مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۱، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۷۱-۵۷

کنترل مقاوم امپدانس ربات با رابط انعطاف‌پذیر در محیطی نامشخص با استفاده از روش کنترل مود لغزشی

علی فیاضی[۱]، ناصر پریز[۲]، علی کریم‌پور[۳]، سیدحسن حسین نیا[۴]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی کنترل، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد، a.fayazi@yahoo.co.uk

[۲] استاد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد، n-pariz@um.ac.ir

[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد، karimpor@um.ac.ir

[۳] استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی میکروسیستم و ابزار دقیق، دانشگاه دلفت، s.h.hosseinniakani@tudelft.nl

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۵/۱۰/۱۴، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۶/۵/۵)

چکیده: در این مقاله روشی جدید بر مبنای کنترل مود لغزشی برای کنترل امپدانس یک بازوی ربات با رابط انعطاف‌پذیر در مواجه با محیطی نامشخص، ارائه شده است. استراتژی کنترل پیشنهادی، در برابر تغییرات پارامترهای محیط (نظیر سختی و ضریب میرایی)، اغتشاش نامعلوم اصطکاک کولمبی، تغییرات جرم رابط و اصطکاک ویسکوز مقاوم است. همچنین، روش پیشنهادی برای هر دو حرکت آزاد و مقید معتبر می‌باشد. در رویکرد جدید پیشنهادی، کنترل‌کننده بصورت خودکار از مود کاری حرکت آزاد به مود کاری مقید تغییر وضعیت می‌دهد. بنابراین نیازی به الگوریتمی جداگانه برای تشخیص برخورد رابط با محیط نمی‌باشد. در این راستا، کنترل‌کننده امپدانس با حلقه‌ی درونی موقعیت پیشنهاد شده است. بدین معنی‌که در حرکت آزاد نیروی اعمالی به محیط صفر است و زاویه‌ی مرجع برای حلقه‌ی درونی موقعیت همان موقعیت مطلوب است. در حرکت مقید، مسیر مرجع برای حلقه‌ی درونی با استفاده از دینامیک امپدانس مطلوب تعیین می‌شود. کارایی و اثربخشی کنترل‌کننده پیشنهادی با استفاده از شبیه سازی عددی نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: کنترل مقاوم امپدانس، کنترل مود لغزشی، رؤیتگر اغتشاش نامعلوم، بازو با رابط انعطاف پذیر، محیط نامشخص.

Robust Impedance Control of a Single-Link Flexible Robot Interacting with the Unknown Environment using Sliding Mode Control Method

Ali Fayazi, Naser Pariz, Ali Karimpour, Seyed Hassan HosseinNia

Abstract: In this paper, a novel scheme based on sliding mode control method for impedance control of a single link flexible robot arm when it comes into contact with unknown environment, is presented. The proposed control strategy is robust against the changes of the environment parameters (such as stiffness and damping coefficient), the unknown Coulomb friction disturbances, payload and viscous friction variations. The proposed scheme is also valid for both constrained and unconstrained motions. In our new approach, the controller automatically switches from a free to a constrained motion mode therefore it does not need an algorithm to detect collision between the link and the environment. In this regard, impedance control is proposed with the inner loop position. This means that in the free motion, the applied force to the environment is zero and the reference trajectory for the inner loop position is the desired trajectory. In the constrained motion, the reference trajectory for the inner loop is determined by the desired impedance dynamic. Feasibility and effectiveness of the proposed control scheme are demonstrated via numerical simulations.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]

Keywords: Robust impedance control, Sliding mode control, Unknown disturbance observer, Single-link flexible arm, Unknown environment.

۱- مقدمه

امروزه، کنترل امپدانس سیستم‌های رباتیک دارای تعامل با محیط به یکی از موضوع‌های بسیار مهم درکنترل ربات تبدیل شده است و اهمیت آن با جهت گیری کاربردهای ربات در راستای کمک به انسان، ملموس-تر شده است. برخی از کاربردهای عملی بازوهای رباتیک عبارتند از: مونتاژ، حفاری، برش، نقاشی، ماشین کاری که در آنها بازوی ربات انعطاف پذیر در تعامل با محیط می‌باشد. کاربردهای جدید رباتیک در حوزه‌های مختلف سبب توسعه تحقیقات، در زمینه کنترل بازوهای انعطاف‌پذیر شده است. از جمله این کاربردهای جدید می توان به کاربردهای صنعتی اشاره نمود که که به‌منظور بهبود عملکرد ربات‌های صنعتی سنگین و حجیم فعلی گرایش به استفاده از مواد سبک در ساخت بازوهای رباتیک انعطاف‌پذیر دارد. در [۱]، برخی از کاربردهای ربات با بازوی انعطاف‌پذیر بررسی شده است. از جمله‌ی این کاربردها، می‌توان به بازوهای سبک و انعطاف‌پذیرِ مورد استفاده در صنعت هوا و فضا اشاره نمود که در آن سبکی مواد یک نیاز ضروری است. کنترل سازه‌های بزرگ مانند جرثقیل، نردبان‌های امداد و نجات که به عنوان یک رابط انعطاف پذیر رفتار می‌کنند [۲]. انجام عمل جرّاحی با حداقل تهاجم با ابزار نازک انعطاف‌پذیر که در آن کنترل دقیق ربات ضروری است [۳].

ربات با بازوی انعطاف‌پذیرِ بسیار سبک چندین مزیت نسبت به ربات صلب مرسوم دارد. از جمله این مزایا، می‌توان به مصرف انرژی کمتر، محرک‌های کوچکتر، هزینه کمتر، قدرت مانور بهتر، حمل و نقل بهتر و نسبت بار به وزن بازوی بالاتر اشاره نمود. علاوه بر این مزایا، به دلیل انعطاف‌پذیری این نوع بازوها شدت برخورد به اشیاء یا انسان کاهش می-یابد. علی رغم این ویژگی‌های مفید، کنترل آنها بسیار دشوار است. یکی از این سختی‌ها کنترل ارتعاشات است که به دلیل ساختار انعطاف‌پذیر در طول ساختار این نوع بازوها ظاهر می‌شود و دیگری مربوط به مدل پیچیده ریاضی دینامیک این نوع بازوها است.

بطورکلی، کلیه‌ی وظایف بازوی ربات درکاربردهای مذکور را می-توان به دو دسته مختلف حرکت آزاد و مقید تقسیم بندی کرد. در دسته اول، بازوی ربات در فضای کاری‌اش بدون برخورد با محیط عمل می-کند(حرکت آزاد). در دسته دوم، بازوی ربات در تماس با محیط است. در این وضعیت محیط بطور مداوم بر روی حرکت بازو، محدودیت دینامیکی اعمال می‌کند.

سه روش اصلی که به‌طور معمول درکنترل حرکت سازگار استفاده می‌شود عبارتند از: کنترل امپدانس[۱]، کنترل کمپلیانس[۲]، و کنترل ترکیبی موقعیت/نیرو[۳]. ایده کنترل امپدانس برای اولین بار توسط هوگان ارائه شد [۴]. در این روش نه موقعیت و نه نیرو کنترل می‌شود. کنترل امپدانس دارای یک ویژگیِ جامع است که آن‌را در مواجه با حرکات مقید و آزاد کارآمدتر می‌کند. در واقع کنترل امپدانس، کنترل رفتار دینامیکی سیستم است و در شکل تعمیم یافته اش یک معادله دینامیکی بین خطاهای موقعیت و نیرو ایجاد می‌کند. این معادله می‌تواند به‌عنوان امپدانس مطلوب بین موقعیت و نیروی تعاملی با محیط تعریف شود. بنابراین، سیستم کنترل امپدانس، در طی حرکت‌های بدون قید (حرکت آزاد) به یک سیستم کنترل موقعیت تقلیل می‌یابد و در طی حرکت‌های مقید به عنوان یک سیستم کنترل نیرو عمل می‌کند.

کنترل امپدانس بازوی صلب به‌طور گسترده در مقالات آمده است [۱۳-۵]. بسیاری از پژوهشگران این حوزه، کنترل موقعیت، نیرو و کنترل ترکیبی موقعیت/نیرو را بررسی کرده‌اند. با این حال، در مقالات به مسأله کنترل امپدانس بازوی انعطاف پذیر بسیارکم پرداخته شده است.

دردهه‌های اخیر، استراتژی‌های کنترل مختلفی در زمینه ربات با بازوی انعطاف پذیرِ متعامل با محیط، پیشنهاد شده است. هدف اصلی این پژوهش‌ها حذف ارتعاشات ناشی از ساختار انعطاف‌پذیر است [۱۸-۱۴]. درمرجع [۱۴]، برخی از این استراتژی‌های کنترل یافت می‌شود. اکثر این تحقیقات استراتژی کنترل موقعیت، نیرو، موقعیت و نیرو ترکیبی و بسیار محدود کنترل امپدانس را جهت تحقق اهداف کنترلی، بکار برده‌اند. در مرجع [۱۵]، دوحلقه کنترلی تو در تو بر مبنای کنترل مود لغزشی برای کنترل موقعیت رباتِ تک رابط انعطاف‌پذیر پیشنهاد شده است که در مقابل تغییرات بار و اصطکاک موتور مقاوم است. در مرجع [۱۶]، یک استراتژی کنترلی، شامل دو حلقه داخلی و بیرونی برای کنترل موقعیت یک رابطِ انعطاف‌پذیر با دو درجه آزادی ارائه شده است. حلقه‌ی داخلی برای کنترل موقعیت دو موتور بوسیله یک کنترل‌کننده PID و حلقه بیرونی جهت حذف ارتعاشات رابط انعطاف پذیر با اعمال استراتژی خطی سازی فیدبک حالت- ورودی پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۷]، کنترل نیرو یک تک بازوی بسیار سبک با انعطاف‌پذیری در رابط بر مبنای فیدبک گشتاور اعمالی موتور به رابط (گشتاورکوپلینگ) پیشنهاد شده است. در این مقاله، از یک کنترل کننده‌یPID اصلاح شده (I-PD) برای کنترل نیرو رابط برای هر دو حرکت مقید و آزاد در تعامل با محیطی معلوم، استفاده شده است. در مرجع [۱۸]، کنترل امپدانس یک بازوی ربات با انعطاف پذیری رابط در حرکت آزاد و مقید با استفاده از روش کنترل مود لغزشی، ارائه شده است.

در بسیاری از مقالات مربوط به کنترل رابط انعطاف پذیر در تعامل با محیط [۱۸-۱۴]، برای کنترل سیستم در دو مود کاری مختلف (حرکت

[۱] Impedance control
[۲] Compliance control
[۳] Hybrid position/force control

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]

مقید و آزاد)، دو نوع کنترل‌کننده جداگانه پیشنهاد شده است. برای انجام این کار بایستی دو مدل دینامیکی مختلف نیز برای این مودهای کاری موجود باشد. همچنین برای تغییر وضعیت کنترل‌کننده از مود کاری حرکت آزاد به مقید، استفاده از الگوریتمی جداگانه برای تشخیص برخورد، الزامی است.

در روش پیشنهادیِ این مقاله، ابتدا، یک مدل دینامیکی برای رابط کشسان معرفی می‌شود که برای هر دو مود حرکت مقید و آزاد رابط معتبر می‌باشد. سپس، براساس مدل معرفی شده رابط، یک کنترل‌کننده یکپارچه برای مودهای کاری حرکت مقید و آزاد رابط انعطاف‌پذیر ارائه می‌شود. به این ترتیب بدون نیاز به الگوریتمی جداگانه برای تشخیص برخورد رابط با محیط، کنترل‌کننده بصورت خودکار از مود کاری حرکت آزاد به مود کاری حرکت مقید تغییر وضعیت می‌دهد. ضمن اینکه در این مطالعات، جنس و سختی محیط از قبل مشخص است به‌طور کلی، برخورد بین بازوی انعطاف‌پذیر و محیطی با سختی نامشخص می‌تواند در نقطه انتهایی و یا نقاط میانی رابط رخ دهد. ولیکن، در بسیاری ازکاربردها بویژه بازوهای صنعتی برخورد با محیط اغلب در نقطه انتهایی است. تاآنجایی‌که نویسندگان این مقاله اطلاع دارند، مفهوم کنترل مقاوم امپدانس ربات با رابط انعطاف پذیر در محیط نامشخص، نسبتاً جدید و برای اولین بار به آن پرداخته شده است. در این راستا، کنترل‌کننده امپدانس با حلقه‌ی درونی موقعیت پیشنهاد شده است. بدین معنی‌که در حرکت آزاد نیروی اعمالی به محیط صفر است و زاویه‌ی مرجع برای حلقه‌ی درونی موقعیت همان موقعیت مطلوب است. در حرکت مقید، مسیر مرجع برای حلقه‌ی درونی با استفاده از دینامیک امپدانس مطلوب تعیین می‌شود. با فرض اینکه کنترل‌کننده موقعیت درونی دقیق باشد و با فرض موجود بودن اطلاعات دینامیکی و هندسی محیط، می‌توان پارامتر سختی (بهره) امپدانس مطلوب را طوری اختیار کرد تا نیرو در مقدار مطلوب قرار گیرد. بنابراین طراحی کنترل‌کننده دقیق حلقه‌ی درونی موقعیت، بخش اصلی کار در کنترل‌کننده امپدانس است.

این مقاله به صورت زیر مرتب شده است. در ادامه و در بخش دوم مدل‌سازی بازوی ربات با انعطاف‌پذیری شرح داده شده است. بخش سوم مقاله به طراحی کنترل‌کننده مقاوم امپدانس برمبنای استراتژی کنترل مود لغزشی می‌پردازد. تحلیل پایداری سیستم کنترل حلقه بسته در بخش چهارم آمده است. بخش پنجم به شبیه سازی عددی با استفاده از روش پیشنهادی اختصاص یافته است. در پایان نتایج بدست آمده در بخش ششم جمع بندی شده است.

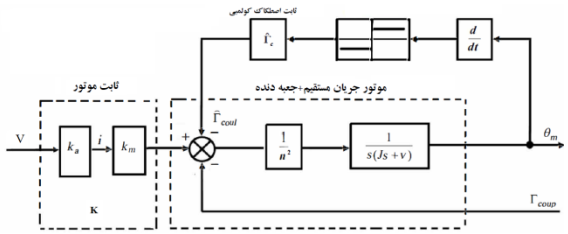
۲- مدل‌سازی تک بازوی ربات با انعطاف‌پذیری رابط

مدل‌سازی بازوهای انعطاف‌پذیر، از جمله موضوع‌های موردعلاقه در زمینه ربات‌های انعطاف‌پذیر است. مدل‌سازی بازوهای انعطاف‌پذیر بسیار متفاوت از ربات‌های صلب[۱] معمول می‌باشد. به دلیل رفتار کشسان ربات‌های انعطاف پذیر، استخراج مدل ریاضی که بتواند رفتار فیزیکی واقعی بازو را توصیف کند بسیار دشوار می‌باشد. یکی از ویژگی‌های شناخته شده بازوی انعطاف‌پذیر ظهور مودهای نامحدود ارتعاش هنگام برخورد بازو با محیطِ نامشخص است.

مدل‌سازی دینامیک تک بازوی ربات با انعطاف پذیری رابط شامل دو بخش می‌باشد: دینامیک مربوط به محرک تک بازو انعطاف پذیر، شامل دینامیک موتور جریان مستقیم همراه با چرخ دنده و منبع تغذیه است و بخش دیگر دینامیک مربوط به تک رابط انعطاف پذیر است. در ادامه، به‌ترتیب دینامیک مربوط به موتور و تک بازوی انعطاف پذیر شرح داده می‌شود.

۲-۱ دینامیک موتور

همان‌گونه که اشاره شد بازوهای انعطاف پذیر تک رابط شامل یک بخش انعطاف‌پذیر است که کششی توزیع شده را در امتداد کل سازه بازو ایجاد می‌کند و بخشی صلب تحت عنوان محرک، باعث حرکت مکانی سازه می‌شود. محرک تک بازوی انعطاف پذیر مورد مطالعه شامل یک موتور جریان مستقیم همراه با یک دسته جعبه دنده و یک تقویت کننده-سروو جریان است که این تقویت کننده سروو، جریان ورودی به موتور را کنترل می‌کند که این مقدار جریان با ولتاژ اعمالی به سروو از طرف کنترل‌کننده، متناسب است. شکل ۲ بلوک دیاگرام تقویت کننده، موتور و جعبه دنده را نشان می‌دهد.



شکل ۱: بلوک دیاگرام محرک الکتریکی

دینامیک موتور، تقویت کننده سروو جریان و چرخ دنده به‌ترتیب مطابق روابط (۱)، (۲) و (۳) می باشد[۱۷]:

$$k_m i = J\ddot{\hat{\theta}}_m + v\dot{\hat{\theta}}_m + \hat{\Gamma}_{coul} + \hat{\Gamma}_{coup} \quad (۱)$$

$$i = k_a V \quad (۲)$$

$$\hat{\theta}_m = \theta_m n;\ \hat{\Gamma}_c = \frac{\Gamma_c}{n};\ \hat{\Gamma}_{coup} = \frac{\Gamma_{coup}}{n} \quad (۳)$$

که در روابط بالا k_m ثابت الکترومکانیکی مربوط به موتور، i جریان موتور، J لختی موتور، v ضریب اصطکاک ویسکوز موتور،

[۱] Rigid

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]

$\hat{\Gamma}_{coul}$ گشتاور اصطکاک کولمب نامعلوم، $\hat{\Gamma}_{coup}$ گشتاورکوپلینگ اعمالی به رابط انعطاف‌پذیر از جانب موتور، V ولتاژ اعمال شده به سروو-تقویت کننده از طرف کنترل‌کننده، k_a بهره تقویت کننده و n نسبت کاهش جعبه دنده است. زاویه موتور بوسیله $\hat{\theta}_m$ نمایش داده شده است، بنابراین سرعت و شتاب محرک به ترتیب با نمادهای $\dot{\hat{\theta}}_m$ و $\ddot{\hat{\theta}}_m$ مشخص می‌شود. قابل ذکر است نماد های هشتک مربوط به مقادیر موتور است و نماد های استاندارد مربوط به مقادیر دیده شده از خروجی چرخ دنده (سمت رابط) می‌باشند. به‌عنوان مثال نماد استاندارد بدون هشتک θ_m زاویه موتور در خروجی چرخ دنده می‌باشد. بنابراین با ترکیب روابط (۱)، (۲) و (۳) دینامیک کامل سیستم محرک به صورت رابطه زیر بدست می‌آید.

$$kV = Jn\ddot{\theta}_m + vn\dot{\theta}_m + \frac{\Gamma_{coul}}{n} + \frac{\Gamma_{coup}}{n} \qquad (۴)$$

که در آن $k = k_m k_a$ ثابت موتور است. از طرفی، گشتاور اصطکاک کولمب اغتشاشی است که دینامیک سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این اغتشاش وابسته به علامت سرعت زاویه‌ای موتور می‌باشد. اغتشاش اصطکاک کولمبی وقتی که $\dot{\theta}_m \neq 0$ به‌صورت رابطه زیر مدل می‌شود:

$$\hat{\Gamma}_{coul} = \hat{\Gamma}_c . Sign(\dot{\hat{\theta}}_m) = \begin{cases} \hat{\Gamma}_c & ,\theta_m > 0 \\ -\hat{\Gamma}_c & ,\theta_m < 0 \end{cases} \qquad (۵)$$

که در آن $\hat{\Gamma}_C$ ثابت اصطکاک کولمبی نامعلوم است که برای هر موتور مقدار متفاوتی دارد. بااین وجود، وقتی که $\dot{\hat{\theta}}_m = 0$ اغتشاش اصطکاک کولمبی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\hat{\Gamma}_{coul} = Sign(V).\min(k|V|, \hat{\Gamma}_{coup}) \qquad (۶)$$

۲-۲ دینامیک تک رابط انعطاف‌پذیر

روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی تک بازوی ربات با انعطاف-پذیری رابط وجود دارد. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به مدل المان محدود[۱]، مدل مودهای مفروض و مدل پارامترهای فشرده اشاره نمود[۱۹].

در این مقاله، از روش مدل پارامتر فشرده (مدل جرم فشرده) جهت مدل‌سازی دینامیکی تک رابط انعطاف پذیر استفاده شده است. در این مدل، فرض شده است تغییر شکل در ساختار رابط بسیار کوچک است و کل جرم در موقعیت انتهای رابط متمرکز شده است (جرم بار چندین برابر جرم بازو است) و جرم آزادانه در موقعیت نوک می‌چرخد. بنابراین لختی دورانی این جرم روی دینامیک رابط تاثیر نمی‌گذارد و هیچ گشتاوری از این موقعیت ایجاد نمی‌شود. بنابراین، این ویژگی‌ها موجب می‌شود سازه با مود اصلی ارتعاش، نوسان کند و برای دستیابی به مدلی ساده از کنترل‌کننده با تلاش کنترلی و هزینه محاسباتی کمتر، از دیگر مودهای ارتعاشی چشم پوشی شود. بر اساس این مفروضات، مدل دینامیکی تک رابط انعطاف‌پذیر مطابق روابط زیر توصیف می‌شود [۱۷]:

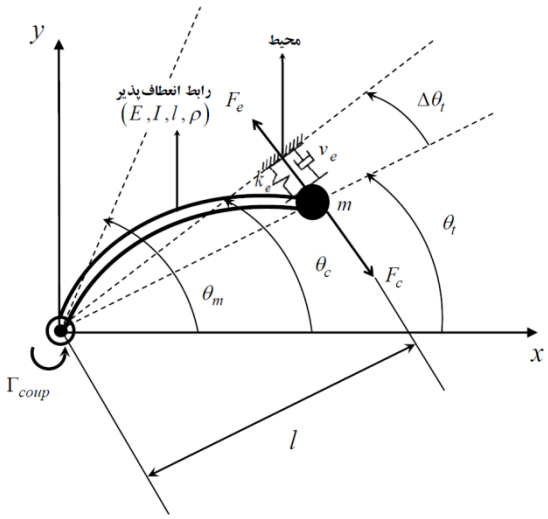
$$ml^2\ddot{\theta}_t = c(\theta_m - \theta_t) + F_c l,\ F_c = -F_e \qquad (۷)$$

$$\Gamma_{coup} = c(\theta_m - \theta_t) \qquad (۸)$$

که در روابط فوق m جرم متمرکز شده در انتهای رابط، l طول رابط، Γ_{coup} گشتاور اعمالی به رابط از طرف موتور (گشتاورکوپلینگ[۲])، θ_m زاویه موتور، θ_t زاویه‌ی انتهای آزاد رابط (زاویه‌ی بار) ، c سختی دورانی بازو است که از رابطه زیر بدست می-آید:

$$c = \frac{3EI}{l} \qquad (۹)$$

که در آن E مدول یانگ[۳] (مدول الاستیسیته) و I ممان اینرسی سطح مقطع است. هر دو این پارامتر در طول سازه انعطاف‌پذیر ثابت در نظر گرفته شده است [۱۷]. شکل ۲ نمایش پارامتری رابط انعطاف‌پذیر با برخورد در انتهای رابط را به تصویر می‌کشد. تک رابط انعطاف‌پذیر می-تواند حول محور z (محور عمود بر صفحه‌ی شکل) بچرخد.



شکل ۲: بازوی تک رابط انعطاف‌پذیر

در ادامه، فرض می‌شود محیط نامشخص در تماس با رابط دارای امپدانس مکانیکی معادل رابطه (۱۰) باشد.

$$F_e = k_e(y - y_c) + v_e \frac{d(y - y_c)}{dt} \qquad (۱۰)$$

که در آن y_c نقطه تعادل ایستای جسم است. با جایگذاری $y=l\theta_t$ و $y_c=l\theta_c$ رابطه‌ی (۱۰) به‌صورت رابطه زیر باز نویسی می‌شود:

[۱] Finite Element Model

[۲] Coupling torque

[۳] Young Modulus

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]

$$F_e = k_e l(\theta_t - \theta_c) + v_e l \frac{d(\theta_t - \theta_c)}{dt} \quad (۱۱)$$

که درآن k_e ضریب سختی محیط و v_e ضریب میرایی محیط، θ_t زاویه‌ی انتهای آزاد رابط و θ_c زاویه‌ی ایستای محیط است. از آنجایی که y_c یک نقطه‌ی ثابت در صفحه می‌باشد، $\frac{d(\theta_c)}{dt} = 0$، بنابراین رابطه‌ی (۱۱) به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$F_e = k_e l(\theta_t - \theta_c) + v_e l \frac{d(\theta_t)}{dt} \quad (۱۲)$$

بنابراین امپدانس محیط با یک فنر و میراکننده مدل شده است. با جایگزینی رابطه‌ی نیروی اعمالی به محیط(رابطه‌ی (۱۲)) در رابطه‌ی (۷) رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Gamma_{coup} = ml^2\ddot{\theta}_t + k_e l^2(\theta_t - \theta_c) + v_e l^2 \frac{d(\theta_t)}{dt} \quad (۱۳)$$

حال در رابطه‌ی(۱۳) تفاوت بین زاویه‌ی بار و زاویه‌ی ایستای جسم را با متغیر $\Delta\theta_t = \theta_t - \theta_c$ تعریف می‌کنیم. با توجه به این که $\ddot{\theta}_c = \theta_c = 0$، رابطه‌ی مذکور به شکل زیر درمی‌آید:

$$\Gamma_{coup} = ml^2\Delta\ddot{\theta}_t + v_e l^2\Delta\dot{\theta}_t + k_e l^2\Delta\theta_t \quad (۱۴)$$

از طرف دیگر، با استفاده از رابطه‌ی(۸) با توجه به تعریف متغیر $\Delta\theta_m = \theta_m - \theta_c$ داریم:

$$\Gamma_{coup} = c(\theta_m - \theta_c - \theta_t + \theta_c) = c(\Delta\theta_m - \Delta\theta_t) \quad (۱۵)$$

و از رابطه‌ی (۱۲) نیز داریم:

$$F_e = k_e l(\Delta\theta_t) + v_e l \frac{d(\Delta\theta_t)}{dt} \quad (۱۶)$$

با اعمال تبدیل لاپلاس به رابطه‌های (۱۴) تا (۱۶)، به‌ترتیب روابط (۱۷) تا (۱۹) بدست می‌آیند:

$$\Gamma_{coup}(s) = \left(ml^2s^2 + v_e l^2 s + k_e l^2\right)\Delta\Theta_t(s) \quad (۱۷)$$

$$\Gamma_{coup}(s) = c\left(\Delta\Theta_m(s) - \Delta\Theta_t(s)\right) \quad (۱۸)$$

$$F_e(s) = \left(v_e l s + k_e l\right)\Delta\Theta_t(s) \quad (۱۹)$$

با ترکیب روابط(۱۷) و (۱۸) تابع تبدیل زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\Delta\Theta_t(s)}{\Delta\Theta_m(s)} = \frac{\frac{c}{ml^2}}{s^2 + \frac{v_e}{m}s + (\frac{k_e}{m} + \frac{c}{ml^2})} \quad (۲۰)$$

و با جایگذاری رابطه‌ی (۲۰) در روابط (۱۸) و (۱۹)، توابع تبدیل زیر نیز بدست می‌آیند:

$$\frac{\Gamma_{coup}(s)}{\Delta\Theta_m(s)} = \frac{c(s^2 + \frac{v_e}{m}s + \frac{k_e}{m})}{s^2 + \frac{v_e}{m}s + (\frac{k_e}{m} + \frac{c}{ml^2})} \quad (۲۱)$$

$$\frac{F_e(s)}{\Delta\Theta_m(s)} = \frac{\frac{c}{ml}(v_e s + k_e)}{s^2 + \frac{v_e}{m}s + (\frac{k_e}{m} + \frac{c}{ml^2})} \quad (۲۲)$$

باتعیین $u = \Delta\theta_m$، $x_1 = \Delta\theta_t$، $x_2 = \Delta\dot{\theta}_t$ و $y_1 = F_e$، $y_2 = \Gamma_{coup}$، دینامیک رابط انعطاف‌پذیر در نمایش معادلات فضای حالت مطابق رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ -\left(\frac{k_e}{m} + \frac{c}{ml^2}\right) & -\frac{v_e}{m}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ \frac{c}{ml^2}\end{bmatrix}u$$
$$\begin{bmatrix}y_1\\ y_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}k_e l & v_e l\\ -c & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ c\end{bmatrix}u \quad (۲۳)$$

برای محیطی که صلب است، چون سختی متناظر با آن بی‌نهایت است($k_e \to \infty$). بنابراین $\Delta\theta_t = 0$ و روابط (۲۱) و (۲۲)، بصورت زیر خلاصه می‌شوند:

$$\frac{\Gamma_{coup}(s)}{\Delta\Theta_m(s)} = \lim_{k_e\to\infty}\frac{c(s^2 + \frac{v_e}{m}s + \frac{k_e}{m})}{s^2 + \frac{v_e}{m}s + (\frac{k_e}{m} + \frac{c}{ml^2})} = c \quad (۲۴)$$

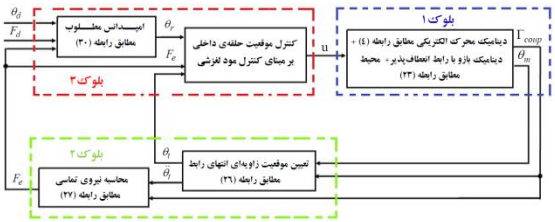
$$\frac{F_e(s)}{\Delta\Theta_m(s)} = \lim_{k_e\to\infty}\frac{\frac{c}{ml}(v_e s + k_e)}{s^2 + \frac{v_e}{m}s + (\frac{k_e}{m} + \frac{c}{ml^2})} = \frac{c}{l} \quad (۲۵)$$

۳- طراحی کنترل مقاوم امپدانس

در این بخش، روش کنترل پیشنهادی برای رابط انعطاف‌پذیر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. قبل از طراحی کنترل‌کننده بایستی این نکته را لحاظ کرد که مدل دینامیکی مورد استفاده باید جوابگوی هر دو مود کاری باشد. بعبارتی بایستی فقط یک مدل دینامیکی برای رابط توسعه داده شود. مدل دینامیکی رابط در تماس با محیط در بخش ۲ بدست آمد. حال به‌دنبال این مسأله می‌باشیم تا از مدل رابط در حرکت مقید، برای حرکت آزاد تیز استفاده کنیم. تنها تفاوت مدل رابط در مودهای حرکت آزاد و مقید در لحاظ کردن نیروی اعمالی به محیط است. می‌توان حرکت آزاد را همان حرکت مقید در نظر گرفت، با این فرض که رابط در حرکت آزاد در زاویه‌ی ایستای صفر با جسم دارای امپدانس صفر برخورد داشته

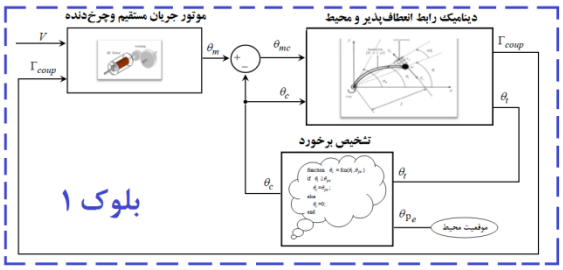
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]

است. حال اگر زاویه‌ی انتهای آزاد رابط به زاویه ای بزرگتر یا مساوی زاویه ایستای جسم رسید، به این معنی است که رابط با جسم برخورد داشته است. این الگوریتم تشخیص برخورد در بخش مدل‌سازی دینامیک رابط و محیط پیش‌بینی شده است. بعد از تعیین مدل یکپارچه‌ای که بتواند مشخصه‌های دینامیکی رابط را در هر دو مود کاری نشان دهد، نوبت به طراحی کنترل‌کننده‌ای می‌رسد که با داشتن فقط یک دسته پارامتر جواب‌گوی وظایف کنترلی باشد. در اینجا کنترل‌کننده امپدانس با حلقه‌ی درونی موقعیت مورد نظر است. همان‌طور که پیش از این ذکر شد، در حرکت آزاد نیروی اعمالی به محیط صفر است و زاویه‌ی مرجع برای حلقه‌ی درونی موقعیت همان موقعیت مطلوب است. در حرکت مقید، مسیر مرجع برای حلقه‌ی درونی با استفاده از دینامیک امپدانس مطلوب تعیین می‌شود. با فرض اینکه کنترل‌کننده موقعیت درونی دقیق باشد و با فرض موجود بودن اطلاعات دینامیکی و هندسی محیط، می‌توان پارامتر سختی (بهره) امپدانس مطلوب را طوری اختیار کرد تا نیرو در مقدار مطلوب قرار گیرد. بنابراین طراحی کنترل‌کننده دقیق حلقه‌ی درونی موقعیت بخش اصلی کار در کنترل‌کننده امپدانس است. شکل ۳ سیستم کنترل حلقه بسته سیستم را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود بلوک ۱ دینامیک مربوط به رابط انعطاف پذیر، محیط و محرک، بلوک۲ تخمین و محاسبه‌ی موقعیت انتهای رابط و نیروی تماسی و بلوک ۳ طرح کنترل امپدانس مقاوم با حلقه درونی موقعیت را نشان می‌دهد.



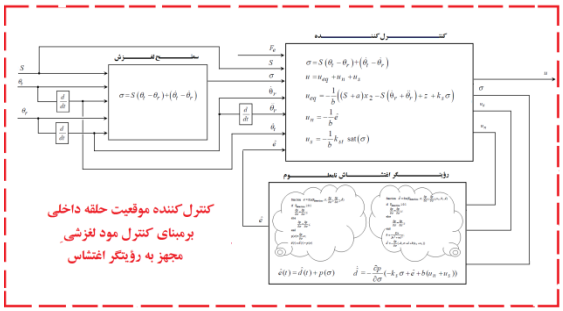
شکل ۳: سیستم کنترل امپدانس مقاوم بر مبنای موقعیت، همراه با ردیابی نیرو که در آن کنترل مود لغزشی یک حلقه کنترل موقعیت داخلی است

جزئیات مربوط به بلوک ۱ در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل ۴ مشاهده می‌شود از شبه کد الگوریتمی ساده، بر مبنای موقعیت محیط برای تشخیص برخورد انتهای رابط با محیط در مدل‌سازی سیستم رابط در مود حرکت مقید وآزاد استفاده شده است.



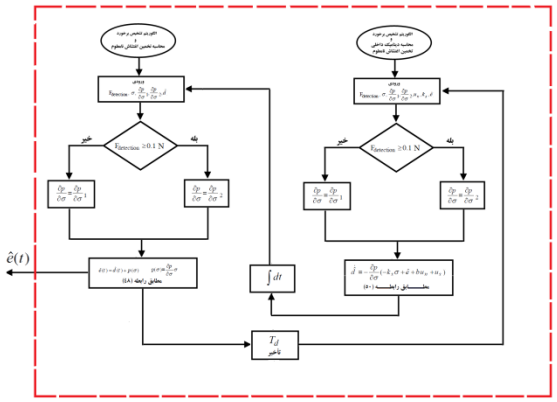
شکل ۴: دینامیک محرک الکتریکی، رابط انعطاف‌پذیرو محیط همراه با الگوریتم تشخیص برخورد برای مدل‌سازی رابط در مود حرکت مقید وآزاد

شکل ۵ جزئیات مربوط به بلوک کنترل موقعیت حلقه داخلی برمبنای کنترل مود لغزشی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۵ ملاحظه می‌شود کنترل مود لغزشی به یک رؤیتگر اغتشاش نامعلوم مجهز است.



شکل ۵: سیستم کنترل موقعیت حلقه داخلی بر مبنای کنترل مود لغزشی مجهز به رؤیتگر اغتشاش

در بلوک مربوط به رؤیتگر اغتشاش نامعلوم، برای تشخیص مود کاری مقید از آزاد از شبه کد الگوریتمی ساده، براساس مقدار نیروی محاسبه شده از بلوک ۲ و مقایسه آن با یک آستانه مشخص، استفاده شده است. شکل ۶ جزئیات الگوریتم تشخیص، تخمین اغتشاش نامعلوم بر اساس یک قانون به‌روز رسانی تحت عنوان دینامیک داخلی تخمین اغتشاش نامعلوم را نشان می‌دهد. جزئیات مربوط به رؤیتگر اغتشاش نامعلوم در زیر بخش ۳-۲ آمده است.



شکل ۶: شبه کد الگوریتم تشخیص برخورد رابط با محیط بر اساس مقدار نیروی تماسی و محاسبه دینامیک داخلی تخمین اغتشاش نامعلوم به عنوان یک قانون بروز رسانی در سیستم رؤیتگر اغتشاش برای تخمین اغتشاش نامعلوم

تفاوت رابط انعطاف‌پذیر با رابط صلب در این است که زاویه‌ی موتور دیگر با زاویه‌ی دیگر نقاط روی رابط برابر نیست. به عبارت دیگر هر نقطه روی رابط دارای مقداری انحراف نسبت به حالت صلب است. بایستی به طریقی علی‌رغم انحراف موجود در رابط بتوان زاویه‌ی نقطه‌ی دلخواه در روی رابط را به مقدار مرجع قرار داد. بنابراین برای کنترل موقعیت دقیق، تخمین و حذف اثر خاصیت انعطاف‌پذیری رابط ضروری به‌نظر می‌رسد.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]

همان‌طور که ذکر شد، در کنترل‌کننده امپدانس برای محاسبه‌ی بهره امپدانس برای تنظیم نیروی تماسی در نیروی مطلوب، به اطلاعات زاویه‌ی نقطه‌ی برخورد رابط با جسم یا به‌عبارتی زاویه‌ی ایستای جسم، پارامترهای دینامیکی جسم و سنجش نیروی تماسی نیاز داریم. از طرفی مقادیر قابل سنجش فقط گشتاور اعمالی به رابط و زاویه‌ی موتور هستند. بنابراین بایستی با استفاده از این مقادیر و روابط حاکم بر سیستم به اطلاعات مورد نظر برای زاویه‌ی نقطه برخورد و نیروی تماسی رسید. زاویه‌ی انتهای آزاد رابط به سادگی با استفاده از رابطه‌ی (۸) بدست می‌آید:

$$\theta_t = \theta_m - \frac{\Gamma_{coup}}{c} \qquad (۲۶)$$

همچنین برای بدست آوردن نیروی تماسی از ترکیب روابط (۷) و (۸) داریم:

$$F_e = \frac{1}{l}\left(\Gamma_{coup} - ml\ddot{\theta}_t\right) \qquad (۲۷)$$

حال اگر پارامترهای سختی و میرایی محیط معلوم باشند، با استفاده از رابطه(۱۶) براحتی می‌توان موقعیت ایستای جسم را طبق رابطه‌ی زیر تعیین نمود:

$$\theta_c = \theta_t + \frac{\nu_e}{k_e}\dot{\theta}_t - \frac{F_e}{(k_e l)} \qquad (۲۸)$$

این رابطه برای محاسبه‌ی موقعیت ایستای جسم زمانی کارآمد است که پارامترهای دینامیکی محیط معلوم باشند. حال آنکه در این پژوهش این پارامترها نامعلوم فرض شده‌اند. بنابراین بایستی به طریق دیگری از این رابطه استفاده کرد. فرض می‌کنیم که رابط با یک جسم فرضی با ضریب سختی معلوم k_e^* و میرایی معلوم ν_e^* برخورد می‌کند. به این ترتیب با استفاده از رابطه‌ی (۲۸) موقعیت جسم فرضی θ_c^* نیز براحتی بدست می‌آید. این اطلاعات در ادامه برای محاسبه‌ی بهره‌ی امپدانس جهت تنظیم نیروی تماسی در مقدار نیروی مطلوب بکار می‌روند. موقعیت جسم فرضی با توجه به رابطه‌ی (۲۸) مطابق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\theta_c^* = \theta_t + \frac{\nu_e^*}{k_e^*}\dot{\theta}_t - \frac{F_e}{(k_e^* l)} \qquad (۲۹)$$

همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، هدف کنترل امپدانس ایجاد رابطه‌ی دینامیکی مطلوب(امپدانس مطلوب) بین جابجایی نقطه اثر انتهایی و نیروی تماسی است. بطور معمول، این امپدانس مطلوب به‌صورت یک سیستم مرتبه دوم خطی انتخاب می‌شود بطوری‌که بتوان رابطه‌ی دینامیکی بین جابجایی نقطه اثر انتهایی و نیروی تماسی را توسط سیستم جرم-فنر-دمپر[۱] کنترل نمود. رابطه‌ی معمولِ امپدانس مطلوب به صورت معادله دیفرانسیل زیر بیان می‌شود:

$$F_e = k_I\left(\ddot{\theta}_d - \ddot{\theta}_r\right) + k_d\left(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_r\right) + k_p\left(\theta_d - \theta_r\right) \qquad (۳۰)$$

که در آن θ_d زاویه‌ی مطلوب، θ_r زاویه‌ی مرجع برای کنترل‌کننده موقعیت حلقه درونی، k_I ضریب لختی، k_d ضریب میرایی، k_p ضریب سختی (بهره) و F_e نیروی تماسی است که مطابق رابطه‌ی (۱۱) بدست می‌آید. در حالت ماندگار و با فرض کنترل موقعیت دقیق حلقه‌ی درونی و تنظیم نیرو در مقدار مطلوب، روابط (۳۰) و (۱۱) مطابق روابط زیر خواهند بود:

$$F_d = k_p^*\left(\theta_d - \theta_t\right) \qquad (۳۱)$$

$$F_d = k_e^* l\left(\theta_t - \theta_c^*\right) \qquad (۳۲)$$

در رابطه (۳۱) k_p^* بهره‌ی امپدانس متناظر با اطلاعات جسم فرضی برای تنظیم نیرو در مقدار مطلوب است. بنابراین می‌توان با استفاده از روابط (۳۱) و (۳۲) ضریب سختی امپدانس را بر طبق رابطه‌ی (۳۳) طوری اختیار کرد تا نیروی اعمالی در حالت ماندگار به مقدار مطلوب برسد:

$$k_p^* = \frac{F_d k_e^* l}{k_e^* l\left(\theta_d - \theta_c^*\right) - F_d} \qquad (۳۳)$$

همان‌طورکه ذکر شد، بخش اصلی طراحی کنترل‌کننده امپدانس در این پژوهش به طراحی کنترل موقعیت حلقه درونی مربوط می‌شود. چالش اصلی کنترل‌کننده موقعیت در رابط انعطاف‌پذیر، حذف انحراف ناشی از انعطاف‌پذیری رابط است. برای حل این چالش می‌توان بازوی انعطاف‌پذیر را همانند یک بازوی صلب در نظر گرفت با این فرض که انحراف حاصل از انعطاف‌پذیری در رابط ناشی از یک اغتشاش ورودی است. برای کنترل حلقه درونی موقعیت در این پژوهش از کنترل‌کننده مود لغزشی استفاده شده است. اثر نامطلوب انحراف در رابط بایستی به نحوی حذف شود. در راستای حذف این اثر نامطلوب کنترل‌کننده مود لغزشی پیشنهادی به یک رؤیتگر اغتشاش مجهز شده است. در ادامه کنترل‌کننده مود لغزشی بر مبنای رؤیتگر اغتشاش توصیف می‌شود.

۳-۱ کنترل مود لغزشی بر مبنای رؤیتگر اغتشاش

مطابق رابطه (۱۱) نیروی اعمالی به محیط قابل محاسبه است، بنابراین با جایگزینی رابطه (۱۱) در رابطه‌ی (۱۴) داریم:

$$\Gamma_{coup} = ml^2\Delta\ddot{\theta}_t + F_e l \qquad (۳۴)$$

همچنین رابطه (۴) را که مربوط به دینامیک موتور جریان-مستقیم است را می‌توان به صورت رابطه‌ی زیر باز نویسی کرد:

$$knV = Jn^2\Delta\ddot{\theta}_m + \nu n^2\Delta\dot{\theta}_m + \Gamma_{coup} + \Gamma^d_{coul} \qquad (۳۵)$$

ایده‌ی اصلی کنترل موقعیت رابط انعطاف‌پذیر در اینجا بر این فرض استوار است که می‌توان انحراف در رابط را ناشی از اغتشاش در ورودی

[۱] Mass-spring-damper system

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]

کنترلی دانست. بنابراین با توجه به این فرض، زاویه‌ی انتهای آزاد رابط θ_t را همانند رابط صلب با زاویه‌ی موتور θ_m برابر قرار می‌دهیم و در عوض منشا انحراف را بعنوان اغتشاش در ولتاژ ورودی لحاظ می‌کنیم. بنابراین معادله رابط به‌همراه موتور به یک دینامیک مرتبه دوم تبدیل می‌شود که در نمایش معادلات فضای حالت با رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = ax_2(t) + b(u + V_d) + z + \Gamma_{coul}^d \end{cases} \quad (۳۶)$$

که در آن $x_1(t) = \Delta\theta(t)$، $x_2(t) = \Delta\dot{\theta}(t)$، $a = -\frac{vn^2}{Jn^2 + ml^2}$، $b = \frac{Kn}{Jn^2 + ml^2}$ و $z = -\frac{F_e l}{Jn^2 + ml^2}$ است. Γ_{coul}^d ورودی اغتشاش نامعلوم مربوط به اصطکاک کولمبی، u سیگنال کنترل و V_d را ولتاژ اغتشاش ورودی نامعلوم مربوط به انحراف ناشی ازکشسانی رابط در نظر می‌گیریم. در ادامه، سطح لغزش σ را به صورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌کنیم:

$$\sigma = S(\theta_t - \theta_r) + (\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_r) \quad (۳۷)$$

که در آن S پارامتر کنترلی است که توسط طرّاح تعیین می‌شود. با مشتق‌گیری از رابطه‌ی (۳۷) و جایگذاری از رابطه‌ی(۳۶) بدست می‌آوریم:

$$\dot{\sigma} = (S + a)x_2 + bV - (S\dot{\theta}_r + \ddot{\theta}_r) + z + \Gamma_{coul}^d \quad (۳۸)$$

که در آن $V = u + V_d$ است. همان‌طور که ذکر شد، اثر نامطلوب مربوط به کشسانی رابط را روی کنترل موقعیت با اغتشاش V_d مدل می‌کنیم که در ورودی به سیستم اعمال می‌شود. بنابراین داریم:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= (S + a)x_2 + b(u + V_d) - (S\dot{\theta}_r + \ddot{\theta}_r) + z + \Gamma_{coul}^d \\ &= (S + a)x_2 + bu - -(S\dot{\theta}_r + \ddot{\theta}_r) + z + e(x,t) \end{aligned} \quad (۳۹)$$

که در آن $e(x,t)$ جمله‌ی اغتشاش نامعلوم است و با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$e(x,t) = bV_d + \Gamma_{coul}^d \quad (۴۰)$$

در ادامه برای سادگی، اغتشاش نامعلوم را تنها با e نشان می‌دهیم. سیگنال کنترل u به سه عبارت u_{eq}، u_n و u_s تقسیم می‌شود. عبارت u_{eq} برای جبران جملات معلوم و u_n برای جبران اغتشاش نامعلوم e و عبارت ناپیوستهِ غیرخطی u_s با تقریب هموارش برای کاهش پدیده وزوز در فاز رسیدن به سطح لغزشِ کنترل مود لغزشی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ایده‌ی اصلی طرح پیشنهادی تخمین اغتشاش نامعلوم توسط رؤیتگر اغتشاش و سپس استفاده از منفی مقدار تخمینی در u_n برای حذف اثر آن است. فعلاً فرض می‌کنیم که تخمین اغتشاش $\hat{e}$ موجود است. روش تخمین اغتشاش با استفاده از رؤیتگر اغتشاش بعد از معرفی کنترل کننده در زیر بخش۳-۲ توصیف می‌شود.

$$u = u_{eq} + u_n + u_s \quad (۴۱)$$

$$u_{eq} = -\frac{1}{b}\left((S + a)x_2 - (S\dot{\theta}_r + \ddot{\theta}_r) + z + k_s\sigma\right) \quad (۴۲)$$

$$u_n = -\frac{1}{b}\hat{e} \quad (۴۳)$$

$$u_s = -\frac{1}{b}k_{st}\ \mathrm{sat}(\sigma) \quad (۴۴)$$

$$\mathrm{sat}(\sigma) = \begin{cases} sgn\,\sigma & if\ |\sigma| > \varphi \\ \dfrac{\sigma}{\varphi} & if\ |\sigma| \geq \varphi \end{cases} \quad (۴۵)$$

که در آن پارامترهای k_s، k_{st} و φ ثابت های مثبتی هستند که توسط طرّاح تعیین می‌شود. با جایگذاری رابطه‌های (۴۱) و (۴۲) در رابطه‌ی(۳۹) داریم:

$$\dot{\sigma} = -k_s\sigma + e + bu_n + bu_s \quad (۴۶)$$

با جایگذاری رابطه‌ی (۴۳) و (۴۴) در(۴۶) دینامیک سطح لغزش مطابق رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\dot{\sigma} = -k_s\sigma - k_{st}\,sat(\sigma) + \tilde{e} \quad (۴۷)$$

که در آن $\tilde{e} = e - \hat{e}$ خطای تخمین اغتشاش است. اگر تخمین اغتشاش طوری باشد تا خطای تخمین به صفر میل کند، در این صورت شرایط مود لغزشی نیز برقرار می‌شود و علیرغم وجود انحراف در رابط، مسیر مرجع حاصل از بلوک امپدانس ردیابی می‌شود. در ادامه رؤیتگر اغتشاش توصیف می‌شود.

۳-۲ رؤیتگر اغتشاش

رؤیتگر اغتشاش مورد استفاده در این مقاله یک نسخه‌ی تغییر یافته از رؤیتگر معرفی شده در مرجع [۲۰] است. فرض می‌کنیم تخمین اغتشاش e با رابطه‌ی زیر قابل بیان باشد:

$$\hat{e} = \hat{d}(t) + p(\sigma) \quad (۴۸)$$

که در آن $p(\sigma)$ یک تابع خطی یا غیرخطی از متغیر σ است. $\hat{d}(t)$ بایستی طوری تخمین زده شود تا خطای تخمینِ $\tilde{e}$ به صفر میل کند. با مشتق‌گیری از رابطه‌ی (۴۸) با جایگذاری $\dot{\sigma}$ از رابطه‌ی (۴۶) رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{\hat{e}} = \dot{\hat{d}}(t) + \frac{\partial p}{\partial \sigma}(-k_s\sigma + e + bu_n + bu_s) \quad (۴۹)$$

به این ترتیب با در نظر گرفتن دینامیک $\hat{d}(t)$ به صورت یک قانون به‌روز رسانی مطابق رابطه‌ی زیر:

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]

$$\dot{\hat{d}}(t) = -\frac{\partial p}{\partial \sigma}\left(-k_s\sigma + \hat{e} + bu_n + bu_s\right) \quad (۵۰)$$

دینامیک تخمین اغتشاش نیز به صورت رابطه (۵۱) بدست می‌آید:

$$\dot{\hat{e}} = \frac{\partial p}{\partial \sigma}\tilde{e} \quad (۵۱)$$

باتفریق دو طرف رابطه‌ی (۵۱) از عبارت $\dot{e}$ رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{\tilde{e}} = -\frac{\partial p}{\partial \sigma}\tilde{e} + \dot{e} \quad (۵۲)$$

دینامیک خطای تخمین $\tilde{e}$ نشان می‌دهد که برای پایداری بایستی تابع $p(\sigma)$ به‌نحوی انتخاب شود که $\frac{\partial p}{\partial \sigma}$ تابع‌ای مثبت و اندازه‌ی مشتق اغتشاش طبق رابطه‌ی زیر محدود باشد.

$$|\dot{e}| < \mu \quad (۵۳)$$

که در آن μ یک عدد ثابت مثبت است.

٤- تحلیل پایداری سیستم کنترل حلقه بسته

در این بخش، شرایط پایداری مورد مطالعه، برگرفته از مرجع [۲۱] می‌باشد. برای این منظور تابع لیاپانوف مطابق رابطه‌ی زیر معرفی می‌شود:

$$V(\sigma,\tilde{e}) = \frac{1}{2}\left(\sigma^2 + \tilde{e}^2\right) \quad (۵۴)$$

با مشتق‌گیری از $V(\sigma,\tilde{e})$ و استفاده از روابط (۴۷) و (۵۲) داریم:

$$\dot{V}(\sigma,\tilde{e}) = -k_s\sigma^2 - k_{st}\,sat(\sigma)\sigma + \tilde{e}\dot{e} + \tilde{e}\sigma - \frac{\partial p}{\partial \sigma}\tilde{e}^2 \quad (۵۵)$$

با استفاده از ناتساوی یانگ[۱] [۲۲]، $ab \le \frac{1}{2}\left(a^2+b^2\right)$ و رابطه‌ی (۵۳) و پس از ساده‌سازی داریم:

$$\dot{V}(\sigma,\tilde{e}) \le -\left(k_s - \frac{1}{2}\right)\sigma^2 - \left(\frac{\partial p}{\partial \sigma} - 1\right)\tilde{e}^2 + \frac{1}{2}\mu^2 - k_{st}\,sat(\sigma)\sigma \quad (۵۶)$$

پارامترهای کنترلی را می‌توان طوری اختیار کرد تا همواره $\left(k_s - \frac{1}{2}\right)$ و $\left(\frac{\partial p}{\partial \sigma} - 1\right)$. با توجه به رابطه‌ی (۵۶) می‌توان دریافت که دینامیک‌های سطح لغزش σ تخمین اغتشاش $\tilde{e}$ پایدار مجانبی نیست ولی با توجه به کار انجام شده در مرجع [۲۳] کراندار است. با حذف جزئیات مشتق‌گیری کران‌های روی $|\tilde{e}|$ و $|\sigma|$ به‌ترتیب مطابق روابط (۵۷) و (۵۸) بدست می‌آید:

$$|\tilde{e}| \le \lambda = \frac{\mu}{\sqrt{2\left(\frac{\partial p}{\partial \sigma} - 1\right)}} \quad (۵۷)$$

$$|\sigma| \le \frac{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 4k_s\mu\lambda}}{2k_s} \quad (۵۸)$$

۵- نتایج شبیه‌سازی

۵-۱ نتایج شبیه سازی برای حرکت آزاد و مقید

شبیه سازی عددی این کار در محیط نرم‌افزاری سیمولینک متلب انجام شده است و برای حل مجموعه معادلات دیفرانسیل از حل کننده رانگ-کوتا[۲] و اندازه گام‌های ثابت[۳] ۰/۰۰۱ استفاده شده است. پارامترهای کنترلی شامل پارامترهای بلوک امپدانس و رؤیتگر مود لغزشی مطابق جدول ۱ با سعی و خطا انتخاب شده اند. همچنین برخی از مقادیر پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در این شبیه سازی برگرفته از مرجع [۱۷] در جدول ۲ آمده است. در ادامه، نتایج شبیه سازی برای هر دو حرکت آزاد و مقید بررسی شده است. برای شبیه سازی، نیروی تماسی مطلوب برای حرکت مقید برابر ۲۰ نیوتن ($F_d = 20\,N$) انتخاب شده است و زاویه‌ی مطلوب $\theta_d(t)$ برای حرکت آزاد مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\theta_d(t) = \begin{cases} 5t^2; & 0 \le t < 1 \\ 10t - 5\ ; & 1 \le t < 3 \\ 10\left(4t - \frac{t^2}{2}\right) - 50; & 3 \le t < 4 \\ 30°; & t \ge 4 \end{cases} \quad (۵۹)$$

جدول ۱: پارامترهای کنترلی سیستم.

پارامتر	توصیف پارامتر	مقدار
مشخصات امپدانس مطلوب		
k_p	ضریب سختی	k_p^*
k_d	ضریب میرایی	$0.2k_p^*$
k_I	ضریب لختی	$0.01k_p^*$
مشخصات کنترل کننده موقعیت مود لغزشی		
S	پارامتر کنترلی	5
k_s	پارامتر کنترلی	1
k_{st}	بهره کنترل فیدبک سوئیچینگ	0.1
$\frac{\partial p}{\partial \sigma_1}$	پارامتر کنترلی برای حرکت آزاد	2
$\frac{\partial p}{\partial \sigma_2}$	پارامتر کنترلی برای حرکت مقید	15
مشخصات جسم فرضی		
k_e^*	ضریب سختی جسم فرضی	$5\ N/m$
v_e^*	ضریب میرایی جسم فرضی	$1\ N.s/m$

[۱] Young inequality

[۲] Runge-Kutta solver

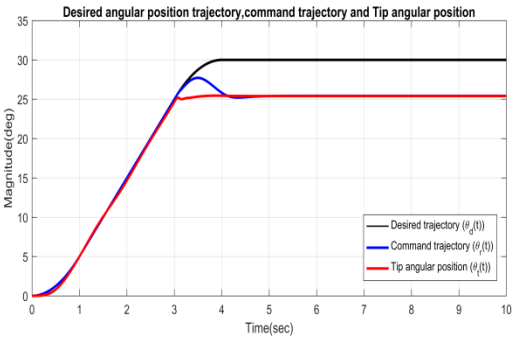
[۳] Fixed step size

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]

جدول ۲: پارامترهای فیزیکی سیستم.

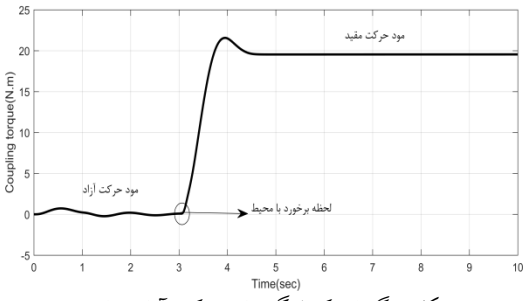
پارامتر	توصیف پارامتر	مقدار
	مشخصات رابط انعطاف‌پذیر	
E	مدول استیسیته	$122\times10^{9}\ pa$
I	ممان اینرسی سطح مقطع	$3.017\times10^{-12}\ m^4$
ρ	چگالی	$1800\ kg/m^3$
l	طول	$0.98\ m$
d	قطر	$2.8\times10^{-3}\ m$
m	جرم	$43.71\times10^{-3}\ kg$
	مشخصات موتور	
J	اینرسی کلی موتور و چرخ دنده	$6.87\times10^{-5}\ kg\,m^2$
v	ضریب اصطکاک ویسکوز	$1.041\times10^{-3}\ kg\,m^2/s$
n	نسبت کاهش دنده موتور	50
k	ثابت موتور	$2.1\times10^{-1}\ N\,m/V$
V_{sat}	ولتاژ اشباع تقویت کننده سروو	$\pm10V$

شکل ۷ مسیر مربوط به زاویه مطلوب، زاویه مرجع تولید شده توسط بلوک امپدانس و زاویه انتهای رابط را برای حرکت آزاد و مقید نشان می‌دهد.



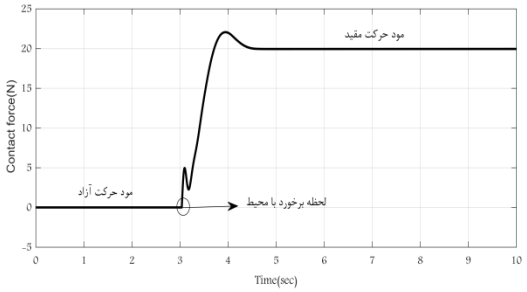
شکل ۷: مسیر مربوط به زاویه مطلوب، زاویه مرجع تولید شده توسط بلوک امپدانس و زاویه انتهای رابط

همان‌طور که از شکل ۴ مشاهده می‌شود تا قبل از ۳ ثانیه برای حرکت آزاد رابط، زاویه‌ی انتهایی رابط به خوبی زاویه‌ی مطلوب را دنبال می‌کند و برای حرکت آزاد کنترل موقعیت به‌طور کامل انجام می‌شود و برای لحظه بعد از ۳ ثانیه که نقطه‌ی انتهایی رابط با محیط برخورد می‌کند، کنترل نیرو به‌طور کامل مطابق شکل ۹ انجام می‌شود. شکل‌های ۸ و ۹ به‌ترتیب گشتاور اعمالی از طرف موتور به رابط (Γ_{coup}) و نیروی تماسی (F_e) را برای هر دو حرکت آزاد و مقید نشان می‌دهد.



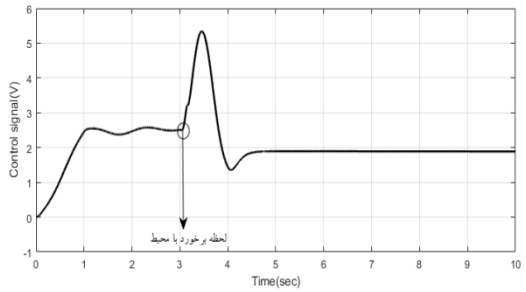
شکل ۸: گشتاور کوپلینگ برای حرکت آزاد و مقید

همان‌گونه که از شکل ۸ مشاهده می‌شود دامنه گشتاورکوپلینگ برای مود حرکت آزاد (کنترل موقعیت) کم و با شروع مود حرکت مقید (کنترل نیرو) و برخورد رابط با محیط، دامنه‌ی گشتاور کوپلینگ جهت اعمال نیروی مطلوب به محیط، به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.



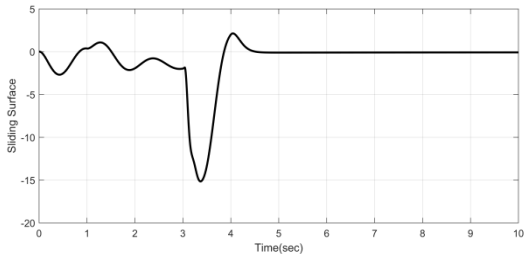
شکل ۹: نیروی تماسی برای حرکت آزاد و مقید

همان‌گونه از شکل ۹ مشاهده می‌شود، لحظه بر خورد انتهای رابط با محیط در لحظه‌ی ۳ ثانیه اتفاق افتاده است. واضح است که قبل از این لحظه حرکت آزاد داریم و نیروی تماسی صفر است. بعد از این لحظه حرکت مقید داریم و نیرو تماسی به‌خوبی در زمان بسیار کمی مقدار مطلوب ۲۰ نیوتن را دنبال می‌کند. شکل ۷ سیگنال کنترل مربوط به کنترل‌کننده پیشنهادی را برای هر دو حرکت آزاد و مقید نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: سیگنال کنترل برای حرکت آزاد و مقید

همان‌طور که از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، دامنه سیگنال کنترلی برای مود حرکت آزاد، قبل از برخورد رابط با محیط ($t<3\ \sec$) و حرکت مقید بعد از لحظه برخورد رابط با محیط ($t\geq3\ \sec$) مناسب می‌باشد و حد ولتاژ اشباع منبع تغذیه تجاوز نمی‌کند. شکل ۱۱ سطح لغزش کنترل کننده مود لغزشی مجهز به رؤیتگر اغتشاش را برای دو مود حرکت آزاد و مقید نشان می‌دهد.



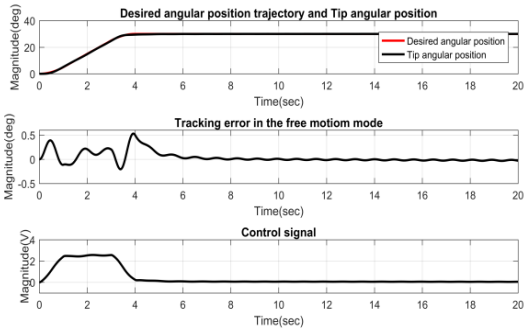
شکل ۱۱: سطح لغزش کنترل کننده مود لغزشی برای حرکت آزاد و مقید

همان‌گونه که از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود به دلیل وجود رؤیتگر اغتشاش و استفاده از تابع هموارکننده‌ی $sat(\sigma)$ در قانون کنترلی، پدیده وزوز روی سطح لغزش مشاهده نمی‌شود.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]

۵-۲ نتایج شبیه سازی برای حرکت آزاد (کنترل موقعیت)

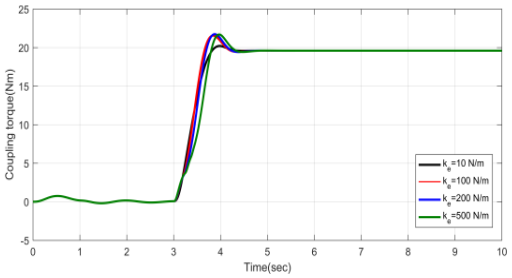
در این بخش، نتایج شبیه سازی برای زمانی که کنترل امپدانس به یک استراتژی کنترل موقعیت تقلیل می‌یابد، آمده است. در این شرایط، موقعیت محیط به‌گونه ای انتخاب می‌شود که رابط با محیط بر خوردی نداشته باشد. بنابراین در این حالت برخوردی بین انتهای رابط و محیط انجام نمی‌شود و نیروی تماسی صفر نیوتن است($F_e = 0\,N$). برای نشان دادن قابلیت استراتژی کنترل پیشنهادی در ردیابی کامل موقعیت زاویه ای مطلوب، مسیر θ_d را به عنوان زاویه مطلوب مطابق رابطه‌ی(۵۹) در نظر می‌گیریم. در شبیه سازی با توجه به دامنه‌ی θ_d، برای عدم برخورد انتهای رابط با محیط، پارامتر مربوط به موقعیت محیط در زاویه ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است($\theta_{pe} = 45°$). شکل ۱۲ ردیابی زاویه انتهایی رابط را به‌ازای مسیر مرجع مطلوب θ_d نشان می‌دهد.



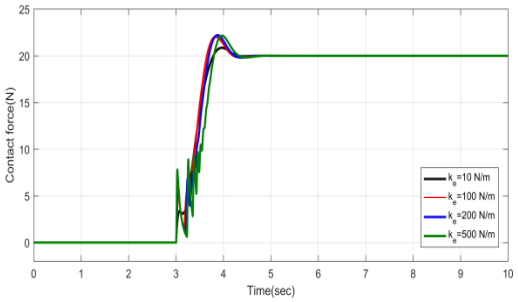
شکل ۱۲: ردیابی مسیر مطلوب توسط زاویه انتهای رابط در مود حرکت آزاد

۵-۳ نتایج شبیه سازی برای حرکت آزاد و مقید به ازای پارمترهای مختلف محیط

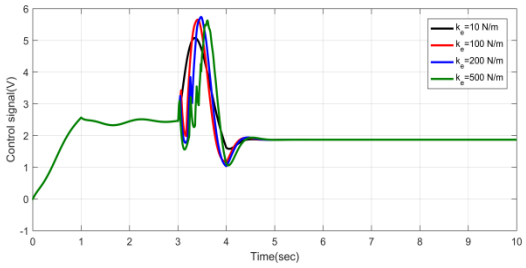
در این بخش، برای نشان دادن میزان مقاومت استراتژی کنترلی در مقابل تغییرات پارامترهای محیط شبیه سازی به ازای مقادیر مختلف از پارامترهای محیط انجام شده است. شکل های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب گشتاورکوپلینگ، نیروی تماسی و سیگنال کنترلی را به ازای یک مقدار ثابت از ضریب میرایی $v_e = 1\,\frac{N}{m}$ و مقادیر مختلف از ضریب سختی محیط ($k_e = 10\,\frac{Ns}{m}, 100\,\frac{Ns}{m}, 200\,\frac{Ns}{m}, 500\,\frac{Ns}{m}$) نشان می‌دهند.



شکل ۱۳: گشتاور کوپلینگ برای حرکت آزاد و مقید به ازای مقادیر مختلف از سختیِ محیط

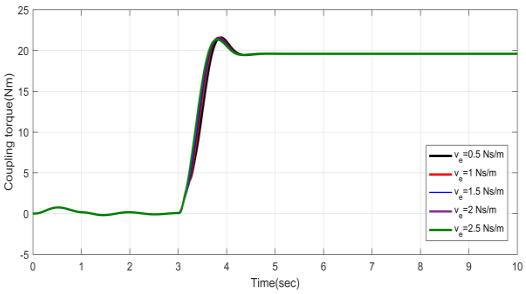


شکل ۱۴: نیروی تماسی برای حرکت آزاد و مقید به ازای مقادیر مختلف از سختیِ محیط



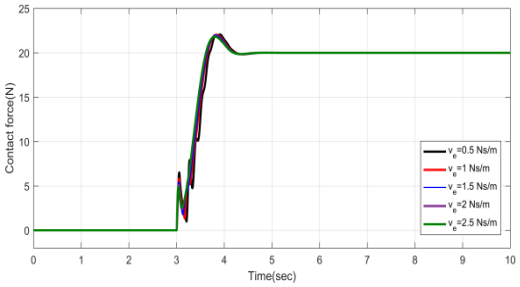
شکل ۱۵: سیگنال کنترلی برای حرکت آزاد و مقید به ازای مقادیر مختلف از سختیِ محیط

همان‌طور که از شکل ۱۴ مشاهده می‌شود با برخورد رابط با محیط در لحظه‌ی ۳ ثانیه ($t = 3\ \text{sec}$) نیروی مطلوب ۲۰ نیوتن ($F_d = 20\,N$) به ازای مقادیر مختلف از سختیِ محیط به‌خوبی دنبال می‌شود. البته ارتعاشاتی در فاز برخورد، به خصوص برای مقادیر بزرگ از سختی محیط (محیط سفت) ایجاد می‌شود که نشان دهنده نیروهای ضربه‌ای در لحظه‌ی برخورد رابط با محیط در نقطه‌ی تماس است. شدت این ارتعاشات و دامنه‌ی این نیروهای ضربه ای برای محیط های سفت، نسبت به محیط‌های نرم بیشتر است. در ادامه، شبیه سازی برای مقادیر مختلف از ضریب میرایی محیط انجام داده شده است. شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ به ترتیب گشتاورکوپلینگ، نیروی تماسی و سیگنال کنترلی را به ازای یک مقدار ثابت از سختی محیط $k_e = 100\,\frac{N}{m}$ و مقادیر مختلف از ضریب میرایی محیط ($v_e = 0.5\,\frac{Ns}{m}, 1\,\frac{Ns}{m}, 1.5\,\frac{Ns}{m}, 2\,\frac{Ns}{m}, 2.5\,\frac{Ns}{m}$) نشان می‌دهند.



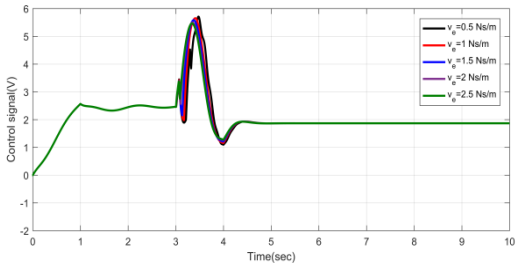
شکل ۱۶: گشتاور کوپلینگ برای حرکت آزاد و مقید به ازای مقادیر مختلف از ضریب میرایی محیط

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]



شکل ۱۷: نیروی تماسی برای حرکت آزاد و مقید به ازای مقادیر مختلف از ضریب میرایی محیط

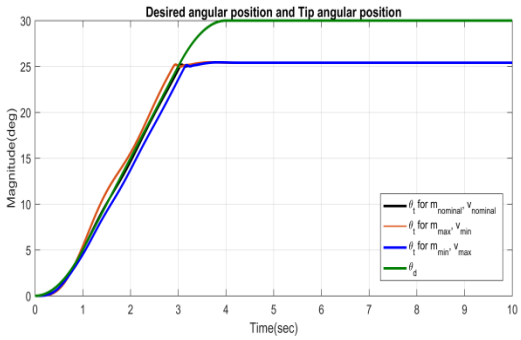
همان‌گونه که از شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، با برخورد رابط با محیط در لحظه‌ی ۳ ثانیه ($t=3\ \sec$) نیروی مطلوب ۲۰ نیوتن ($F_d=20\,N$) به ازای مقادیر مختلف از میرایی محیط به‌خوبی دنبال می‌شود.



شکل ۱۸: سیگنال کنترلی برای حرکت آزاد و مقید به ازای مقادیر مختلف از ضریب میرایی محیط

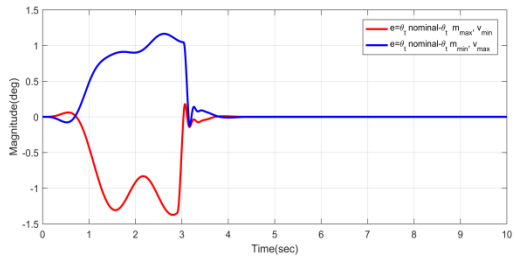
۴-۵ نتایج شبیه سازی برای حرکت آزاد و مقید به ازای تغییرات جرم رابط و پارامتر موتور

در این بخش، برای نشان دادن میزان مقاوم بودن استراتژی کنترل پیشنهادی در مقابل تغییرات جرم رابط (m) و تغییرات ضریب اصطکاک ویسکوز موتور (v)، شبیه سازی به ازای افزایش ۲۵ درصدی جرم رابط ($m_{\max}=m_n+0.25m_n, m_n=044kg$) و کاهش ۲۵ درصدی ضریب اصطکاک ویسکوز موتو ($v_{\min}=v_n-0.25v_n,\ v_n=1.041\times10^{-3}\ kg\,m^2/s$) و همچنین، به ازای کاهش ۲۵ درصدی جرم رابط ($m_{\min}=m_n-0.25m_n$) و افزایش ۲۵ درصدی ضریب اصطکاک ویسکوز موتور ($v_{\max}=v_n+0.25v_n$) نسبت به مقدار نامی، در حضور اغتشاش نامعلوم اصطکاک کولمبی (Γ^d_{coul})، برای حرکت مقید و آزاد انجام شده است. مقاومت کنترل‌کننده نسبت به تغییرات جرم رابط و ضریب ویسکوز موتور، از این جنبه اهمیت دارد که عموماً این تغییرات می‌تواند از ۱۰ درصد مقدار نامی بیشتر باشد. ولیکن، سایر پارامترها با استفاده از شناسایی سیستم با دقت قابل قبولی بدست می‌آیند. شکل های ۱۹،۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳ به ترتیب ردیابی مسیر مرجع مطلوب برای حرکت آزاد، جزئیات اختلاف وضعیت زاویه‌ای نوک رابط نسبت به مقدار نامی‌اش در حرکت آزاد، نیروی تماسی در حرکت مقید، گشتاورکوپلینگ، و سیگنال کنترل را به ازای تغییرات مذکور نشان می‌دهد.

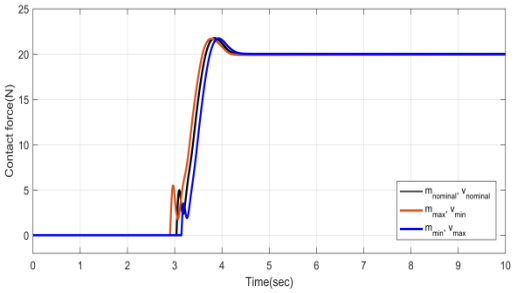


شکل ۱۹: ردیابی مسیر مرجع مطلوب، به ازای افزایش ۲۵ درصدی جرم رابط و کاهش ۲۵ درصدی ضریب اصطکاک ویسکوز موتور و بالعکس، کاهش ۲۵ درصدی جرم رابط و افزایش ۲۵ درصدی ضریب اصطکاک ویسکوز موتور در حضور اغتشاش نامعلوم اصطکاک کولمبی

همان‌گونه که از شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، بیشترین انحراف وضعیت نوک رابط نسبت به حالت نامی‌اش و البته نسبت به مسیر مرجع مطلوب کمتر از ۱/۵ درجه است (1.37°). این اختلاف مربوط به زمانی است که جرم رابط ۲۵ درصد افزایش ($m_{\max}=m_n+0.25m_n$) و ضریب اصطکاک ویسکوز موتور ۲۵ درصدکاهش پیدا می‌کند ($v_{\min}=v_n-0.25v_n$). بنابراین، طرح کنترل پیشنهادی مقاومت مناسبی نسبت به تغییرات جرم رابط و تغییرات ضریب اصطکاک ویسکوز موتور در فاز حرکت آزاد دارد. جزئیات این اختلاف ناچیز وضعیت زاویه ای نوک رابط در اثر تغییرات مذکور نسبت به حالت نامی‌اش در شکل ۲۰ آمده است.



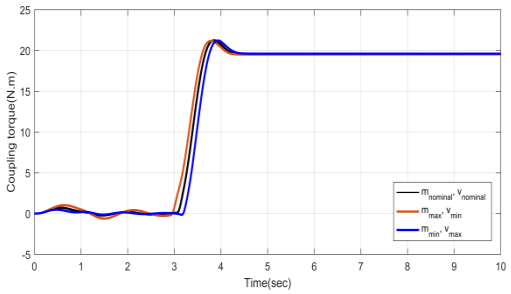
شکل ۲۰: جزئیات اختلاف وضعیت زاویه‌ای نوک رابط نسبت به مقدار نامی‌اش در حرکت آزاد



شکل ۲۱: نیروی تماسی به ازای افزایش ۲۵ درصدی جرم رابط و کاهش ۲۵ درصدی ضریب اصطکاک ویسکوز موتور و بالعکس، کاهش ۲۵ درصدی جرم رابط و افزایش ۲۵ درصدی ضریب اصطکاک ویسکوز موتور در حضور اغتشاش نامعلوم اصطکاک کولمبی

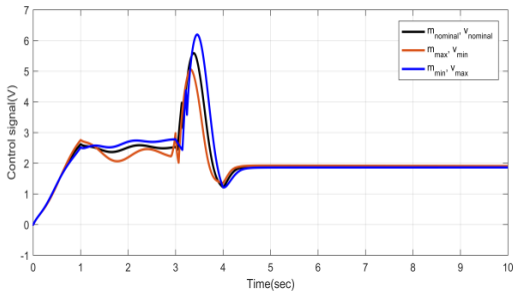
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]

همان‌طور که شکل ۲۱ نشان می‌دهد، به ازای افزایش ۲۵ درصدی جرم رابط و کاهش ۲۵ درصدی ضریب اصطکاک ویسکوز موتور و بالعکس، کاهش ۲۵ درصدی جرم رابط و افزایش ۲۵ درصدی ضریب اصطکاک ویسکوز موتور در حضور اغتشاش نامعلوم اصطکاک کولمبی تغییری محسوسی در حالت ماندگار روی نیروی تماسی نسبت به حالت نامی‌اش ایجاد نمی‌شود. این نکته نشان دهنده‌ی این مقاوم بودن استراتژی کنترل پیشنهادی در مقابل تغییرات جرم رابط و همچنین تغییرات پارامتر موتور در فاز حرکت مقید است.



شکل ۲۲: گشتاور کوپلینگ به ازای افزایش ۲۵ درصدی جرم رابط و کاهش ۲۵ درصدی ضریب اصطکاک ویسکوز موتور و بالعکس، کاهش ۲۵ درصدی جرم رابط و افزایش ۲۵ درصدی ضریب اصطکاک ویسکوز موتور در حضور اغتشاش نامعلوم اصطکاک کولمبی

همان‌گونه که از شکل ۲۲ مشاهده می‌شود، تغییرات گشتاور کوپلینگ نسبت به مقدار نامی‌اش در مود حرکت آزاد ناچیز و در مود حرکت مقید در حالت ماندگار تغییراتی مشاهده نمی‌شود.



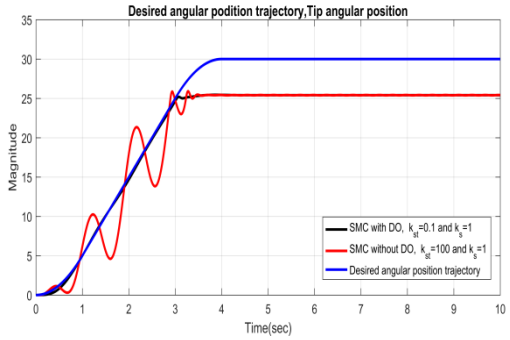
شکل ۲۳: سیگنال کنترل به ازای افزایش ۲۵ درصدی جرم رابط و کاهش ۲۵ درصدی ضریب اصطکاک ویسکوز موتور و بالعکس، کاهش ۲۵ درصدی جرم رابط و افزایش ۲۵ درصدی ضریب اصطکاک ویسکوز موتور در حضور اغتشاش نامعلوم اصطکاک کولمبی

از شکل ۲۳ مشاهده می‌شود که حداکثر مقدار سیگنال کنترل کمتر از ۶/۵ ولت است. این حداکثر مقدار مربوط به زمانی است که جرم رابط ۲۵ درصد کاهش ($m_{\min} = m_n - 0.25m_n$) و ضریب اصطکاک ویسکوز موتور ۲۵ درصد افزایش پیدا می‌کند ($v_{\max} = v_n + 0.25v_n$). بنابراین، به‌ازای اعمال تغییرات مذکور در پارامترهای سیستم، سیگنال کنترل همچنان هموار و در محدوده‌ی قابل قبول، کمتر از ولتاژ اشباع منبع تغذیه ($V_{sat} = \pm 10V$) در هر دو حرکت مقید و آزاد می‌باشد.

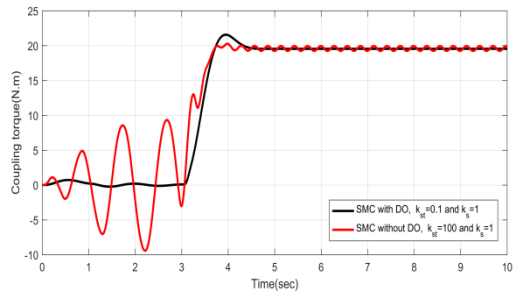
شکل ۷ مسیر مربوط به زاویه مطلوب، زاویه مرجع تولید شده توسط بلوک امپدانس و زاویه انتهای رابط را برای حرکت آزاد و مقید نشان می‌دهد.

۵-۵ نتایج شبیه سازی حاصل از اعمال کنترل مود لغزشی مجهز به رؤیتگر اغتشاش و کنترل مود لغزشی مرسوم

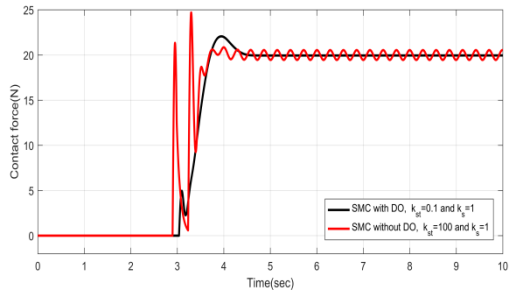
در این بخش، به‌منظور نشان دادن برتری عملکرد کنترل مود لغزشی مجهز به رؤیتگر اغتشاش مورد استفاده در این مقاله نسبت به عملکرد کنترل مود لغزشی مرسوم، شبیه سازی برای هر دو مود حرکت آزاد و مقید انجام شد. شکل‌های ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷ و ۲۸ به ترتیب مسیر زاویه‌ای مطلوب و موقعیت زاویه‌ای انتهای رابط، گشتاورکوپلینگ، نیروی تماسی و سیگنال کنترل و سطح لغزش را نشان می‌دهد.



شکل ۲۴: مسیر زاویه‌ای مطلوب و موقعیت زاویه‌ای انتهای رابط

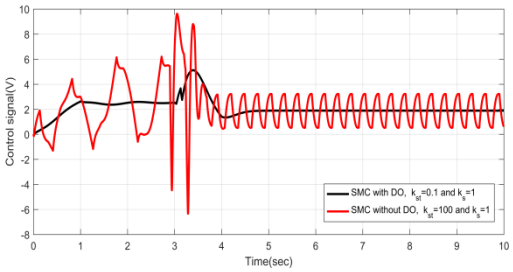


شکل ۲۵: گشتاور کوپلینگ برای حرکت آزاد و مقید

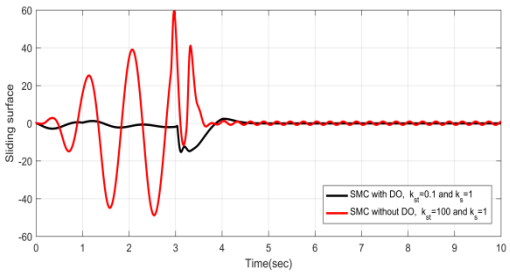


شکل ۲۶: نیروی تماسی برای حرکت آزاد و مقید

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]



شکل ۲۷: سیگنال کنترل برای حرکت آزاد و مقید



شکل ۲۸: سطح لغزش برای حرکت آزاد و مقید

همان‌طور که از شکل‌های ۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷ مشاهده می‌شود، کنترل مود لغزشی مجهز به رؤیتگر اغتشاش به کار رفته در بلوک کنترل موقعیت حلقه‌ی داخلی (نمودار مشکی) عملکردی به مراتب بهتر، در مقایسه با عملکرد کنترل مود لغزشی مرسوم (نمودار قرمز) در هردو مود حرکت آزاد و مقید دارد. در مود حرکت آزاد، مطابق شکل ۲۴، موقعیت زاویه‌ای انتهای رابط به‌طور کامل مسیر زاویه‌ای مطلوب را دنبال می کند درحالی‌که، نتایج شبیه سازی حاصل از کنترل مود لغزشی مرسوم، نشان می دهد که موقعیت زاویه‌ای انتهای رابط در ردیابی مسیر مطلوب ناتوان است. همچنین در مود حرکت مقید، مطابق شکل ۲۶، ردیابی نیروی مطلوب بدون هیچ‌گونه خطایی به خوبی انجام شده است ولیکن، نتایج حاصل از اعمال کنترل مود لغزشی مرسوم نشان می‌دهد که نیروی تماسی حول نیروی مطلوب نوسان می کند. از شکل ۲۵ مشاهده می‌شود که دامنه و نوسان گشتاور کوپلینگ حاصل از اعمال کنترل مود لغزشی مرسوم، به خصوص در مود حرکت آزاد، نسبت به روش کنترل پیشنهادی بیشتر است. همچنین، مطابق شکل ۲۷، سیگنال کنترلی بدست آمده در این روش پیشنهادی، در هر دو مود حرکت آزاد و مقید، هموارتر و دارای نوسان و دامنه ولتاژ کمتری نسبت به سیگنال کنترل بدست آمده از روش کنترل مود لغزشی مرسوم می‌باشد. لازم به یادآوری است که در این مقاله، رؤیتگرِ اغتشاش مورد استفاده در کنترل مود لغزشی، علاوه بر جبران عدم قطعیت پارامترها و اغتشاش نامعلوم مربوط به اصطکاک کولمب موتور، اغتشاش ناشی از کشسانی رابط را نیز جبران می کند و به همین دلیل است که در هر دو مود حرکت آزاد و مقید عملکرد بسیار خوبی نسبت به عملکرد کنترل مود لغزشی مرسوم دارد. ضمن اینکه مطابق شکل ۲۸، در کنار بکار گیری تابع هموار کننده‌ی $sat(\sigma)$ در قانون کنترل، باعث حذف پدیده وزوز از روی سطح لغزش می‌شود.

٦- نتیجه‌گیری

در این مقاله، کنترل مقاوم امپدانس بازوی ربات با انعطاف پذیری رابط در محیطی نامعلوم ارائه شد. در روش پیشنهادیِ این مقاله، کنترل-کننده ای یکپارچه برای مودهای کاری مقید و حرکت آزاد رابط انعطاف‌پذیر ارائه شد. به این ترتیب بدون نیاز به الگوریتمی جداگانه برای تشخیص برخورد نقطه‌ی انتهایی رابط با محیط، کنترل‌کننده به‌طور خودکار از مود کاری حرکت آزاد به مود کاری مقید تغییر وضعیت می‌دهد. در این راستا، کنترل‌کننده امپدانس با حلقه‌ی درونی موقعیت بر مبنای کنترل مود لغزشیِ مجهز به رؤیتگر اغتشاش نامعلوم، پیشنهاد شد. تجهیزکنترل مود لغزشی به رؤیتگر اغتشاش باعث می‌شود تقریب مناسبی از عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات سیستم داشته باشیم و در نتیجه عملکرد سیستم نسبت به کنترل مود لغزشی مرسوم بهبود یابد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد روش کنترل پیشنهادی در کنترل موقعیت انتهای رابط در ردیابی مسیر مطلوب برای حرکت آزاد وکنترل نیرو در ردیابی نیروی مطلوب در برخورد با محیط نامعلوم عملکرد بسیار خوبی دارد. ضمن اینکه مقاومت سیستم در مقابل تغییرات پارامترهای محیط (ضریب سختی و ضریب میرایی)، تغییرات پارامترهای سیستم (تغییر جرم رابط و ضریب اصطکاک ویسکوز موتور) و ورودی اغتشاش نامعلوم ناشی از کشسانی رابط و اصطکاک کولمبی بسیار مناسب می‌باشد. به‌طوری‌که به‌ازای تغییرات ۲۵ درصدی پارامترهای سیستم، در مود حرکت آزاد، موقعیت زاویه ای انتهای رابط حداکثر ۱/۴ درجه (1.4°) نسبت به مسیر مرجع مطلوب، اختلاف دارد. در مود حرکت مقید، در حالت ماندگار، نیروی تماسی اختلاف محسوسی با نیروی مطلوب ندارد. همچنین، سیگنال کنترل هموار و مقدار آن برای انجام وظایف کنترلی در مود حرکت مقید و آزاد از مقدار اشباع ولتاژ منبع تغذیه ($V_{sat} = \pm 10V$) تجاوز نمی‌کند. لذا، این ویژگی سیگنال کنترل، پیاده سازی عملی روش کنترل پیشنهادی را کاملاً ممکن می‌سازد.

مراجع

[1] S. K. Dwivedy, and P. Eberhard, "Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review". Mechanism and Machine Theory, vol.41, Issue 3, pp. 749-777, 2006.

[2] O. Sawodny, H, Aschemann, and A. Bulach, "Mechatronical designed control of fire rescue turnable ladders as flexible link robots," In: Proceedings of the IFAC 15th triennial world congress, Barcelona; 2002.

[3] R. A. Beasley, R. D. Howe, "Model-based error correction for flexible robotic surgical

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]

[13] Heck D., Saccon A., Wouw N. V. D., and Nijmeijer H., 2016, "Guaranteeing stable tracking of hybrid position-force trajectories for a robot manipulator interacting with a stiff environment", Automatica, vol. 63, pp. 235- 247.

[14] M. Benosman, and G. Le Vey, "Control of flexible manipulators: A survey". Robotica, vol.22, Issue 5, pp. 533-545, 2004.

[15] G. Mamani, J. Besedas, and V. Feliu, "Sliding mode tracking control of a very lightweight single-link flexible robot robust to payload changes and motor Friction". Journal of Vibration and Control, vol. 18, no. 8, pp 1141-1155, 2011.

[16] C. F. Castillo-Berrio, and V. Feliu-Batlle, "Vibration-free position control for a two degrees of freedom flexible-beam sensor". Mechatronics, vol. 27, pp 1-12, 2015.

[17] I. Payo, V. Feliu, and O. D. Cortazar, "Force control of a very lightweight single-link flexible arm based on coupling torque feedback". Mechatronics, vol. 19, pp 334-347, 2009.

[18] G. R. Vossoughi, and A. Karimzadeh, "Impedance Control of a Flexible Link Robot for Constrained and Unconstrained Maneuvers Using Sliding Mode Control (SMC) Method". Scientia Iranica, vol. 14, no. 1, pp 33-45, 2007.

[19] L. Bascetta, and P. Rocco, "Modelling flexible manipulators with motors at the joints," Mathematical and Computer Modeling of Dynamical Systems, vol. 8, no. 2, pp. 157–183, 2002.

[20] W. H. Chen, "Nonlinear disturbance observer-enhanced dynamic inversion control of missiles," Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol. 26, no, 1, pp. 161–166, 2003.

[21] V. S. Deshpande, B. Mohan, P. D. Shendge, and S. B. Phadke, "Disturbance observer based sliding mode control of active suspension systems," Journal of Sound and Vibration, vol. 333, pp. 2281-2296, 2014.

[22] W. F. Trench, Introduction to Real Analysis, Pearson Education, 2003

[23] M. Corless, and G. Leitman, "Continuous state feedback guaranteeing uniform ultimate boundedness for uncertain dynamic systems," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 26, no. 5, pp. 1139–1144, 1981.

instruments," Proceedings of the robotics: science and systems, vol. I. Cambridge (MA): Massachusetts Institute of Technology; 2005.

[4] N. Hogan. "Impedance Control: an Approach to Manipulation: Part1, Part2, Part3", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 107, pp. 1-24, 1985.

[5] T. Lasky., and T. C Hsia., "On force-tracking impedance control of robot manipulators", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 274-280, 1991

[6] S. Lee, and H. S. Lee, "Intelligent control of manipulators interfacing with an uncertain environment based on generalized impedance", Proceedings of IEEE Symposium on Intelligent Control, pp. 61-66, 1991.

[7] H. Seraji, and R. Colbaugh, "Force tracking in impedance control", Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 499-506. 1993.

[8] S. Jung, T. C. Hsia, and R. G. Bonitz, "Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 12, issue. 3, pp. 474-483, 2004.

[9] M. M. Fateh, and R. Babaghasabha, "Impedance control of robots using voltage control strategy", Nonlinear Dynamics, vol. 74, pp. 277–286, 2013.

[10] M. Sharifi, S. Behzadipour, and G. R. Vossoughi, "Nonlinear model reference adaptive impedance control for human-robot interactions", Control Engineering Practice, vol. 32, pp. 9–27, 2014.

[11] Q. Xu,"Robust Impedance Control of a Compliant Microgripper for High-Speed Position/Force Regulation", IEEE transactions on industrial electronics, vol. 62, no. 2, pp. 1201- 1209, 2015.

[12] S. A. M. Dehghan, M Danesh, and F. sheikholeslam, "Adaptive hybrid force/position control of robot manipulators using an adaptive force estimator in the presence of parametric uncertainty", Advanced Robotics, vol. 29, no. 4, pp. 209–223, 2015.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.5.8]