http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

مرداد ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۵ ص‌ص ۱۳۰-۱۴۳

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/۳/۲۰
تاریخ پذیرش ۹۱/۱۰/۱۰
ارائه در سایت ۹۲/۲/۳۰

کنترل تطبیقی ترکیبی برای یک ربات چرخ‌دار با اجزای انعطاف‌پذیر

پیام زرافشان[۱]، سید علی‌اکبر موسویان[۲*]

۱- دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۹۹۹-۱۹۳۹۵، moosavian@kntu.ac.ir

چکیده- در طی یک مانور توسط سیستم رباتیک، اجزای انعطاف‌پذیر نظیر صفحات خورشیدی ممکن است تحریک گشته و شروع به ارتعاش نمایند. بنابراین، این ارتعاشات منجر به یک‌سری نیروهای اغتشاشی نوسانی می‌گردند که به پایه متحرک و جسم جابه‌جا شده اعمال و درنتیجه خطا در رده موقعیت و سرعت در مجری‌های نهایی و جسم را موجب می‌شوند که لازم است از آن جلوگیری به‌عمل آید. در این مقاله، یک روش جدید کنترل جابه‌جایی جسم توسط یک سیستم رباتیک چرخ‌دار ارائه می‌شود. بدین منظور، با درنظر گرفتن یک سیستم رباتیکی چندبازویی با صفحات خورشیدی انعطاف‌پذیر، یک روش مدلسازی دینامیک برای پیاده‌سازی‌های کنترلی در سیستم‌های چندجسمی صلب و انعطاف‌پذیر معرفی می‌شود. سپس، بر پایه مسیر طراحی‌شده برای سیستم ربات چرخ‌دار، یک کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی‌کنندهٔ ارتعاشات برای انجام جابه‌جایی جسم توسط چنین سیستم پیچیده‌ای توسعه داده می‌شود. در پایان، یک سیستم ربات چرخ‌دار که شامل دو بازو، و دوربین و آنتن به‌عنوان بازوی سوم و چهارم، همراه با دو صفحه خورشیدی که برای انجام مأموریت‌های اکتشافی در سایر کرات مطرح می‌باشد، شبیه‌سازی می‌شود. نتایج به‌دست آمده مزیت روش کنترلی پیشنهادشده برای انجام یک عملیات جابه‌جایی جسم موفق، ضمن کاهش اثرات ارتعاشات عناصر انعطاف‌پذیر را نشان می‌دهد.

کلیدواژگان: ربات چرخ‌دار، کنترل تطبیقی، انعطاف‌پذیری، جابه‌جایی جسم

Adaptive Hybrid Suppression Control of a Wheeled Mobile Robot with Flexible Solar Panels

P. Zarafshan[1], S. A. A. Moosavian[2*]

1-PhD, Mech. Eng., K. N. Toosi Univ.of Tech., Tehran, Iran
2-Prof., Mech. Eng., K. N. Toosi Univ.of Tech., Tehran, Iran
* P.O.B. 19395-1999 Tehran, moosavian@kntu.ac.ir

Abstract- Flexible members such as solar panels of robotic systems during a maneuver may get stimulated and vibrate. Therefore, such vibrations will cause some oscillatory disturbance forces on the moving base and manipulated object, which in turn produces error in the position and speed of the manipulating end-effectors, which should be prevented. In this paper, a new control algorithm for an object manipulation task by a wheeled mobile robotic system with flexible members is proposed. To this end, a new dynamics modelling approach for control implementations on compounded rigid-flexible multi-body systems is introduced. Then, based on a designed path/trajectory for a wheeled mobile robotic system, an Adaptive Hybrid Suppression Control (AHSC) is proposed to perform an object manipulation task by such complicated rigid-flexible multi-body systems. Finally, a wheeled mobile robotic system is simulated which contains two manipulators, and a rotating antenna and a camera as its third and fourth arms, appended with two solar panels as has been proposed for space explorations. Obtained results reveal the merits of the proposed AHSC algorithm which will be discussed.

Keywords: Wheeled Mobile Robot, Adaptive Control, Flexibility, Object Manipulation.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.5.9.9]

۱- مقدمه

گستره کاری بازوهای متحرک[1] در عملیات مختلف به‌صورت روزافزونی در حال افزایش می‌باشد، به‌نحوی که وسعت تحقیقات و پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه به‌خوبی نمایان‌گر این واقعیت می‌باشد[۱]. در بررسی این سیستم‌ها که از اجزای گوناگونی تشکیل شده‌اند، درنظر گرفتن انعطاف‌پذیری[2] برای بعضی از اجزای آن‌ها اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. وجود انعطاف‌پذیری در این سیستم‌های چندجسمی منجر به افزایش پیچیدگی‌هایی در مدل‌سازی آن‌ها می‌شود که مورد بحث بسیاری از محققان قرار گرفته است[۲]. از سوی دیگر، بازوهایی که دارای پایه متحرک می‌باشند برای انجام وظایفی همچون جابه‌جاکردن اجسام نیاز به کنترل پیچیده‌تری دارند. پیچیدگی‌های ناشی از انعطاف‌پذیری در این سیستم‌های چندجسمی، کنترل آن‌ها را دشوارتر نیز می‌سازد، چرا که عضو انعطاف‌پذیر می‌تواند سرعت و یا دقت در انجام وظیفه کنترلی را مختل کرده و استفاده از یک رویکرد مناسب در مهار آن را ضروری سازد. اغلب بازوهای رباتیک موجود به‌طریقی طراحی و ساخته می‌شوند که سختی لازم را دارا باشند تا بازوی نهایی بتواند با حداقل ارتعاشات به موقعیت نهایی مطلوب خود برسد. البته این سختی نباید با استفاده از طراحی‌های سنگین و حجیم به‌دست آید. چرا که وجود بازوهای صلب سنگین ناکارابودن در مصرف انرژی و سرعت حرکت نسبت به نیروی اعمالی را نشان داده است[۳]. همچنین عملیات ربات‌هایی با دقت بالا برای بازه زمانی بعد از اتمام عملیات، به‌وسیله تغییرات دینامیکی آن‌ها شدیداً محدود می‌شود. از طرف دیگر، وجود اجزای انعطاف‌پذیر بر روی ربات‌ها، مانند صفحات خورشیدی بر روی ربات‌های پایه متحرک و یا بازوهای بلند یک ربات و غیره، منجر به درنظر گرفتن تمهیداتی برای مقابله با اثرات انعطاف‌پذیری آن‌ها می‌گردد. زمان استقرار برای ارتعاش اجزای مزبور می‌تواند عملیات را به‌تاخیر بیاندازد و بنابراین با نیاز به افزایش بهره‌وری از سیستم تعارض پیدا کند. این تضاد بین سرعت بالا و دقت بالا برای انجام یک عملیات، کنترل این ربات‌ها را تبدیل به یک مسئله تحقیقاتی چالش‌برانگیز نموده است.

سیستم‌های رباتیک با عضوهای انعطاف‌پذیر، سیستم‌های دینامیکی پیوسته‌ای هستند که از معادلات دیفرانسیل معمولی و جزئی جفت‌شده و غیرخطی تبعیت می‌کنند. حل تحلیلی چنین سیستم‌هایی تقریباً امکان‌پذیر نمی‌باشد. در دینامیک اجسام چندجسمی[3]، یک دستگاه اینرسی به‌عنوان دستگاه مرجع کلی برای تشریح حرکت یک سیستم چندجسمی به‌کار می‌رود؛ همچنین، یک دستگاه مرجع واسطه، که به هر یک از اجزای انعطاف‌پذیر متصل است و جابه‌جایی‌ها و چرخش نسبی جسم را تعقیب می‌کند. از طرفی، در کنترل سیستم‌های چندجسمی با اعضای انعطاف‌پذیر، درنظر گرفتن یک مدل دینامیکی مناسب به‌وجهی که بتواند در الگوریتم‌های کنترلی، علاوه بر سادگی، کاربردی‌تر نیز باشد دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. از این‌رو ویژگی‌های یک رویکرد مناسب برای مدل‌سازی دینامیکی سیستم‌های چندجسمی انعطاف‌پذیر در الگوریتم‌های کنترلی مبتنی بر مدل برای این سیستم‌ها بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد. تمامی مراجعی که در این مقاله تاکنون مورد بررسی قرار گرفته‌اند، از یک انباشتگی در مدل‌سازی دینامیکی سیستم چندجسمی انعطاف‌پذیر بهره جسته‌اند. درحقیقت انباشتگی در مدل دینامیکی یک سیستم چندجسمی انعطاف‌پذیر، به ترکیب و جفت‌شدگی بین اثرات انعطاف‌پذیری و حرکت صلب اعضای یک سیستم چندجسمی در پارامترهای مدل دینامیکی (نظیر ماتریس جرمی و غیره) اطلاق می‌شود.

در سال‌های اخیر، تلاش‌های قابل توجهی به مدل‌سازی، طراحی و کنترل سیستم‌های دینامیکی انعطاف‌پذیر جلب شده است. تعداد نشریات مربوط به این موضوع به‌طور پیوسته‌ای افزایش یافته است. بررسی‌های مربوط به این موضوع در مقالات تحقیقی دوره‌ای ازجمله بر روی سیستم‌های انعطاف‌پذیر در مراجع [۲] تا [۳] گردآوری شده‌اند. همچنان که در عرصه جابه‌جایی اجسام برای ربات‌های پایه متحرک، در مرجع [۴]، ربات با مفاصل انعطاف‌پذیر را برای محاسبه بیشترین بار مجاز قابل حمل و در مرجع [۵]، ربات با بازوهای انعطاف‌پذیر برای گرفتن جسم[4] و در مرجع [۶]، ربات با اعضای انعطاف‌پذیر در کنترل موقعیت مجری نهایی درنظر گرفته شده‌اند و در مدل‌سازی دینامیکی سیستم یک مدل دینامیکی انباشته به‌کار

1. Robotics manipulators
2. Flexible members
3. Multi-body dynamics
4. Capturing

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.5.9.9]

برده شده است. این در حالی است که دینامیک غیرانباشته می‌تواند یک قدم موثر در بهبود و ساده‌سازی مدل‌سازی دینامیکی و کنترل سیستم‌های چندجسمی رباتیکی با پایه متحرک و اعضای انعطاف‌پذیر داشته باشد.

از سوی دیگر، قوانین کنترلی مورد استفاده در چنین سیستم‌هایی را می‌توان به دو نوع اصلی تقسیم کرد: قوانین غیرمبتنی بر مدل[1] و قوانین مبتنی بر مدل[2] (که یک مدل کامپیوتری از سیستم چندجسمی انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود) نظیر کنترلر تطبیقی که در مرجع [۶]، یک کنترلر تناسبی با ضرایب تطبیق را برای یک ربات فضایی با بازوی انعطاف‌پذیر مورد استفاده قرار داده است. این ضرایب به‌طور خودکار در حین عملیات و با پاسخ سیستم به‌نحوی تنظیم می‌شوند که پاسخ سیستم به مدل مرجع بسیار نزدیک باشد. همچنین، مرجع [۷] یک استراتژی کنترل امپدانس تطبیقی برای بازوهای انعطاف‌پذیر را با استفاده از روش کنترل مسیر مجری‌نهایی ارائه کرده است. مراجع [۹،۸] به‌طور تئوری و تجربی به بررسی کنترل نیرو و موقعیت برای یک ربات چندعضوی پایه متحرک پرداخته‌اند. مرجع [۱۰] یک کنترلر ترکیبی نیرو و موقعیت را برای بازوهای انعطاف‌پذیر متحرک، که با محیط در بیش از یک نقطه تماس دارند، درنظر گرفته است. مرجع [۱۱] کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت را بر روی بازوی انعطاف‌پذیر n عضوی فضایی انجام داده است. مرجع [۱۲] روش اغتشاشات تکین را برای تنظیم نیروهای تماسی و موقعیت عضو انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار داده است. مرجع [۱۳] از کنترل ترکیبی دو لایه برای کنترل بازوهای انعطاف‌پذیر استفاده کرده است. مرجع [۱۴] به بررسی کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت برای بازوهای همکار در فضای سه‌بعدی پرداخته است. مرجع [۱۵] نشان داده است که برای بازوهای انعطاف‌پذیر چندعضوی فضایی، ارتعاشات نمی‌توانند فقط با کنترل نیروهای تماسی خنثی شوند. مرجع [۱۶] هم کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت بازوهای چندعضوی را مورد بررسی قرار است.

در این مقاله، با درک اهمیت این موضوع، به مدل‌سازی دینامیکی یک سیستم چندجسمی رباتیک با اجزای انعطاف‌پذیر براساس دیدگاه دینامیکی تعاملی صلب انعطاف‌پذیر پرداخته می‌شود. سپس با درنظر گرفتن یک ربات چرخ‌دار با اجزای انعطاف‌پذیر مفروض، که برای انجام مأموریت‌های اکتشافی در سایر کرات مطرح می‌باشد، به انجام شبیه‌سازی‌های جامع برای کنترلر تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده برای این سیستم پرداخته می‌شود. درنهایت، نتایج پیاده‌سازی این کنترلر بر روی مسیر طراحی‌شده ذگر گردیده و مزیت‌های آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱- مدل‌سازی دینامیکی

روش‌های متفاوتی برای مدل‌سازی بازوهای انعطاف‌پذیر ارائه شده است. مدل‌های ریاضی بازوها عموماً از قضایای انرژی استخراج می‌شوند. برای یک بازوی صلب ساده، انرژی جنبشی به‌وسیله اینرسی متحرک آن‌ها و همچنین انرژی پتانسیل به‌وسیله موقعیت آن در میدان جاذبه ذخیره می‌شود. اما بازوهای انعطاف‌پذیر انرژی پتانسیل را به‌وسیله تغییر شکل بازوها، مفاصل و یا گرداننده آن‌ها ذخیره می‌کند. دینامیک سیستم‌های چندجسمی با اجزای انعطاف‌پذیر به یک سری دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی و جزئی منجر می‌شود که حل تحلیلی آن‌ها تقریباً غیرممکن می‌باشد. مدل‌سازی دینامیکی این سیستم‌ها به یک تحلیل دقیق از این سیستم‌ها و همچنین کنترل ارتعاشات اجزای انعطاف‌پذیر، به‌دلیل سختی کم آن‌ها، نیاز دارد.

همچنان که گفته شد، در اکثر تحقیقات یک انباشتگی در مدل‌سازی دینامیکی سیستم‌های چندجسمی با اجزای انعطاف‌پذیر درنظر گرفته‌اند. درحقیقت به تعداد N_{flex} معادله حرکت برای اجزای انعطاف‌پذیر استخراج گردیده و به معادلات دینامیکی اجزای صلب اضافه می‌گردد. این امر در حالی است که رویکرد مدل‌سازی دینامیکی تعاملی صلب انعطاف‌پذیر، که اخیراً توسط مؤلفان ارائه شده است، برای مدل‌سازی دینامیکی، معادلات حرکت اجزای صلب را از معادلات حرکت اجزای انعطاف‌پذیر جدا می‌نماید[۱۸،۱۷]. بنابراین، دستگاه معادلات ساده‌تری از معادلات دینامیکی سیستم به‌دست می‌آید که می‌تواند در پیاده‌سازی کنترلرهای مدل مبنا مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد مدل‌سازی دینامیکی تعاملی صلب انعطاف‌پذیر مدل‌سازی دینامیکی اجزای صلب و انعطاف‌پذیر یک سیستم کلی یکپارچه را جدا می‌نماید. درنتیجه جفت‌شدگی بین این

1. Non-model based
2. Model based

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.5.9.9]

دو دسته از معادلات به‌وسیله قیود سینماتیکی به‌دست می‌آید که بایستی همزمان با این معادلات حل شود. بنابراین، در ابتدا مدل‌سازی دینامیکی اجزای انعطاف‌پذیر پیوسته با استفاده از روش لاگرانژ و با کمک دستگاه شناور استخراج می‌گردد. این امر با ملحق‌کردن دستگاه شناور به هر عضو انعطاف‌پذیر پیوسته صورت می‌پذیرد. بنابراین، حرکت هر عضو انعطاف‌پذیر در سیستم چندجسمی توسط دو دسته متغیرهای مرجع و الاستیک تعریف می‌شود. درنهایت معادلات حرکت این سیستم چندجسمی انعطاف‌پذیر با توجه به این رویکرد مدل‌سازی و با استفاده از این متغیرها به‌دست می‌آید. در این بخش، رویکرد جدید مدل‌سازی دینامیکی تعاملی صلب انعطاف‌پذیر، که اخیراً توسط مؤلفین ارائه شده[۱۸،۱۷]، به‌اختصار معرفی می‌گردد.

همان‌طور که می‌دانیم، معادلات حرکت جسم صلب در سیستم‌های چندجسمی می‌توانند با عناصر ماتریس اینرسی و نیروهای تعمیم‌یافته که بر جسم عمل می‌کنند بیان شوند. بنابراین، فرمول‌بندی دینامیکی معادلات حرکت جسم انعطاف‌پذیر با استفاده از دستگاه شناور[1] بسط و توسعه داده می‌شود. همچنین، نشان داده می‌شود که معادلات حرکت چنین سیستمی می‌تواند با عناصری از جمله انتگرال‌های شکلی در کنار جرم جسم، ماتریس اینرسی و نیروهای تعمیم‌یافته همراه با ماتریس سختی نوشته شوند. انتگرال‌های شکلی، که به میدان جابه‌جایی فرض‌شده بستگی دارند، در عناصر غیرخطی ظاهر می‌شوند که جفت‌شدگی بین حرکت مختصات مرجع و تغییرات الاستیک جسم را مشخص می‌کنند. همچنین، نشان داده می‌شود که ماتریس اینرسی به تغییرات الاستیک جسم بستگی داشته و درنتیجه تابعی ضمنی از زمان می‌باشد. در فرمول‌بندی با استفاده از دستگاه شناور، وضعیت هر یک از جسم‌های انعطاف‌پذیر در سیستم چندجسمی به‌وسیله دو مجموعه از مختصات‌های مرجع و الاستیک مشخص می‌شوند. مختصات مرجع موقعیت و جهت‌گیری جسم موردنظر را تعریف می‌کند، در حالی که مختصات الاستیک تغییرات جسم را نسبت به مرجع جسم تشریح می‌کند. به‌منظور جلوگیری از مشکلات محاسباتی مرتبط با فضاهای با بعد نامتناهی، این مختصات به‌وسیله روش‌های تقریب کلاسیک مانند روش‌های ریلی-ریتز[2] مطرح می‌شوند. بنابراین، موقعیت کلی یک نقطه دلخواه بر روی جسم انعطاف‌پذیر به‌وسیله این دو مختصات مرجع و الاستیک تعریف می‌شود. همچنین، با بسط انرژی جنبشی جسم انعطاف‌پذیر، اینرسی جفت‌شده بین حرکت مرجع و تغییرات الاستیک نیز مشخص می‌شود. انرژی جنبشی به‌صورت کار مجازی نیروهای عمل‌کننده بر جسم با عناصر جفت‌شده برای مجموعه مختصات مرجع و الاستیک نوشته می‌شود. بنابراین، معادلات حرکت به‌فرم زیر به‌دست می‌آیند[۱۹]:

$$\mathrm{M}_f^{\{i\}}\ddot{\bar{q}}^{\{i\}} + \mathrm{K}^{\{i\}}e^{\{i\}} = \mathrm{Q}_e^{\{i\}} + \mathrm{Q}_v^{\{i\}}, \{i\} = \{1,2,...,n_b\} \qquad (۱)$$

که در آن n_b تعداد جسم‌های انعطاف‌پذیر سیستم چندجسمی و به‌ترتیب $\mathrm{K}^{\{i\}}$ ماتریس سختی، $\mathrm{M}_f^{\{i\}}$ ماتریس جرمی، $\mathrm{Q}_v^{\{i\}}$ بردار سرعت درجه دوم شامل نیروهای گریز از مرکز و کریولیس جسم $\{i\}$ می‌باشد. معادلات حرکت در شکل جزئی برای مولفه‌های صلب (r) و انعطاف‌پذیر (f) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \mathrm{m}_{rr}^{\{i\}} & \mathrm{m}_{rf}^{\{i\}} \\ \mathrm{m}_{fr}^{\{i\}} & \mathrm{m}_{ff}^{\{i\}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathrm{q}}_r^{\{i\}} \\ \ddot{\mathrm{q}}_f^{\{i\}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \mathrm{K}_{ff}^{\{i\}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{q}_r^{\{i\}} \\ \mathrm{q}_f^{\{i\}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathrm{Q}_e^{\{i\}})_r \\ (\mathrm{Q}_e^{\{i\}})_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\mathrm{Q}_v^{\{i\}})_r \\ (\mathrm{Q}_v^{\{i\}})_f \end{bmatrix} \qquad (۲)$$

حال فرض می‌شود که معادلات حرکت سیستم رباتیک پایه متحرک، با درنظر گرفتن رویکرد مدل‌سازی دینامیکی تعاملی صلب انعطاف‌پذیر، به‌فرم زیر گسترش داده شود[۱۹].

$$\mathrm{H}(\mathrm{q})\,\ddot{\mathrm{q}} + \mathrm{C}(\mathrm{q},\dot{\mathrm{q}}) + \mathrm{G}(\mathrm{q}) = \mathrm{Q}(\mathrm{q}) + \mathrm{Q}_{\mathrm{flex.}}(\mathrm{q}) \qquad (۳)$$

که در آن q متغیرهای مربوط به اجزای صلب سیستم بوده و H، C، G و Q به‌ترتیب ماتریس جرمی، بردار ترم‌های سرعت غیرخطی، بردار ترم‌های نیروهای وزنی و نیروهای تعمیم‌یافته می‌باشند. همچنین، $\mathrm{Q}_{\mathrm{flex.}}(\mathrm{q})$ نیروهای تعمیم‌یافته ناشی از تحریک اجزای انعطاف‌پذیری یا اثر ارتعاش آن‌ها می‌باشد که بر اجزای صلب وارد شده و به‌عنوان ترم اصلاح‌کننده یا نیروی قیدی می‌باشند. با درنظر گرفتن معادله ۲، این ترم را می‌توان به‌فرم زیر محاسبه نمود:

$$\mathrm{Q}_{\mathrm{flex.}}(\mathrm{q}) = \sum_{\{i\}=\{1\}}^{\{n_b\}} \mathrm{J}_f^{\{i\}^{\mathrm{T}}} (\mathrm{Q}_e^{\{i\}})_r \qquad (۴)$$

1. Floating frame

2. Rayleigh–Ritz

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

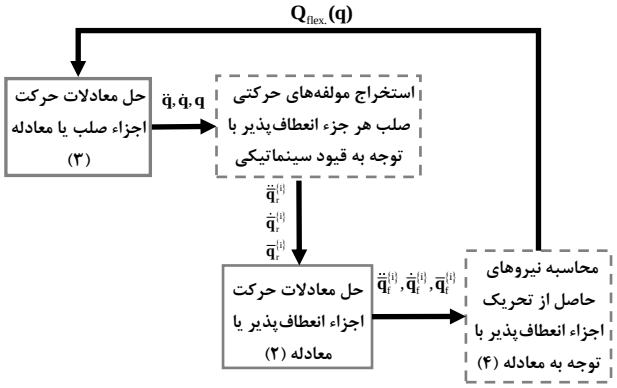
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.5.9.9]

که در آن $J_f^{\{i\}}$ ماتریس ژاکوبین دستگاه شناور جسم انعطاف‌پذیر $\{i\}$ نسبت به بدنه اصلی سیستم می‌باشد.

همان‌طور که قبلاً نیز شرح داده شد، رویکرد مدل‌سازی دینامیکی تعاملی صلب انعطاف‌پذیر درحقیقت ترکیبی از روش‌های نیوتن-اویلر و لاگرانژ می‌باشد. برای استفاده از رویکرد مدل‌سازی دینامیکی تعاملی صلب انعطاف‌پذیر، روند محاسبات در هر گام زمانی، به همان صورت که در شکل ۱ نشان داده شده است، به‌فرم زیر برقرار می‌باشد. در مرحله اول، معادلات حرکت اجزای صلب یا معادله ۳ حل می‌شود و ترم‌های شتاب، سرعت و موقعیت این اجزای صلب یا مقادیر $\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}},\ddot{\mathbf{q}}$ از معادلات فوق محاسبه می‌گردند. سپس مولفه‌های حرکت صلب هر جسم انعطاف‌پذیر شامل شتاب، سرعت و موقعیت یا $\ddot{\mathbf{q}}_r^{\{i\}},\dot{\mathbf{q}}_r^{\{i\}},\mathbf{q}_r^{\{i\}}$ تعیین می‌گردد و به معادلات حرکت اجزای انعطاف‌پذیر به‌عنوان ورودی اعمال می‌شوند. ارتباط بین این دو دسته از متغیرها با توجه به قیود سینماتیکی بین مبداء دستگاه شناور که به هر عضو انعطاف‌پذیر الصاق گردیده و دستگاه مرجع آن معین می‌گردد. با درنظر گرفتن این ورودی‌ها و حل سطر دوم معادله ۲، مولفه‌های حرکت انعطاف‌پذیر هر جسم صلب شامل شتاب، سرعت و موقعیت یا $\ddot{\mathbf{q}}_f^{\{i\}},\dot{\mathbf{q}}_f^{\{i\}},\mathbf{q}_f^{\{i\}}$ محاسبه می‌شوند. با استفاده از این مقادیر و جای‌گزینی آن‌ها در سطر اول معادله ۲، نیروهای قیدی یا $Q_e^{\{i\}}$ به‌دست می‌آیند. سپس این نتایج، با توجه به معادله ۴، به معادلات حرکت اجزای صلب به‌عنوان نیروهای حاصل از تحریک اجزای انعطاف‌پذیر یا $Q_{flex.}(q)$ اعمال می‌گردد. بایستی تاکید نمود که این نیروی قیدی درحقیقت اثر ارتعاشات اجزای انعطاف‌پذیری می‌باشد که بر روی سیستم رباتیکی قرار گرفته‌اند و موجب نوسانات در این سیستم گشته و درنهایت عملیات جابه‌جایی جسم را مختل می‌نمایند. از طرفی، این اثرات نامطلوب بایستی با درنظر گرفتن یک راه‌کار کنترلی مناسب رفع گردند. در ادامه معادلات دینامیکی یک سیستم رباتیکی پایه متحرک فضایی را با توجه به رویکرد مدل‌سازی بیان‌شده استخراج می‌نماییم.

سیستم ربات چرخ‌دار مورد بررسی شامل دو بازو و دو صفحه خورشیدی برای مأموریت‌های اکتشافی در سایر کرات[1] بوده که در شکل ۲ نشان داده شده است.

1. Shanghai Moon Rover.



شکل ۱ بلوک دیاگرام رویکرد مدل‌سازی دینامیکی تعاملی صلب انعطاف‌پذیر



شکل ۲ نمایش سیستم ربات فضانورد مفروض شامل دو صفحه خورشیدی انعطاف‌پذیر

معادله حرکت این ربات با اجزای صلب را می‌توان در قالب معادله زیر فرمول‌بندی نمود:

$$H(\beta_0,\theta)\,\ddot{q} + C(\beta_0,\dot{\beta}_0,\theta,\dot{\theta}) = Q(\beta_0) + Q_{flex.}(\beta_0) \qquad (۵)$$

که در آن $Q_{flex.}(\beta_0)$ نیروهای عکس‌العملی حاصل از تحریک صفحات خورشیدی می‌باشند که بر روی پایه صلب ربات نصب شده‌اند. همچنین، سایر پارامترهای دینامیکی به‌طور کامل در مرجع [۲۰] شرح داده شده است. همچنین β_0 معرف زوایای اویلر تعیین‌کننده جهت‌گیری پایه ربات و θ بردار متغیرهای زوایای مفاصل بازوها می‌باشد. توجه داریم که در روش مدل‌سازی بر اساس رویکرد مدل‌سازی دینامیکی تعاملی صلب انعطاف‌پذیر، پایه و بالک‌های خورشیدی جداگانه مدل شده‌اند. بنابراین، نیروهای قیدی در سر گیردار صفحات خورشیدی انعطاف‌پذیر بر پایه ربات درنظر گرفته شده‌اند. دقت داریم، با توجه به این رویکرد مدل‌سازی، نیروهای خارجی واردشده بر این جسم انعطاف‌پذیر برابر است با:

$$Q_e^{\{i\}} = \left\{ V_{f_1}^{\{i\}} \quad V_{f_2}^{\{i\}} \quad M_{f_3}^{\{i\}} \right\}^T \qquad (۶)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.5.9.9]

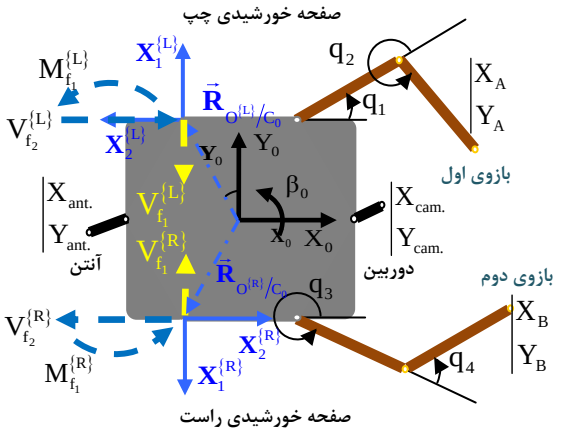
درواقع، در هر لحظه پس از حل معادلات جسم صلب، عناصر شتاب مربوطه به‌عنوان ورودی این دسته معادلات جسم انعطاف‌پذیر بوده و پس از حل این معادلات با توجه به ورودی داده‌شده، خروجی به‌صورت یک نیروی تعمیم‌یافته اغتشاشی به پایه متحرک این سیستم اعمال می‌گردد. فقط بایستی توجه نمود، رابطه زیر بین مولفه مکانی پایه ربات چرخدار و مبدا مختصات مرجع جسم انعطاف‌پذیر $\{i\}$ام یا دو نقطه از جسم صلب (پایه متحرک) برقرار می‌باشد (شکل ۳):

$$\vec{R}_{O^{\{i\}}} = \vec{R}_{C_0} + \vec{R}_{O^{\{i\}}/C_0} \qquad (۷)$$

که این رابطه به‌همراه مشتق آن در رده سرعت و شتاب در پیاده‌سازی‌های مدل صلب در کنار اجسام انعطاف‌پذیر بایستی درنظر گرفته شود. بنابراین، در مرحله اول بایستی دینامیک مستقیم جسم انعطاف‌پذیر $\{i\}$ام را حل کنیم، پس داریم:

$$\ddot{\bar{q}}^{\{i\}} = (M_f^{\{i\}})^{-1}(Q_e^{\{i\}} + Q_v^{\{i\}} - K^{\{i\}}\bar{q}^{\{i\}}) \qquad (۸)$$

با توجه به سطر دوم معادله برای مولفه‌های حرکت انعطاف‌پذیر آن، تغییرشکل الاستیک را برای هر کدام از بالک‌های انعطاف‌پذیر محاسبه می‌نماییم. در مرحله دوم، نیروهای انتهای صفحات خورشیدی را به‌فرم معادله ۶ به‌دست می‌آوریم. پس از این و در مرحله سوم، با حل سطر اول از دینامیک معکوس جسم انعطاف‌پذیر، نیروهای اغتشاشی (نیروهای قیدی حاصل از تحریک صفحات انعطاف‌پذیر) را محاسبه کرده و بر پایه متحرک ربات چرخدار اعمال می‌کنیم. این امر روند مدل‌سازی دینامیکی این سیستم پیچیده رباتیکی را با توجه به رویکرد مدل‌سازی دینامیکی تعاملی صلب انعطاف‌پذیر کامل می‌کند.



شکل ۳ سیسم ربات چرخدار مفروض و پارامترهای هندسی آن

توجه داریم که هر یک از صفحات خورشیدی انعطاف‌پذیر با درنظر گرفتن پنج مد اول آن‌ها، که درواقع مدهای غالب این اجسام نیز بوده‌اند و رفتار و تغییر شکل مربوط به انعطاف‌پذیری این اجزا را به‌دست می‌دهند، مدلسازی شده‌اند که جزئیات آن به‌طور کامل در مرجع [۱۹] آورده شده است.

۲- کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده

پیچیدگی‌های سیستم‌های چندجسمی انعطاف‌پذیر باعث شده که کنترل این سیستم‌ها خود به یک موضوع چالش‌انگیز و البته بسیار دشوارتر از کنترل سیستم‌های صلب نظیر آن‌ها تبدیل شود. افزایش تعداد درجات آزادی سیستم‌های انعطاف‌پذیر، تاخیر در انتشار موج حرکت و عکس‌العمل اولیه از جمله دلایلی می‌باشند که این امر را سبب می‌شوند[۲۱]. در کنترل سیستم‌های چندجسمی انعطاف‌پذیر باید توجه داشت که سرعت و دقت در تعقیب‌کردن مسیر مطلوب لازم و ضروری می‌باشد که عموماً این دو هم‌زمان به‌دست نمی‌آیند، چرا که کنترلر سریع‌تر کم‌دقت‌تر است و برعکس. بنابراین، اغلب بیشتر از یک نوع قانون کنترلی در این سیستم‌ها به‌منظور افزایش مزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد[۲۳،۲۲]. در بحث کنترل جابه‌جایی اجسام توسط سیستم‌های رباتیکی با اجزای انعطاف‌پذیر، به‌ارتعاش درآمدن بخش دینامیک تند این سیستم‌ها منجر به وجود نیروهای اغتشاشی بر روی این سیستم‌ها می‌گردد که علاوه بر ناپایداری در خود آن عضو انعطاف‌پذیر و حتی در مواردی شکست آن‌ها، عملیات جابه‌جایی جسم را نیز مختل می‌نمایند. هرچند که ملاحظات طراحی مسیر مختلفی برای جلوگیری از بروز چنین رخدادهایی می‌تواند مفید واقع شود، اما درنهایت این موضوع یک روش جامع نبوده و در بحث کنترل جابه‌جایی اجسام با درنظر گرفتن انعطاف‌پذیری اجزای جایگاه یک روش کنترلی جامع لازم به‌نظر می‌رسد.

بدین منظور، در ادامه، روش کنترلی تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده بر روی سیستم‌های رباتیکی انعطاف‌پذیر شرح داده می‌شود. شایان ذکر است که در تمامی بررسی‌ها و شبیه‌سازی‌های این کنترلر، رویکرد مدل‌سازی دینامیکی که در بخش قبل ذکر شده است برای این نوع سیستم‌های رباتیکی با اجزای انعطاف‌پذیر مورد توجه قرار گرفته است. برای کنترل جابه‌جایی اجسام، وجود یک نظارت بر موقعیت عضوهای درگیر

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.5.9.9]

در عملیات جابه‌جایی اجسام ضروری به‌نظر می‌رسد. همچنین به‌منظور به‌انجام رسیدن یک عملیات موفق در این سیستم‌های رباتیکی انعطاف‌پذیر، بایستی کنترلی نیز بر اجزای انعطاف‌پذیر، در ضمن عملیات جابه‌جایی اجسام، وجود داشته تا بتوان، علاوه بر کنترل آن‌ها تا به پایان عملیات، نیروهای اغتشاشی حاصل از تحریک دینامیک تند آن‌ها را نیز به‌حداقل ممکن رساند و درنهایت عملیات جابه‌جایی جسم با موفقیت به‌اتمام رسد. بنابراین، ترکیب این دو دیدگاه کنترلی منجر به یک کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت یا کنترل ترکیبی خنثی‌کننده می‌گردد. همچنین، به‌منظور دستیابی به نتایج عملکردی بهتر و با توجه به دینامیک خطای اجزای انعطاف‌پذیر که در آن مقادیر میراکننده مجازی منجر می‌شود تا ریشه‌های معادله مشخصه این دینامیک در سمت چپ منحنی موهومی قرار گیرد، دستیابی به یک مقدار بهینه برای این پارامتر مطلوب می‌باشد. راهکار مواجهه با این موضوع به‌روز شدن مقادیر این پارامتر با توجه به میزان تحریک دینامیک تند این سیستم‌ها در عملیات جابه‌جایی جسم و همچنین میزان مجاز محدوده عملگری می‌باشد. بنابراین یافتن قانون تطبیقی که بتواند این امر را محقق سازد در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

اگر معادلات حرکت سیستم رباتیک در فضای وظیفه برحسب متغیرهای خروجی $\tilde{X}$ برابر باشد با:

$$\tilde{\mathrm{H}}^{(i)}\left(\mathrm{q}^{(i)}\right)\ddot{\tilde{\mathrm{X}}}^{(i)}+\tilde{\mathrm{C}}^{(i)}\left(\mathrm{q}^{(i)},\dot{\mathrm{q}}^{(i)}\right)=\tilde{\mathrm{Q}}^{(i)}+\tilde{\mathrm{Q}}_{\text{flex.}}^{(i)} \qquad (۹)$$

که بالانویس (i) مطابق با iامین بازوی عامل و $q^{(i)}$ بردار مختصات تعمیم‌یافته شامل زوایای مفصلی و جابه‌جایی‌ها می‌باشد و $\tilde{\mathrm{X}}^{(i)}$ مختصات خروجی را توصیف می‌نماید. همچنین، $\tilde{\mathrm{C}}^{(i)}$ شامل تمامی جملات غیرخطی سرعت و جملات ثقلی می‌باشد. بردار $\tilde{\mathrm{Q}}_{\text{flex.}}^{(i)}$ نیروهای اغتشاشی ناشی از تحریک‌شدن صفحات انعطاف‌پذیر بوده و $\tilde{\mathrm{Q}}^{(i)}$ نیز بردار نیروی تعمیم‌یافته در فضای کاری می‌باشد که:

$$\begin{aligned}
\tilde{\mathrm{H}}^{(i)} &= \mathrm{J}_c^{(i)^{-\mathrm{T}}}\mathrm{H}^{(i)}\mathrm{J}_c^{(i)^{-1}}\\
\tilde{\mathrm{C}}^{(i)} &= \mathrm{J}_c^{(i)^{-\mathrm{T}}}\mathrm{C}^{(i)} - \tilde{\mathrm{H}}^{(i)}\dot{\mathrm{J}}_c^{(i)}\dot{\mathrm{q}}^{(i)}\\
\tilde{\mathrm{Q}}^{(i)} &= \mathrm{J}_c^{(i)^{-\mathrm{T}}}\mathrm{Q}^{(i)}\\
\tilde{\mathrm{Q}}_{\text{flex.}}^{(i)} &= \mathrm{J}_c^{(i)^{-\mathrm{T}}}\mathrm{Q}_{\text{flex.}}^{(i)}
\end{aligned} \qquad (۱۰)$$

که در آن $\mathrm{J}_c^{(i)}$ ماتریس ژاکوبین مطابق با iامین بازوی عامل می‌باشد. همچنین، نیروی تعمیم‌یافته $\tilde{\mathrm{Q}}^{(i)}$ در فضای کاری به‌فرم زیر بازنویسی می‌شود:

$$\tilde{\mathrm{Q}}^{(i)}=\tilde{\mathrm{Q}}_{\text{app}}^{(i)}+\tilde{\mathrm{Q}}_{\text{react}}^{(i)}+\tilde{\mathrm{Q}}_{\text{supp}}^{(i)} \qquad (۱۱)$$

که $\tilde{\mathrm{Q}}_{\text{react}}^{(i)}$ نیروهای عکس‌العملی از مجری‌های نهایی بوده و $\tilde{\mathrm{Q}}_{\text{supp}}^{(i)}$ نیروهای کنترلی خنثی‌کننده برای کنترل اجزای انعطاف‌پذیر می‌باشد و $\tilde{\mathrm{Q}}_{\text{app}}^{(i)}$ نیروهای کنترلی لازم برای کنترل موقعیت ربات در حین عملیات می‌باشد که آن را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود:

$$\tilde{\mathrm{Q}}_{\text{app}}^{(i)}=\tilde{\mathrm{Q}}_{m}^{(i)}+\tilde{\mathrm{Q}}_{f}^{(i)} \qquad (۱۲)$$

که در آن $\tilde{\mathrm{Q}}_{m}^{(i)}$ بخش کنترلی برای حرکت مجری‌های نهایی و $\tilde{\mathrm{Q}}_{f}^{(i)}$ برای حرکت جسم توسط مجری‌های نهایی می‌باشد. می‌توان معادلات حرکت جسم را به‌صورت زیر فرض نمود:

$$\mathrm{M}\ddot{\mathrm{x}}+\mathrm{F}_w=\mathrm{F}_c+\mathrm{F}_o+\mathrm{GF}_e \qquad (۱۳)$$

که در آن M ماتریس جرمی، G ماتریس کارگیرش، F_w بردار نیروهای حاصل از ترم‌های غیرخطی سرعت، F_c نیروهای تعمیم‌یافته مربوط به برخورد جسم با محیط، F_e نیروهای تعمیم‌یافته اعمالی توسط هر بازو به جسم و F_o مربوط به نیروهای تعمیم‌یافته خارجی اعمال‌شده به جسم می‌باشد. اگر قانون کنترلی برای حرکت جسم و کنترل موقعیت آن به‌صورت زیر درنظر گرفته شود:

$$\upsilon=\ddot{\mathrm{x}}_{\mathrm{d}}+\mathrm{K}_{\mathrm{d}}(\dot{\mathrm{x}}_{\mathrm{d}}-\dot{\mathrm{x}})+\mathrm{K}_{\mathrm{p}}(\mathrm{x}_{\mathrm{d}}-\mathrm{x}) \qquad (۱۴)$$

که در آن K_p و K_d ماتریس‌های ضریب بهره قطری می‌باشند؛ با قراردادن مقدار قانون کنترلی فوق در معادلات حرکت جسم، نیروی لازم برای حرکت جسم به‌دست می‌آید:

$$\mathrm{F}_{e_{\text{req}}}=\mathrm{G}^{\#}\left\{\mathrm{M}\upsilon+\mathrm{F}_w-(\mathrm{F}_c+\mathrm{F}_o)\right\} \qquad (۱۵)$$

و یا:

$$\mathrm{F}_{e_{\text{req}}}=\mathrm{G}^{\#}\left\{\mathrm{M}(\ddot{\mathrm{x}}_{\mathrm{d}}+\mathrm{K}_d\dot{\mathrm{e}}+\mathrm{K}_p\mathrm{e})+\mathrm{F}_w-(\mathrm{F}_c+\mathrm{F}_o)\right\} \qquad (۱۶)$$

که در آن $\mathrm{e}=(\mathrm{x}_d-\mathrm{x})$ خطای تعقیب برای حرکت جسم و $\mathrm{G}^{\#}$ معکوس مجازی ماتریس کارگیرش G می‌باشد و به‌فرم زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{G}^{\#}=\mathrm{W}^{-1}\mathrm{G}^{\mathrm{T}}(\mathrm{GW}^{-1}\mathrm{G}^{\mathrm{T}})^{-1} \qquad (۱۷)$$

که در آن W ماتریس وزنی می‌باشد. بنابراین، نیروی لازم برای حرکت جسم توسط هر مجری نهایی یا $\mathrm{F}_{e_{\text{req}}}^{(i)}$ مستقیماً توسط $\mathrm{F}_{e_{\text{req}}}$ به‌دست می‌آید، پس داریم:

$$\tilde{\mathrm{Q}}_{f}^{(i)}=\mathrm{F}_{e_{\text{req}}}^{(i)} \qquad (۱۸)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.5.9.9]

همچنین، می‌دانیم که $\tilde{Q}_f^{(i)}$ به‌صورت مجازی توسط نیروهای عکس‌العملی مجری‌های نهایی خنثی می‌شود، یعنی:

$$\tilde{Q}_{\text{react}}^{(i)} = F_e^{(i)} \quad (۱۹)$$

اکنون برای به‌دست آوردن نیروی لازم برای حرکت ربات، با توجه به معادلات حرکت آن و یک عملیات جابه‌جایی جسم مفروض، قانون کنترلی زیر را درنظر می‌گیریم:

$$\tilde{\upsilon}^{(i)} = \ddot{\tilde{X}}_d^{(i)} + \tilde{K}_d(\dot{\tilde{X}}_d^{(i)} - \dot{\tilde{X}}^{(i)}) + \tilde{K}_p(\tilde{X}_d^{(i)} - \tilde{X}^{(i)}) \quad (۲۰)$$

که در آن $\tilde{K}_p$ و $\tilde{K}_d$ ماتریس‌های ضریب بهره قطری می‌باشند. همانند مراحل طی‌شده قبل، نیروی لازم برای حرکت ربات با توجه به قانون کنترلی فوق به‌دست می‌آید:

$$\tilde{Q}_m^{(i)} = \tilde{H}^{(i)}(q^{(i)})\tilde{\upsilon}^{(i)} + \tilde{C}^{(i)}(q^{(i)},\dot{q}^{(i)}) \quad (۲۱)$$

و یا به‌فرم:

$$\tilde{Q}_m^{(i)} = \tilde{H}^{(i)}(q^{(i)})\left[\ddot{\tilde{X}}_d^{(i)} + \tilde{K}_d\dot{\tilde{e}}^{(i)} + \tilde{K}_p\tilde{e}^{(i)}\right] + \tilde{C}^{(i)}(q^{(i)},\dot{q}^{(i)}) \quad (۲۲)$$

که در آن $\tilde{e}^{(i)} = \tilde{X}_d^{(i)} - \tilde{X}^{(i)}$ خطای تعقیب برای متغیرهای فضای مفصلی و $\tilde{X}_d$ و $\tilde{X}_d^{(i)}$ بر پایه مسیر طراحی‌شده برای حرکت جسم در حین عملیات و با توجه به قیود گیرش به‌دست می‌آیند. حال برای کنترل اجزای انعطاف‌پذیر به‌منظور محاسبه نیروی کنترلی خنثی‌کننده $\tilde{Q}_{\text{supp}}^{(i)}$، با توجه به دینامیک مدل‌شده این اجزا و فرض فعال‌بودن آن‌ها به‌فرم زیر می‌رسیم[۲۴-۲۵]:

$$M_f^{\{i\}}\ddot{\bar{q}}^{\{i\}} + K^{\{i\}}\bar{q}^{\{i\}} = Q_v^{\{i\}} + Q_e^{\{i\}} + \tau^{\{i\}} \quad (۲۳)$$

که در آن $\tau^{\{i\}}$ نیروی تعمیم‌یافته عملگری مفصلی می‌باشد و $\bar{q}^{\{i\}}$ متغیرهای تعمیم‌یافته جسم انعطاف‌پذیر می‌باشند. توجه داریم که فرض فعال‌بودن این عضو انعطاف‌پذیر با درنظر گرفتن یک سری عملگرهای پیزوالکتریک بر روی آن و به‌فرم زیر صورت پذیرفته است[۲۶]:

$$\tau^{\{i\}} = K_{pz}^{\{i\}}v_a^{\{i\}} \quad (۲۴)$$

که در آن $K_{pz}^{\{i\}}$ ماتریس سختی مجموعه عملگرهای پیزوالکتریک و $v_a^{\{i\}}$ ولتاژ ورودی این عملگرها برای هر عضو می‌باشد. اگر فرض شود که $\hat{B}_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}}$ میراکننده مجازی باشد، که براساس قانون تطبیق که طراحی خواهد شد به‌دست خواهد آمد، آنگاه می‌توان قانون کنترلی زیر را برای هر جزء انعطاف‌پذیر $\{i\}$ درنظر گرفت:

$$\tau^{\{i\}} = M_f^{\{i\}}\ddot{\bar{q}}_d^{\{i\}} + \hat{B}_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}}(\dot{\bar{q}}_d^{\{i\}} - \dot{\bar{q}}^{\{i\}}) + K^{\{i\}}\bar{q}_d^{\{i\}} - Q_v^{\{i\}} \quad (۲۵)$$

که در آن $\hat{B}_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}}$ برای هر جزء انعطاف‌پذیر در هر لحظه محاسبه شده و به قانون کنترلی اعمال شده و درنهایت نیروی خنثی‌کننده برای هر جزء انعطاف‌پذیر در عملیات جابه‌جایی اجسام به‌دست می‌آید. بنابراین، دینامیک حلقه بسته خطای اجزای انعطاف‌پذیر به‌فرم زیر نوشته می‌شود:

$$M_f^{\{i\}}\ddot{e}_f^{\{i\}} + \hat{B}_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}}\dot{e}_f^{\{i\}} + K^{\{i\}}e_f^{\{i\}} = Q_{\text{flex.}}^{\{i\}} \quad (۲۶)$$

و اگر مقدار مطلوب میراکننده مجازی برابر $B_{f_{virtual}}^{\{i\}}$ باشد، پس داریم:

$$\tilde{B}_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}} = B_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}} - \hat{B}_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}} \quad (۲۷)$$

با جایگذاری در معادله قبل و با انجام ساده‌سازی داریم:

$$\ddot{e}_f^{\{i\}} + (M_f^{\{i\}})^{-1}\hat{B}_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}}\dot{e}_f^{\{i\}} + (M_f^{\{i\}})^{-1}K^{\{i\}}e_f^{\{i\}} = (M_f^{\{i\}})^{-1}\left\{Q_e^{\{i\}} + \tilde{B}_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}}\dot{e}_f^{\{i\}}\right\} \quad (۲۸)$$

و یا:

$$\ddot{e}_f^{\{i\}} + (M_f^{\{i\}})^{-1}\hat{B}_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}}\dot{e}_f^{\{i\}} + (M_f^{\{i\}})^{-1}K^{\{i\}}e_f^{\{i\}} = (M_f^{\{i\}})^{-1}\underline{K}(\bar{q},\dot{\bar{q}},\ddot{\bar{q}})\tilde{B}_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}} \quad (۲۹)$$

پس معادلات دینامیکی خطای اجزای انعطاف‌پذیر در فرم فضای حالت را می‌توان به‌صورت زیر درنظر گرفت:

$$\dot{\underline{X}} = \underline{A}\underline{X} + \underline{B}\left[(M_f^{\{i\}})^{-1}\underline{K}\tilde{B}_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}}\right]$$
$$\underline{Y} = \underline{C}\underline{X} \quad (۳۰)$$

که در آن $\underline{Y}$ خروجی فیلترشده می‌باشد و $\underline{X}$ برابر است با:

$$\underline{X} = \begin{Bmatrix} e_{f_1}^{\{i\}} \\ \dot{e}_{f_1}^{\{i\}} \\ \vdots \end{Bmatrix}_{2n\times 1} \quad (۳۱)$$

و ماتریس‌های $\underline{A}$، $\underline{B}$ و $\underline{C}$ به‌فرم زیر به‌دست می‌آید:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -(M_f^{\{i\}})^{-1}\underline{K} & -(M_f^{\{i\}})^{-1}\tilde{B}_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}} \end{bmatrix}$$
$$\underline{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}, \quad \underline{C} = \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix} \quad (۳۲)$$

حال تابع لیاپانوف زیر را تعریف می‌نماییم به‌طوری که در ادامه، علاوه بر تضمین پایداری سیستم، قانون تطبیق را به‌منظور محاسبه و به‌روز کردن پارامتر میراکننده مجازی استخراج نماییم. بنابراین داریم:

$$V(e_f,\dot{e}_f) = \underline{X}^T\underline{\rho}\underline{X} + \tilde{B}_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}}\Gamma^{-1}\tilde{B}_{f_{\text{virtual}}}^{\{i\}^T} \quad (۳۳)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.5.9.9]

که در آن $\Gamma=\text{diag}[\gamma_1 \ \gamma_2 \ \dots \ \gamma_r]$,$\gamma_i>0$ ماتریس ضریب بهره می‌باشد. با توجه به لم کالمن-یاکوبیچ-پوپوف[1]، می‌توان گفت که اگر سیستمی پایدار باشد، آنگاه ماتریس‌های متقارن و مثبت معین $\underline{\rho}$ و $\underline{Q}$ موجود می‌باشند به‌طوری که:

$$\underline{A}^T\underline{\rho}+\underline{\rho}\underline{A}=-\underline{Q}$$
$$\underline{\rho}\underline{B}=\underline{C}^T\rightarrow\underline{B}^T\underline{\rho}^T=\underline{C}\rightarrow\underline{B}^T\underline{\rho}=\underline{C} \quad (۳۴)$$

با توجه به مثبت معین بودن تابع لیاپانوف تعریف‌شده به بررسی مشتق این تابع می‌پردازیم. پس داریم:

$$\dot{V}(e_f,\dot{e}_f)=\dot{\underline{X}}^T\underline{\rho}\underline{X}+\underline{X}^T\underline{\rho}\dot{\underline{X}}+2\tilde{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}^T}\Gamma^{-1}\dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{\{i\}} \quad (۳۵)$$

با قراردادن از معادلات دینامیکی خطای اجزای انعطاف‌پذیر در فرم فضای حالت داریم:

$$\dot{V}(e_f,\dot{e}_f)=\left[\underline{A}\underline{X}+\underline{B}((M_f^{\{i\}})^{-1}\underline{K}\tilde{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}})\right]^T\underline{\rho}\underline{X}$$
$$+\underline{X}^T\underline{\rho}\left[\underline{A}\underline{X}+\underline{B}((M_f^{\{i\}})^{-1}\underline{K}\tilde{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}})\right]+2\tilde{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}^T}\Gamma^{-1}\dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{\{i\}} \quad (۳۶)$$

پس از انجام مرتب‌سازی داریم:

$$\dot{V}(e_f,\dot{e}_f)=\underline{X}^T\underline{A}^T\underline{\rho}\underline{X}+\underline{X}^T\underline{\rho}\underline{A}\underline{X}$$
$$+2\tilde{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}^T}\Gamma^{-1}\dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{\{i\}}+\left[\underline{B}(M_f^{\{i\}})^{-1}\underline{K}\tilde{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}}\right]^T\underline{\rho}X$$
$$+\underline{X}^T\underline{\rho}\underline{B}(M_f^{\{i\}})^{-1}\underline{K}\tilde{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}} \quad (۳۷)$$

پس از ساده‌سازی و با توجه به اینکه $((M_f^{\{i\}})^{-1})^T=(M_f^{\{i\}})^{-1}$، معادله فوق را به‌صورت زیر بازآرایی می‌کنیم:

$$\dot{V}(e_f,\dot{e}_f)=\underline{X}^T\left[\underline{A}^T\underline{\rho}+\underline{\rho}\underline{A}\right]\underline{X}+2\tilde{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}^T}\Gamma^{-1}\dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{\{i\}}$$
$$+\tilde{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}^T}\underline{K}^T(M_f^{\{i\}})^{-1}\underline{B}^T\underline{\rho}\underline{X}$$
$$+\tilde{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}^T}\underline{K}^T(M_f^{\{i\}})^{-1}\underline{B}^T\underline{\rho}\underline{X} \quad (۳۸)$$

که در نتیجه:

$$\dot{V}(e_f,\dot{e}_f)=-\underline{X}^T\underline{Q}\underline{X}$$
$$+2\tilde{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}^T}\left[\Gamma^{-1}\dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{\{i\}}+\underline{K}^T(M_f^{\{i\}})^{-1}\underline{B}^T\underline{\rho}\underline{X}\right] \quad (۳۹)$$

و با درنظر گرفتن معادلات دینامیکی خطای اجزای انعطاف‌پذیر در فرم فضای حالت داریم:

$$\dot{V}(e_f,\dot{e}_f)=-\underline{X}^T\underline{Q}\underline{X}$$
$$+2\tilde{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}^T}\left[\Gamma^{-1}\dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{\{i\}}+\underline{K}^T(M_f^{\{i\}})^{-1}\underline{C}\underline{X}\right] \quad (۴۰)$$

و یا:

$$\dot{V}(e_f,\dot{e}_f)=-\underline{X}^T\underline{Q}\underline{X}$$
$$+2\tilde{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}^T}\left[\Gamma^{-1}\dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{\{i\}}+\underline{K}^T(M_f^{\{i\}})^{-1}\underline{Y}\right] \quad (۴۱)$$

با توجه به مثبت‌بودن عبارت اول سمت راست معادله فوق، در صورتی‌که عبارت داخل کروشه برابر با صفر باشد، مشتق تابع لیاپانوف مفروض منفی معین بوده یعنی $\dot{V}(e_f,\dot{e}_f)<0$ و درنتیجه سیستم حاصل‌شده با این ورودی کنترلی پایدار می‌باشد. پس داریم:

$$\dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{\{i\}}=-\Gamma\underline{K}^T(M_f^{\{i\}})^{-1}\underline{Y} \quad (۴۲)$$

که با توجه به تعریف برای پارامتر میراکننده مجازی به‌روزشده، به این صورت که:

$$\tilde{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}}=B_{f_{virtual}}^{\{i\}}-\hat{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}}\rightarrow\dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{\{i\}}=-\dot{\hat{B}}_{f_{virtual}}^{\{i\}} \quad (۴۳)$$

قانون تطبیق طراحی‌شده به‌روش لیاپانوف برای میراکننده مجازی به این صورت به‌دست می‌آید:

$$\dot{\hat{B}}_{f_{virtual}}^{\{i\}}=\Gamma\underline{K}^T(M_f^{\{i\}})^{-1}\underline{Y} \quad (۴۴)$$

همچنین، بلوک دیاگرام روش کنترلی فوق‌الذکر با توجه به قانون تطبیق طراحی‌شده برای پارامتر میراکننده مجازی در شکل ۴ آورده شده است.

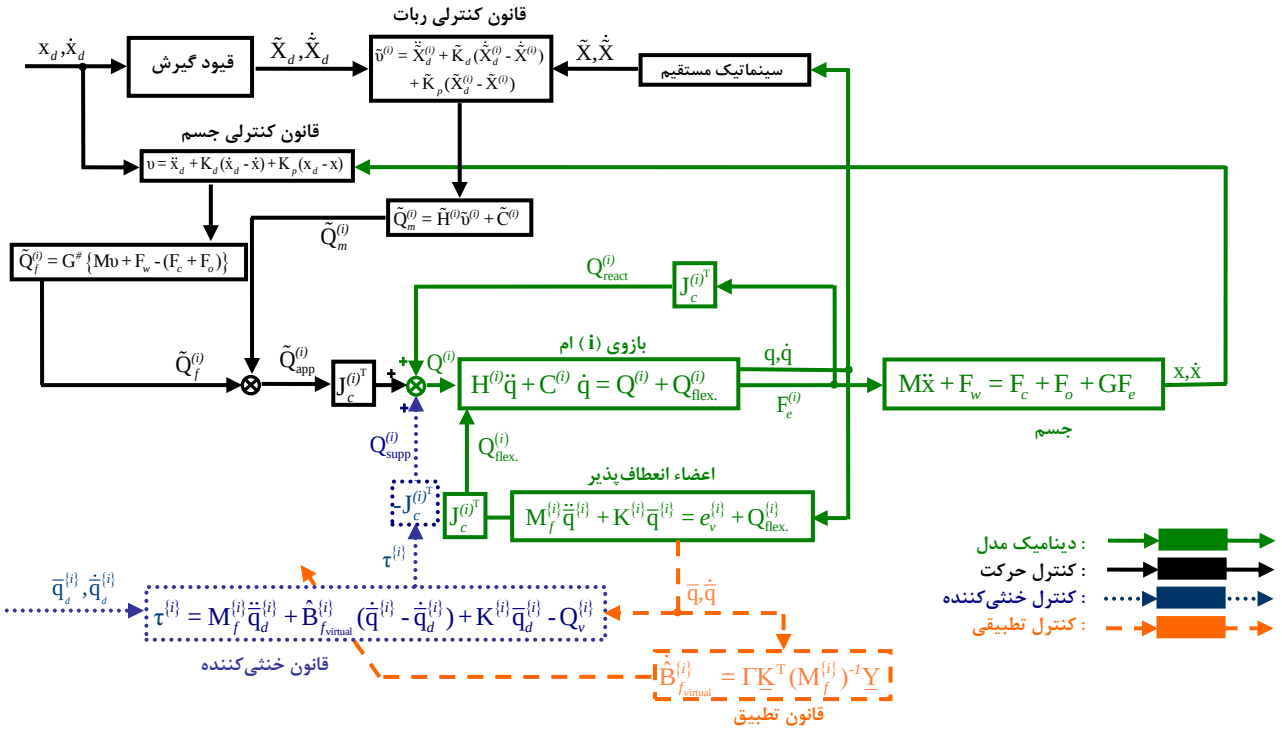
۳- پیاده‌سازی کنترلر و بررسی نتایج شبیه‌سازی

با درنظر گرفتن خصوصیات ذکرشده در جدول ۱، برای سیستم ربات چرخ‌دار با صفحات خورشیدی انعطاف‌پذیر به مشخصات ذکرشده در جدول ۲، به بررسی نتایج برای کنترلر تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده برروی این سیستم رباتیکی مفروض می‌پردازیم. همچنین، مقادیر شرایط اولیه شبیه‌سازی‌های این قسمت برای قانون تطبیق طراحی‌شده این اجزای انعطاف‌پذیر در جدول ۳ آورده شده است. همچنان که در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است، خطا و نرخ خطای متغیرهای فضای کاری تعریف‌شده برای این سیستم رباتیک چندجسمی مفروض به‌خوبی به صفر همگرا شده و در نتیجه یک عملیات جابه‌جایی جسم موفق را رقم زده است. این در حالی است که قانون تطبیق طراحی‌شده برای عملگرهای نصب‌شده بر روی صفحات خورشیدی انعطاف‌پذیر، مقادیر میرایی مجازی را به‌نحوی تغییر می‌دهند (شکل ۷) که این اجزاء علی‌رغم داشتن شرایط تحریک اولیه نیز به‌خوبی کنترل شوند (شکل‌های ۸ و ۹). همان‌طور که

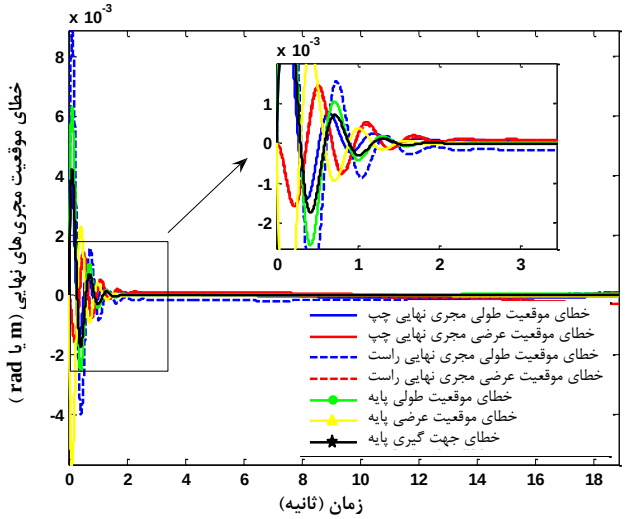
1. Kalman-Yakubovich-Popov Lemma

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.5.9.9]

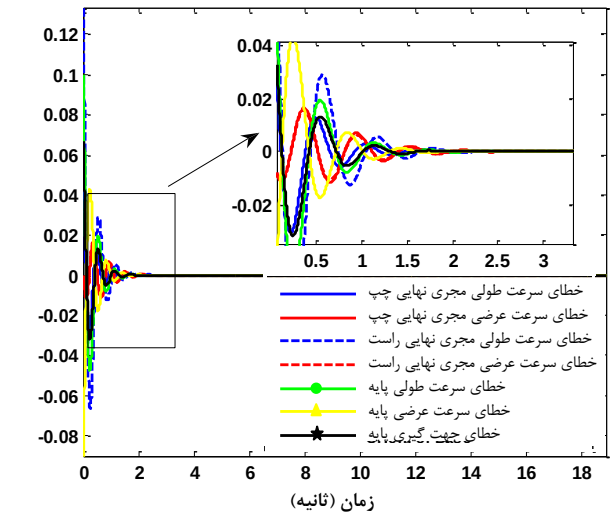
در شکل ۱۰ نشان داده شده است، این امر کنترل نیروهای تعمیم‌یافته اغتشاشی که برپایه متحرک سیستم اعمال می‌شوند را دربر دارد. همچنین، مسیر حرکت این سیستم رباتیک چندجسمی انعطاف‌پذیر، با توجه به این کنترلر طراحی‌شده در عملیات جابه‌جایی جسم و نیروهای تعمیم‌یافته مفصلی، به‌ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. این امر در حالی است که اگر هیچ‌گونه کنترلی بر روی این صفحات خورشیدی نباشد، حتی با عدم تحریک اولیه اجزای انعطاف‌پذیر، این اجزاء به‌میزان قابل ملاحظه‌ای نوسانی می‌شوند (شکل ۱۳). این نوسانات، علاوه بر اعمال نیروهای ارتعاشی زیاد به ربات مفروض و مختل‌کردن عملیات جابه‌جایی جسم، درنهایت می‌تواند منجر به آسیب‌دیدن صفحات خورشیدی گردد.



شکل ۴ نمایش شماتیکی روش کنترلی تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده برای سیستم‌های رباتیکی با اجزای انعطاف‌پذیر



شکل ۵ نمایش خطای متغیرهای تعمیم‌یافته ربات باتوجه به کنترلر تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده برای صفحات خورشیدی



شکل ۶ نمایش نرخ خطای متغیرهای تعمیم‌یافته ربات باتوجه به کنترلر تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده برای صفحات خورشیدی

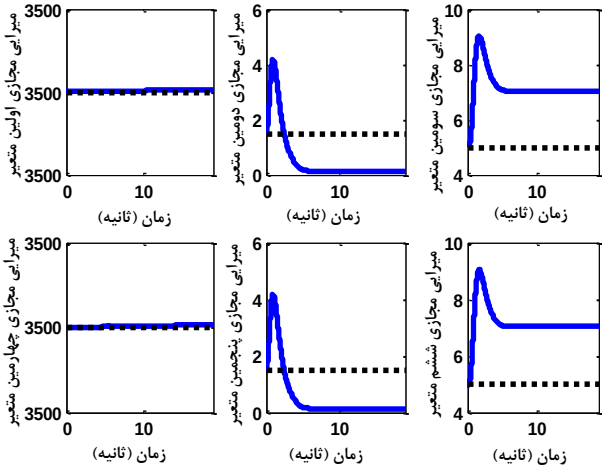
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.5.9.9]

جدول ۱ پارامترها و مشخصات جرمی برای ربات چرخ‌دار مفروض

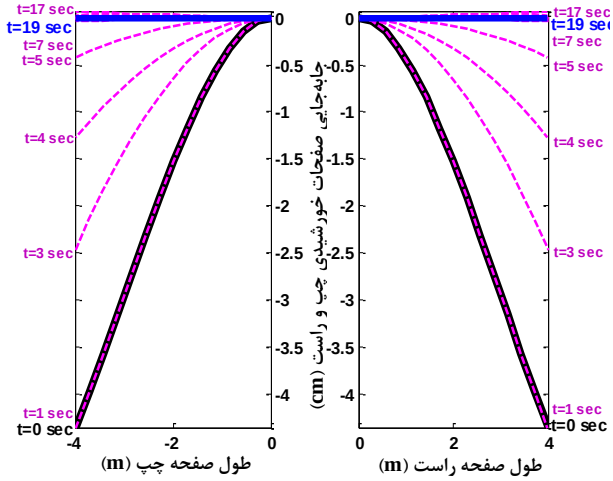
i,j	m_{ij} (kg)	l_{ij} (m)	$I_{X_{ij}}, I_{Y_{ij}}, I_{Z_{ij}}$ (kg.m^2)
$i=1$ $i=2$ / j			
۰	۳۰۰	۰/۵ و ۰/۵ و ۰/۷۵	۱۰ و ۱۵ و ۱۰
۱	۴	۱	۰/۵
۲	۳	۱	۰/۵

جدول ۲ مشخصات پارامترهای صفحات خورشیدی[۲۷]

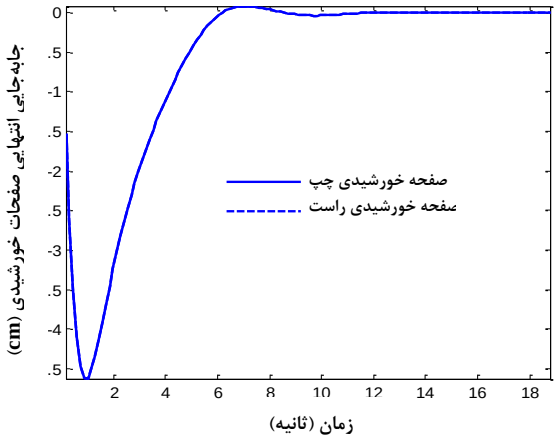
$m = ۹$ (kg)	$\rho = ۱/۴$ (g/ cm^3)
$L_b = ۴$ (m)	$E = ۶۰$ (GPa)
$a = ۱۶$ (cm^2)	$EI = ۲۰$ (N.m^2)



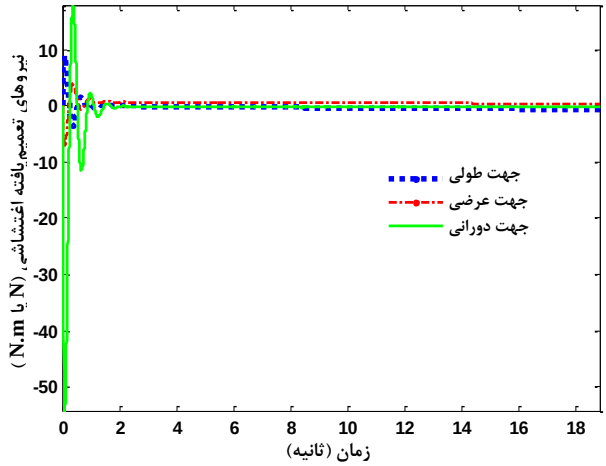
شکل ۷ نمایش پارامترهای میراکننده مجازی به‌روزشده برای صفحات خورشیدی برای کنترلر تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده (پارامتر تخمین زده‌شده N.m/sec پارامتر واقعی N.m/sec)



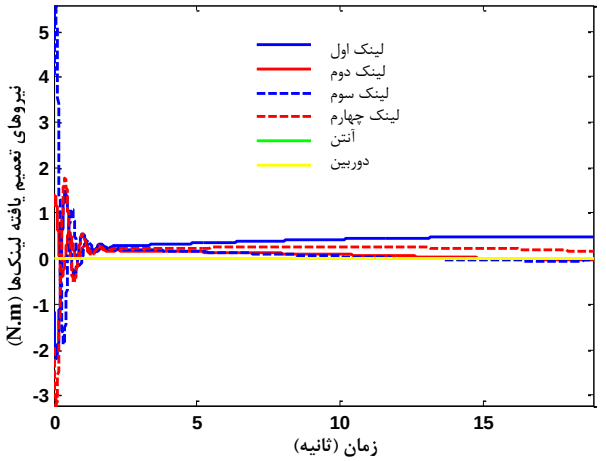
شکل ۸ نمایش میزان تغییر شکل صفحات خورشیدی ربات با توجه به کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده



شکل ۹ نمایش تغییرات انتهای صفحات خورشیدی برای ربات با توجه به کنترلر تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده



شکل ۱۰ نمایش نیروهای اغتشاشی تعمیم‌یافته ربات برای کنترلر تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده برای صفحات خورشیدی

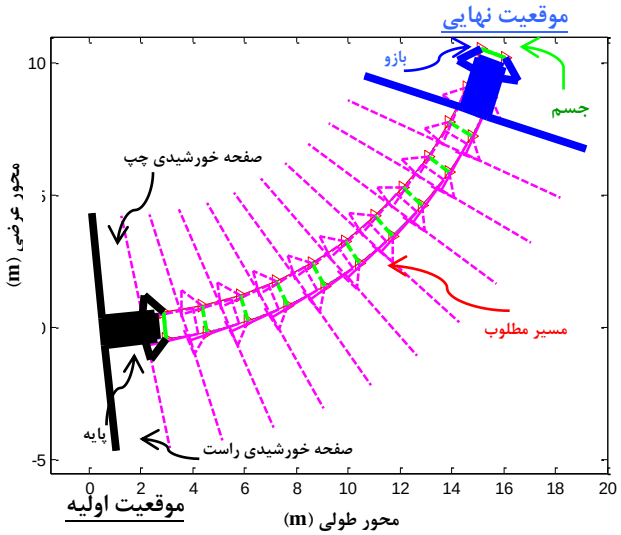


شکل ۱۱ نمایش نیروهای عملگری تعمیم‌یافته مفصلی ربات با توجه به کنترلر تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده

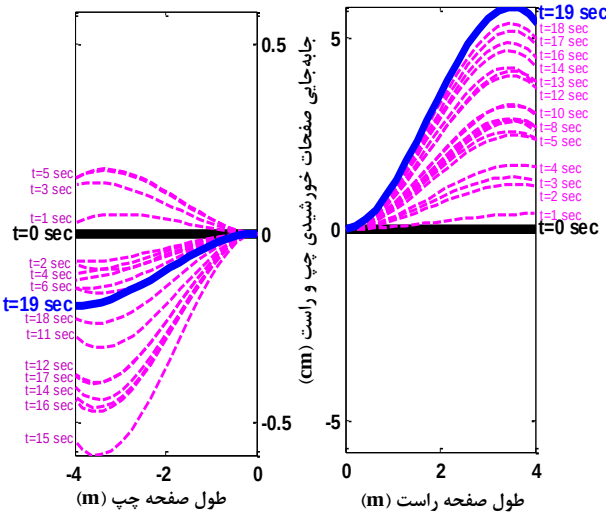
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.5.9.9]

جدول ۳ شرایط اولیه شبیه‌سازی کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده برای اجزای انعطاف‌پذیر

$\hat{B}_{f_{virtual}}^{\{i\}}(\cdot)=[۳۵۰۰ \quad ۱/۵ \quad ۵]^T$	$\Gamma_1=۷۰۰, \Gamma_2=۱۰, \Gamma_3=۱۵$
$\bar{q}_f(\cdot)=[۰ \quad ۰ \quad ۰]^T$	$\dot{\bar{q}}_f(\cdot)=[۰ \quad -۰/۱ \quad ۰]^T$
$K_p=\tilde{K}_p=۹۰۰$	$K_d=\tilde{K}_d=۳۰۰$



شکل ۱۲ نمایش حرکت ربات چرخدار مفروض با توجه به کنترلر تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده



شکل ۱۳ نمایش میزان تغییر شکل صفحات خورشیدی ربات با توجه به عدم کنترل این اجزاء

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، کنترل فعال اجزای انعطاف‌پذیر بر روی سیستم‌های رباتیک چندجسمی با اجزای انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور یک کنترل ترکیبی نیرو-موقعیت یا کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده ارائه گردید. این کنترلر بر پایه مدل دینامیکی استخراج‌شده برای این سیستم‌ها پایه‌گذاری شده است. باید توجه داشت که کنترل این سیستم، به‌دلیل وجود شرایط کمبود عملگری ناشی از دینامیک ذاتی اجزای انعطاف‌پذیر و دینامیک به‌شدت غیرخطی آن‌ها، بسیار پیچیده‌تر می‌باشد. بنابراین، بدین منظور می‌توان کنترل خنثی‌کننده ترکیبی تطبیقی را به‌عنوان یک راهکار درنظر گرفت. کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده به‌طور کامل بررسی شد و همگرایی خطا و پایداری آن، وقتی میرایی مجازی تغییر می‌کند، ارائه گردید. درنهایت نتایج شبیه‌سازی‌شده بر روی یک سیستم رباتیک مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، نشان داده شد که این الگوریتم توانست، با کنترل وضعیت اجزای انعطاف‌پذیر و به‌تبع آن کاهش نیروهای اغتشاشی وارده بر پایه متحرک سیستم رباتیک، موقعیت جسم را در عملیات جابه‌جایی اجسام به نحو مناسبی کنترل نماید.

۵- فهرست علایم

a	سطح مقطع عضو انعطاف‌پذیر (m^2)
$B_{f_{virtual}}^{(i)}$	ماتریس میرایی مجازی عضو انعطاف‌پذیر $(N.sec/m)$
C	برداری شامل سرعت‌های غیرخطی مدل دینامیکی
E	ضریب الاستیسیته (GPa)
EI	سختی خمشی عضو انعطاف‌پذیر $(N.m^2)$
G	ماتریس گیرش
H	ماتریس مثبت معین جرم سیستم
$I_{X_{ij}}$	ممان اینرسی لینک j ام از iامین بازو $(kg.m^2)$
$I_{Y_{ij}}$	ممان اینرسی لینک j ام از iامین بازو $(kg.m^2)$
$I_{Z_{ij}}$	ممان اینرسی لینک j ام از iامین بازو $(kg.m^2)$
J	ماتریس ممان اینرسی موتور مفاصل
$J_f^{\{i\}}$	ماتریس ژاکوبین دستگاه شناور جسم انعطاف‌پذیر
$J_c^{(i)}$	ماتریس ژاکوبین مطابق با iامین بازوی عامل
K	ماتریس سختی تیرهای خمشی ارتجاعی
$\underline{K}$	ماتریس تلاش کنترلی
L_b	طول صفحات ارتجاعی (m)
l_{ij}	طول لینک j ام از iامین بازوی عامل (m)
m_{ij}	جرم لینک j ام از iامین بازوی عامل (kg)
M_f	ماتریس جرم برای صفحات ارتجاعی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.5.9.9]

$\tilde{K}_p, \tilde{K}_d$	ماتریس‌های بهره‌های کنترلی
K_p, K_d	ماتریس‌های بهره در مختصات جسم
n	تعداد بازوهای عامل ربات متحرک
n_b	تعداد جسم‌های انعطاف‌پذیر سیستم چندجسمی
Q	بردار نیروهای تعمیم‌یافته $(N \text{ or } N.m^2)$
$\tilde{Q}_{app}$	بردار نیروهای کنترلی اعمالی در فضای کاری
Q_e	بردار نیروهای تعمیم‌یافته خارجی وارد بر عضو انعطاف‌پذیر
$\tilde{Q}_f$	بردار نیروی کنترلی مورد نیاز برای اعمال به جسم
$Q_{flex.}$	بردار نیروهای تعمیم‌یافته حاصل تحریک عضو انعطاف‌پذیر
$\tilde{Q}_m$	بردار نیروی کنترلی اعمالی مربوط به حرکت مجری‌نهایی
$\tilde{Q}_{react}$	بردار نیروی واکنشی در فضای وظیفه وارده از جسم
Q_v	بردار ترم‌های غیرخطی سرعت برای عضو انعطاف‌پذیر
$Q_{supp.}$	بردار نیروهای عملگری خنثی‌کننده برای عضو انعطاف‌پذیر
$\bar{q}$	بردار مختصات تعمیم‌یافته برای صفحات ارتجاعی
q_f	بردار مختصات تعمیم‌یافته الاستیک برای صفحات ارتجاعی
q_r	بردار مختصات تعمیم‌یافته مرجع برای صفحات ارتجاعی
V و M	نیروی برشی و گشتاور خمشی در عضو انعطاف‌پذیر
$\tilde{X}$	متغیرهای خروجی
α	بردار زاویه دوران عملگرهای مفاصل (rad)
β	متغیرهای تعمیم‌یافته پایه متحرک سیستم
θ	متغیرهای تعمیم‌یافته مفاصل
Γ	ماتریس ضریب بهره
ω_0	سرعت دورانی پایه (rad/sec)
ρ	چگالی جسم عضو انعطاف‌پذیر (kg/m^3)

بالا نویس‌ها:

$\{i\}$	شمارنده عضو انعطاف‌پذیر
(i)	شمارنده بازو

زیر نویس‌ها:

f	نمایشگر انعطاف‌پذیری در یک عنصر
r	نمایشگر صلبیت در یک عنصر

۶- مراجع

[1] Peggy P., Dubowsky S., "Coordinated Control of Space Robot Teams for the On-Orbit Construction of Large Flexible Space Structures", *Journal of Advanced Robotics*, Vol. 24, No. 3, 2010, pp. 303-323.

[2] Wasfy T. M., Noor A. K., "Computational Strategies for Flexible Multi-Body Systems", *Applied Mechanic Review*, Vol. 56, No. 6, 2003, pp. 553-613.

[3] Dwivedy S. K., Eberhard P., "Dynamic Analysis of Flexible Manipulators, a Literature Review", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 41, 2006, pp. 749-777.

[4] Korayem M. H., Ghariblu H., Basu A., "Dynamic Load Carrying Capacity of Mobile-Base Flexible Joint Manipulators", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, No. 1-2, 2005, pp. 62-70.

[5] Liu S., Wu L., Lu Z., "Impact Dynamics and Control of a Flexible Dual-Arm Space Robot Capturing an Object", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 18, No. 5, 2007, pp. 1149-1159.

[6] Ulrich S., Sasiadek J. Z., "Modified Simple Adaptive Control for a Two-Link Space Robot", *American Control Conference (ACC)*, USA, 2010, pp. 3654-3659.

[7] Jiang Z. H., "Impedance Control of Flexible Robot Arms with Parametric Uncertainties", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 42, No. 2, 2005, pp. 113-133.

[8] Kim J. S., Suzuki K., Uchiyama M., "Force Control of a Flexible Manipulator Based on Measurement of Link Deflection", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Japan, 1996, pp. 238-245.

[9] Kim J. S., Suzuki K., Konno A., Uchiyama M., "Force Control of Constrained Flexible Manipulators", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, USA, 1996, pp. 635-640.

[10] Lew J. Y., Book W. J., "Hybrid Control of Flexible Manipulators with Multiple Contact", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, USA, 1993, pp. 242-247.

[11] Matsuno F., Asano T., Sakawa Y., "Dynamic hybrid Position/Force Control of N-Link Flexible Manipulators", *IEEE Conference on Decision and Control*, USA, 1994, pp. 1803-1808.

[12] Krishnan H., "An Approach to Regulation of Contact Force and Position in Flexible-Link Constrained Robots", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Intelligent Systems*, Canada, 1995, pp. 2087-2092.

[13] Bascettaand L., Rocco P., "End-point Vibration Sensing of Planar Flexible Manipulators Through Visual Servoing", *Mechatronics*, Vol. 16, No. 3-4, 2006, pp. 221-232.

[14] Yamano M., Kim J. S., Uchiyama M., "Hybrid Position/Force Control of Two Cooperative Flexible Manipulators Working In 3D Space", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Belgium, 1998, pp. 1110-1115.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.5.9.9]

[15] Kim J. S., Uchiyama M., "Vibration Mechanism of Constrained Spatial Flexible Manipulators", *JSME*, Vol. 46, No. 1, 2003, pp. 123-128.
[16] Ata A. A., Johar H., "Dynamic Force/Motion Simulation of a Rigid Flexible Manipulator During Task Constrained", *IEEE International Conference on Mechatronics*, Turkey, 2004, pp. 268-273.
[17] Ebrahimi A., Moosavian S. A. A., "Dynamics of Space Free-Flying Robots with Flexible Appendages", *Iranian Journal of Science and Technology*, Vol. 4, No. 4, 2008, pp. 29-36.
[18] Zarafshan P., Moosavian S. A. A., "Adaptive Hybrid Suppression Control Using Piezoelectric Patches on Flexible Solar Panels", *Proc. of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Hungary, 2011.
[19] Zarafshan P., Moosavian S. A. A., "Rigid-Flexible Interactive Dynamics Modelling Approach", *Journal of Mathematical and Computer Modelling of Dynamics Systems*, Vol.18, No.2, 2011, pp.1-25.
[20] Alipour Kh., Moosavian S. A. A., Bahramzadeh Y., "Dynamics of Wheeled Mobile Robots with Flexible Suspension: Analytical Modelling And Verification", *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 23, No. 4, 2008, pp. 242-250.
[21] Narikiyo T., Ohmiya M., "Control of a Planar Space Robot: Theory and Experiments", *Control Engineering Practice*, Vol. 14, 2006, pp. 875-883.
[22] Ott C., Schaffer A. A., Kugi A., Hirzinger G., "On the Passivity-Based Impedance Control of Flexible Joint Robots", *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 2, 2008, pp. 416-429.
[23] Park J. H., Asada, H., "Dynamic Analysis of Non-Collocated Flexible Arms and Design of Torque Transmission Mechanisms", *ASME Journal Dynamic System, Measurement, Control*, Vol. 116, 1994, pp. 201-207.
[24] Piefort V., *Finite Element Modelling of Piezoelectric Active Structures*, PhD Thesis, Faculty of Applied Sciences, University of Libre De Bruxelles, 2001.
[25] Aglietti G. S., Langley R. S., Gabriel S. B., Rogers E., "A Modelling Technique for Active Control Design Studies with Application to Spacecraft Microvibrations", *Journal of The Acoustical Society of America*, Vol. 102, No. 4, 1997, pp. 2158-2166.
[26] Brennan M. J., Bonito J. G., Elliott S. J., David A., Pinnington R. J., "Experimental Investigation of Different Actuator Technologies for Active Vibration Control", *Journal of Smart Material and Structure*, Vol. 8, 1999, pp. 145-153.
[27] Katti V. R., Thyagarajan K., Shankara K. N., Kiran Kumar A. S., "Spacecraft Technology", *Current Science*, Vol. 93, No. 12, 2007, pp. 1715-1736.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.5.9.9]