این هدف، با توجه به رابطه (30) این دو ضریب به ترتیب برابر 8 و 16 انتخاب شده‌اند. همچنین پارامتر λ_2 همانند کنترلر مرتبه یک برابر 4 در نظر گرفته شده است.

کنترلر مرتبه دو دیگر (که از این پس با نام کنترلر مرتبه دو نوع 2 بدان اشاره می‌شود) نیز از رابطه‌ای مشابه استفاده می‌کند، با این تفاوت که در معادله (25) به جای ترم r_1 ، همانند کنترلر مود لغزشی فرا-پیچش) از تابع $\text{sign}(r_1)$ استفاده شده است.

"شکل 14" عملکرد دینامیک حلقه بسته به ازای سه کنترلر پیشنهادی را نمایش می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود دامنه خطای موقعیت در کنترلرهای مرتبه دو نوع 1 کمتر از کنترلر مرتبه 1 می‌باشد، اگرچه زمان نشست اندکی افزایش داشته است. همچنین رفتار نرم پاسخ تا حد مطلوبی همچنان حفظ شده است.

کنترلر مرتبه دو نوع 2 نیز سبب کاهش بیشتر دامنه خطا و نیز زمان نشست شده است، زیرا به ازای مقادیر خطای تعقیب (r) کوچک تابع انتگرالده مقادیر بزرگتری را به دست می‌دهد. لازم به ذکر است این کاهش دامنه و زمان نشست به بهای نوسانی‌تر شدن پاسخ (به میزان اندکی) به دست آمده است. این نوسانی شدن در سیگنال کنترلی نمود بیشتری به خود پیدا می‌کند، اگرچه بعد از مدتی با کاهش خطا دامنه آن کوچک‌تر شده و در نهایت محو می‌گردد.

همان طور که مشاهده شد هر یک از این سه کنترلر خصوصیات گذاری متفاوتی را به دست می‌دهند. کنترلر 1 در عین سادگی عملکرد مناسبی را به دست می‌دهد. به کمک کنترلر مرتبه دو نوع 1 می‌توان پاسخ گذرای سیستم به اغتشاش وارده را سریع‌تر نموده و دامنه آن را کاهش داد، مضاف بر آن که از بازگشت ترجکتوری خطا به مقدار صفر اطمینان داشت (بسته به اندازه ضریب انتگرال‌گیر). در نهایت کنترلر مرتبه دو نوع 2 رفتار گذرای سریع‌تری به دست می‌دهد، اگرچه این مورد به بهای نوسانی‌تر شدن پاسخ صورت می‌پذیرد. انتخاب هر یک از موارد مذکور و در نتیجه تعیین دینامیک حلقه

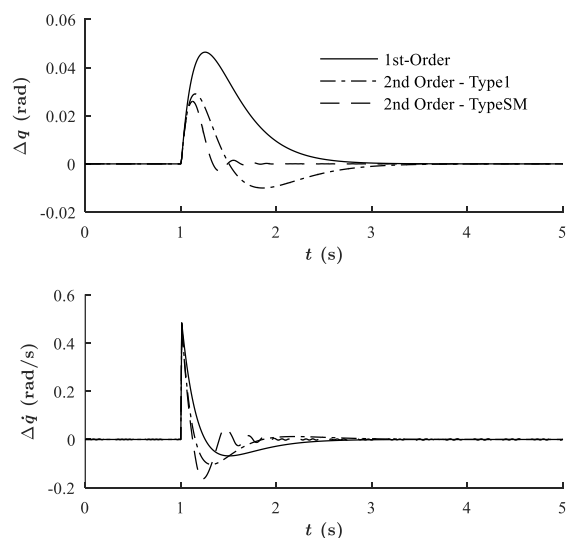


Fig. 14 The tracking errors of the hip joint generated by the interaction forces in the first-order, second-order type-1 and second-order type-2 controllers.

شکل 14 نمودار میزان انحراف از مسیر مطلوب در مفصل لگن برای کنترلرهای مرتبه یک، مرتبه دو نوع 1 و نوع 2 در حضور اغتشاش

- Netherland, June 13-15, 2007, pp. 188-195.
- [16] N. Hogan, Impedance control: an approach to manipulation: part II - implementation, *Journal of dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107, No. 1, pp. 8-16, 1985.
- [17] A. L. Shoushtari, P. Dario, S. Mazzoleni, A review on the evolution trend of robotic interaction control, *Industrial Robot*, Vol. 43 No. 5, pp. 535-551, 2016.
- [18] M. Sharifi, S. Behzadipour, G. Vossoughi, Nonlinear model reference adaptive impedance control for human-robot interactions, *Control Engineering Practice*, Vol. 32, No. 1, pp. 9-27, 2014.
- [19] L. Besnard, Y. B. Shtessel, B. Landrum, Quadrotor vehicle control via sliding mode controller driven by sliding mode disturbance observer, *Journal of The Franklin Institute*, Vol. 349, No. 2, pp. 658-684, 2012.
- [20] T. Floquet, C. Edwards, S. K. Spurgeon, On sliding mode observers for systems with unknown inputs, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, Vol. 21, No. 8-9, pp. 638-656, 2007.
- [21] G. Aguirre-Ollinger, U. Nagarajan, A. Goswami, Integral admittance shaping: a unified framework for active exoskeleton control, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 75, No. 2, pp. 310-324, 2015.
- [22] J. Ghan, R. Steger, H. Kazerooni, Control and system identification for the berkeley lower extremity exoskeleton (bleex), *Advanced Robotics*, Vol. 20, No. 9, pp. 989-1014, 2006.
- [23] H. Kazerooni, R. Steger, L. Huang, Hybrid control of the berkeley lower extremity exoskeleton (bleex), *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 25, No. 5-6, pp. 561-573, 2006.
- with bounded actuator force, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 19, No. 5, pp. 1489-1500, 2014.
- [9] Z. Yang, Y. Zhu, X. Yang, Y. Zhang, Impedance control of exoskeleton suit based on adaptive RBF neural network, *Proceedings of The International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, Hangzhou, China, Aug. 26-27, 2009, pp. 182-187.
- [10] M. Jin, S. H. Kang, P. H. Chang, Robust compliant motion control of robot with nonlinear friction using time-delay estimation, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 1, pp. 258-269, 2008.
- [11] A. Y.-K. M. Shafiee Ashtiani, M. Shariat-Panahi, M. Khadiv, Balance recovery of a humanoid robot using hip and ankle joints on small contact surfaces, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 413-422, 2017. (in Persian فارسی)
- [12] M. Khadiv, S. A. A. Moosavian, A. Yousefi-Koma, M. Sadedel, S. Mansouri, Optimal gait planning for humanoids with 3D structure walking on slippery surfaces, *Robotica*, Vol. 35, No. 3, pp. 569-587, 2017.
- [13] B. Stephens, *Push Recovery Control for Force-Controlled Humanoid Robots*, PhD Thesis, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 2011.
- [14] A. Calanca, R. Muradore, P. Fiorini, A review of algorithms for compliant control of stiff and fixed-compliance robots, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 21, No. 2, pp. 613-624, 2016.
- [15] G. Aguirre-Ollinger, J. E. Colgate, M. A. Peshkin, A. Goswami, Active-Impedance Control of a Lower-Limb Assistive Exoskeleton, *Proceedings of IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Noordwijk,