

کنترل تطبیقی ترکیبی برای یک ربات چرخ دار با اجزای انعطاف پذیر

پیام زرافشان^۱، سید علی اکبر 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 ۱۹۹۹-۱۳۹۵، moosavian@kntu.ac.ir

چکیده- در طی یک مانور توسط سیستم رباتیک، اجزای انعطاف پذیر نظیر صفحات خورشیدی ممکن است تحریک گشته و شروع به ارتعاش نمایند. بنابراین، این ارتعاشات منجر به یکسری نیروهای اغتشاشی نوسانی می گردند که به پایه متحرك و جسم جابه جا شده اعمال و درنتیجه خطأ در رده موقعیت و سرعت در مجری های نهایی و جسم را موجب می شوند که لازم است از آن جلوگیری به عمل آید. در این مقاله، یک روش جدید کنترل جابه جایی جسم توسط یک سیستم رباتیک چرخ دار ارائه می شود. بدین منظور، با درنظر گرفتن یک سیستم رباتیکی چندجسامی با صفحات خورشیدی انعطاف پذیر، یک روش مدل سازی دینامیک برای پیاده سازی های کنترلی در سیستم های چندجسامی صلب و انعطاف پذیر معرفی می شود. سپس، بر پایه مسیر طراحی شده برای سیستم ربات چرخ دار، یک کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی کننده ارتعاشات برای انجام جابه جایی جسم توسط چنین سیستم پیچیده ای توسعه داده می شود. در پایان، یک سیستم ربات چرخ دار که شامل دو بازو، دوربین و آنتن به عنوان بازوی سوم و چهارم، همراه با دو صفحه خورشیدی که برای انجام مأموریت های اکتشافی در سایر کرات مطرح می باشد، شبیه سازی می شود. نتایج به دست آمده مزیت روش کنترلی پیشنهاد شده برای انجام یک عملیات جابه جایی جسم موفق، ضمن کاهش اثرات ارتعاشات عناصر انعطاف پذیر را نشان می دهد.

کلیدواژگان: ربات چرخ دار، کنترل تطبیقی، انعطاف پذیری، جابه جایی جسم

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

P. Zarafshan¹, 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.

سیستم‌های رباتیک با عضوهای انعطاف‌پذیر، سیستم‌های دینامیکی پیوسته‌ای هستند که از معادلات دیفرانسیل معمولی و جزئی جفت‌شده و غیرخطی تعیت می‌کنند. حل تحلیلی چنین سیستم‌هایی تقریباً امکان‌پذیر نمی‌باشد. در دینامیک اجسام چندگسمی^۳، یک دستگاه اینرسی به عنوان دستگاه مرجع کلی برای تشریح حرکت یک سیستم چندگسمی به کار می‌رود؛ همچنین، یک دستگاه مرجع واسطه، که به هر یک از اجزاء انعطاف‌پذیر متصل است و جابه‌جایی‌ها و چرخش نسبی جسم را تعقیب می‌کند. از طرفی، در کنترل سیستم‌های چندگسمی با اعضای انعطاف‌پذیر، درنظر گرفتن یک مدل دینامیکی مناسب به وجهی 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 چندگسمی 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 انباستگی در مدل‌سازی دینامیکی سیستم چندگسمی انعطاف‌پذیر بهره جسته‌اند. در حقیقت انباستگی در مدل دینامیکی یک سیستم چندگسمی انعطاف‌پذیر، به ترکیب و جفت‌شدن بین اثرات انعطاف‌پذیری و حرکت صلب اعضای یک سیستم چندگسمی 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 از جمله 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 بازویان انعطاف‌پذیر برای گرفتن جسم^۴ و در مرجع [۶]، ربات با اعضای انعطاف‌پذیر در کنترل موقعیت مجری نهایی درنظر گرفته شده‌اند و در مدل‌سازی دینامیکی سیستم یک مدل دینامیکی انباسته به کار

۱- مقدمه

گسترده کاری بازویان متحرک^۱ در عملیات مختلف بهصورت روزافزونی در حال افزایش می‌باشد، بهنحوی که وسعت تحقیقات و پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه بهخوبی نمایان گر این واقعیت می‌باشد[۱]. در بررسی این سیستم‌ها که از اجزای گوناگونی تشکیل شده‌اند، درنظر گرفتن انعطاف‌پذیری^۲ برای بعضی از اجزای آن‌ها اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. وجود انعطاف‌پذیری در این سیستم‌های چندگسمی منجر به افزایش پیچیدگی‌هایی در مدل‌سازی آن‌ها می‌شود که مورد بحث بسیاری از محققان قرار گرفته است[۲]. از سوی دیگر، بازویانی که دارای پایه متحرک می‌باشند برای انجام وظایفی همچون جابه‌جاکردن اجسام نیاز به کنترل پیچیده‌تری دارند. پیچیدگی‌های ناشی از انعطاف‌پذیری در این سیستم‌های چندگسمی، 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 بازویانی رباتیک موجود به‌طریقی طراحی و ساخته می‌شوند که سختی این را دارا باشند تا بازوی نهایی بتواند با حداقل ارتعاشات به موقعیت نهایی مطلوب خود برسد. البته این سختی نباید با استفاده از طراحی‌های سنتی و حجمی به دست آید. چرا که وجود بازویانی صلب سنتی ناکارا بودن 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 بازویانی بلند یک ربات و غیره، منجر به درنظر گرفتن تمهداتی برای مقابله با اثرات انعطاف‌پذیری آن‌ها می‌گردد. زمان استقرار برای ارتعاش اجزای مزبور می‌تواند عملیات را به تاخیر 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.

1. Robotics manipulators
2. Flexible members

3. Multi-body dynamics
4. Capturing

پرداخته می شود. سپس با درنظر گرفتن یک ربات چرخ دار با اجزای انعطاف پذیر مفروض، که برای انجام مأموریت های اکتشافی در سایر کرات مطرح می باشد، به انجام شبیه سازی های جامع برای کنترلر تطبیقی ترکیبی خنثی کننده برای این سیستم پرداخته می شود. درنهایت، نتایج پیاده سازی این کنترلر بر روی مسیر طراحی شده ذگر گردیده و مزیت های آن مورد بررسی قرار می گیرد.

۱- مدل سازی دینامیکی

روش های متفاوتی برای مدل سازی بازو های انعطاف پذیر ارائه شده است. مدل های ریاضی بازو ها عموماً از قضایای انرژی استخراج می شوند. برای یک بازوی صلب ساده، انرژی جنبشی به وسیله اینرسی متحرک آن ها و همچنین انرژی پتانسیل به وسیله موقعیت آن در میدان جاذبه ذخیره می شود. اما بازو های انعطاف پذیر انرژی پتانسیل را به وسیله تغییر شکل بازو ها، مفاصل و یا گرداننده آن ها ذخیره می کند. دینامیک سیستم های چند جسمی با اجزای انعطاف پذیر به یک سری دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی و جزئی منجر می شود که حل تحلیلی آن ها تقریباً غیرممکن می باشد. مدل سازی دینامیکی این سیستم ها به یک تحلیل دقیق از این سیستم ها و همچنین کنترل ارتعاشات اجزای انعطاف پذیر، به دلیل سختی کم آن ها، نیاز دارد.

همچنان که گفته شد، در اکثر تحقیقات یک ابنا شتگی در مدل سازی دینامیکی سیستم های چند جسمی با اجزای انعطاف پذیر در نظر گرفته اند. در حقیقت به تعداد N_{flex} معادله حرکت برای اجزای انعطاف پذیر استخراج گردیده و به معادلات دینامیکی اجزای صلب اضافه می گردد. این امر در حالی است که رویکرد مدل سازی دینامیکی تعاملی صلب انعطاف پذیر، که اخیراً توسط مؤلفان ارائه شده است، برای مدل سازی دینامیکی، معادلات حرکت اجزای صلب را از معادلات حرکت اجزای انعطاف پذیر جدا می نماید [۱۷، ۱۸]. بنابراین، دستگاه معادلات ساده تری از معادلات دینامیکی سیستم به دست می آید که می تواند در پیاده سازی کنترلرهای مدل مبنا مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد مدل سازی دینامیکی تعاملی صلب انعطاف پذیر مدل سازی دینامیکی اجزای صلب و انعطاف پذیر یک سیستم کلی یکپارچه را جدا می نماید. درنتیجه جفت شدگی بین این

برده شده است. این در حالی است که دینامیک غیر ابنا شته می تواند یک قدم موثر در بهبود و ساده سازی مدل سازی دینامیکی و کنترل سیستم های چند جسمی رباتیکی با پایه متحرک و اعضای انعطاف پذیر داشته باشد.

از سوی دیگر، قوانین کنترلی مورد استفاده در چنین سیستم هایی را می توان به دو نوع اصلی تقسیم کرد: قوانین غیر مبتنی بر مدل^۱ و قوانین مبتنی بر مدل^۲ (که یک مدل کامپیوکتری از سیستم چند جسمی انعطاف پذیر استفاده می شود) نظیر کنترل تطبیقی که در مرجع [۶]، یک کنترلر تناسی با ضرایب تطبیق را برای یک ربات فضایی با بازوی انعطاف پذیر مورد استفاده قرار داده است. این ضرایب به طور خودکار در حین عملیات و با پاسخ سیستم به نحوی تنظیم می شوند که پاسخ سیستم به مدل مرجع بسیار نزدیک باشد. همچنین، مرجع [۷] یک استراتژی کنترل امپدانس تطبیقی برای بازو های انعطاف پذیر را با استفاده از روش کنترل مسیر مجری نهایی ارائه کرده است. مراجع [۹، ۸] به طور تئوری و تحریکی به بررسی کنترل نیرو و موقعیت برای یک ربات چند عضوی پایه متحرک پرداخته اند. مرجع [۱۰] یک کنترلر ترکیبی نیرو و موقعیت را برای بازو های انعطاف پذیر متحرک، که با محیط در بیش از یک نقطه تماس دارند، در نظر گرفته است. مرجع [۱۱] کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت را بر روی بازوی انعطاف پذیر^۲ عضوی فضایی انجام داده است. مرجع [۱۲] روش اغتشاشات تکین را برای تنظیم نیروهای تماسی و موقعیت عضو انعطاف پذیر مورد بررسی قرار داده است. مرجع [۱۳] از کنترل ترکیبی دو لایه برای کنترل بازو های انعطاف پذیر استفاده کرده است. مرجع [۱۴] به بررسی کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت برای بازو های همکار در فضای سه بعدی پرداخته است. مرجع [۱۵] نشان داده است که برای بازو های انعطاف پذیر چند عضوی فضایی، ارتعاشات نمی توانند فقط با کنترل نیروهای تماسی خنثی شوند. مرجع [۱۶] هم کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت بازو های چند عضوی را مورد بررسی قرار است.

در این مقاله، با درک اهمیت این موضوع، به مدل سازی دینامیکی یک سیستم چند جسمی رباتیک با اجزای انعطاف پذیر بر اساس دیدگاه دینامیکی تعاملی صلب انعطاف پذیر

1. Non-model based

2. Model based

ریلی-ریتز^۳ مطرح می‌شوند. بنابراین، موقعیت کلی یک نقطه دلخواه بر روی جسم انعطاف‌پذیر بهوسیله این دو مختصات مرجع و الاستیک تعريف می‌شود. همچنین، با بسط انرژی جنبشی جسم انعطاف‌پذیر، اینترسی 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]:

$$\mathbf{M}_f^{\{i\}} \ddot{\mathbf{q}}^{\{i\}} + \mathbf{K}^{\{i\}} \mathbf{e}^{\{i\}} = \mathbf{Q}_e^{\{i\}} + \mathbf{Q}_v^{\{i\}}, \{i\} = \{1, 2, \dots, n_b\} \quad (1)$$

که در آن n_b تعداد جسم‌های انعطاف‌پذیر سیستم چندجسمی $\mathbf{Q}_v^{\{i\}}$ بهترتیب $\mathbf{K}^{\{i\}}$ ماتریس سختی، $\mathbf{M}_f^{\{i\}}$ ماتریس جرمی، 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:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{m}_{rr}^{\{i\}} & \mathbf{m}_{rf}^{\{i\}} \\ \mathbf{m}_{fr}^{\{i\}} & \mathbf{m}_{ff}^{\{i\}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_r^{\{i\}} \\ \ddot{\mathbf{q}}_f^{\{i\}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_{ff}^{\{i\}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_r^{\{i\}} \\ \mathbf{q}_f^{\{i\}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{Q}_e^{\{i\}})_r \\ (\mathbf{Q}_e^{\{i\}})_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\mathbf{Q}_v^{\{i\}})_r \\ (\mathbf{Q}_v^{\{i\}})_f \end{bmatrix} \quad (2)$$

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].

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q}(\mathbf{q}) + \mathbf{Q}_{\text{flex.}}(\mathbf{q}) \quad (3)$$

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

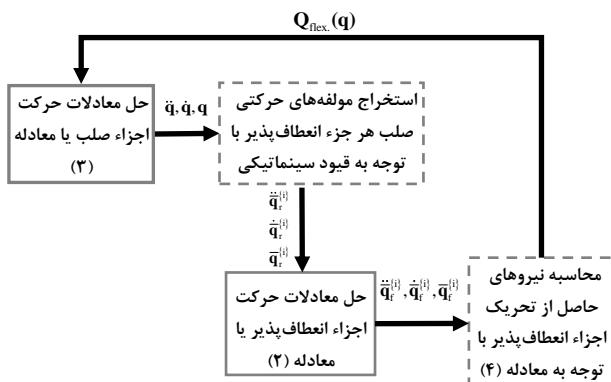
$$\mathbf{Q}_{\text{flex.}}(\mathbf{q}) = \sum_{\{i\}=I}^{\{n_b\}} \mathbf{J}_f^{\{i\}\text{T}} (\mathbf{Q}_e^{\{i\}})_r \quad (4)$$

2. Rayleigh–Ritz

دو دسته از معادلات به‌وسیله قیود سینماتیکی به‌دست می‌آید که باستی همزمان با این معادلات حل شود. بنابراین، در ابتدا مدل‌سازی دینامیکی اجزای انعطاف‌پذیر پیوسته با استفاده از روش لاغرانژ و با کمک دستگاه شناور استخراج می‌گردد. این امر با ملحق کردن دستگاه شناور به هر عضو انعطاف‌پذیر پیوسته صورت می‌پذیرد. بنابراین، حرکت هر عضو انعطاف‌پذیر در سیستم چندجسمی توسط دو دسته متغیرهای مرجع و الاستیک تعريف 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]، با اختصار معرفی می‌گردد.

همان‌طور که می‌دانیم، معادلات حرکت جسم صلب در سیستم‌های چندجسمی می‌توانند با عناصر ماتریس اینرسی و نیروهای تعییم‌یافته که بر جسم عمل می‌کنند بیان شوند. بنابراین، فرمول‌بندی دینامیکی معادلات حرکت جسم انعطاف‌پذیر با استفاده از دستگاه شناور^۱ بسط و توسعه داده می‌شود. همچنین، نشان داده می‌شود که معادلات حرکت جسم چنین سیستمی می‌تواند با عناصری از جمله انتگرال‌های شکلی در کنار جرم جسم، ماتریس اینرسی و نیروهای تعییم‌یافته همراه با ماتریس سختی نوشته شوند. انتگرال‌های شکلی، که به میدان جابه‌جایی فرض شده بستگی دارند، در عناصر غیرخطی ظاهر می‌شوند که جفت‌شدنی 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 تعريف 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

1. Floating frame



شکل ۱ بلوک دیاگرام رویکرد مدل سازی دینامیکی تعاملی صلب انعطاف پذیر



شکل ۲ نمایش سیستم ربات فضانورد مفروض شامل دو صفحه خورشیدی انعطاف پذیر

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

$$H(\beta_0, \theta) = Q(\beta_0) + Q_{\text{flex}}(\beta_0) \quad (5)$$

که در آن $Q_{\text{flex}}(\beta_0)$ نیروهای عکس‌العملی حاصل از تحریک صفحات خورشیدی می‌باشد 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 مدل سازی بر اساس رویکرد مدل سازی دینامیکی تعاملی صلب انعطاف‌پذیر، پایه و بالک‌های خورشیدی جداگانه مدل شده‌اند. بنابراین، نیروهای قیدی در سر گیردار صفحات خورشیدی انعطاف‌پذیر بر پایه ربات در نظر گرفته شده‌اند. دقت داریم، با توجه به این رویکرد مدل سازی، نیروهای خارجی وارد شده بر این جسم انعطاف‌پذیر برابر است با:

$$Q_e^{\{i\}} = \begin{pmatrix} V_{f_1}^{\{i\}} & V_{f_2}^{\{i\}} & M_{f_3}^{\{i\}} \end{pmatrix}^T \quad (6)$$

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

همان‌طور که قبل از نیز شرح داده شد، رویکرد مدل سازی دینامیکی تعاملی صلب انعطاف‌پذیر در حقیقت ترکیبی از روش‌های نیوتون-اویلر و لاگرانژ می‌باشد. برای استفاده از رویکرد مدل سازی 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 q, \dot{q}, \ddot{q} از معادلات فوق محاسبه می‌گردد. سپس مولفه‌های حرکت صلب هر جسم انعطاف‌پذیر شامل شتاب، سرعت و موقعیت یا $\ddot{q}_r, \dot{q}_r, \ddot{\bar{q}}, \dot{\bar{q}}, \ddot{\bar{q}}_r, \dot{\bar{q}}_r$ تعیین می‌گردد و به معادلات حرکت اجزای انعطاف‌پذیر به عنوان 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 $\ddot{q}_f, \dot{q}_f, \ddot{\bar{q}}, \dot{\bar{q}}, \ddot{\bar{q}}_f, \dot{\bar{q}}_f$ محاسبه می‌شوند. با استفاده از این مقادیر و جای‌گزینی آن‌ها در سطر اول معادله ۲، نیروهای قیدی یا $Q_e^{\{i\}}$ بدست می‌آیند. سپس این نتایج، با توجه به معادله ۴، به معادلات حرکت اجزای صلب به عنوان نیروهای حاصل از تحریک اجزای انعطاف‌پذیر یا (q) اعمال می‌گردد. با این تأیید نمود که این نیروی Q_{flex} قیدی در حقیقت 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 با این نیروی گرفتن یک راه کار کنترلی مناسب رفع گردد. در ادامه معادلات دینامیکی یک سیستم رباتیکی پایه متحرک فضایی را با توجه به رویکرد مدل سازی بیان شده استخراج می‌نماییم.

سیستم ربات چرخ دار مورد بررسی شامل دو بازو و دو صفحه خورشیدی برای مأموریت‌های اکتشافی در سایر کرات^۱ بوده که در شکل ۲ نشان داده شده است.

1. Shanghai Moon Rover.

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 خنثی کننده

پیچیدگی‌های سیستم‌های چندجسمی انعطاف‌پذیر باعث شده که کنترل این سیستم‌ها خود به یک موضوع چالش‌انگیز و البته بسیار دشوارتر از کنترل سیستم‌های صلب نظری 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 دقق در تعقیب کردن مسیر مطلوب لازم و ضروری می‌باشد که عموماً این دو هم‌زمان به دست نمی‌آیند، چرا که کنترلر سریع‌تر کم‌دققت‌تر است و بر عکس، بنابراین، اغلب بیشتر از یک نوع قانون کنترلی در این سیستم‌ها به منظور افزایش مزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۲، ۲۳]. 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 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 به نظر می‌رسد.

بدین منظور، در ادامه، روش کنترلی تطبیقی ترکیبی خنثی‌کننده بر روی سیستم‌های ریاتیکی 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 ریاتیکی با اجزای انعطاف‌پذیر مورد توجه قرار گرفته است. برای کنترل جایه‌جایی احسام، وجود یک نظارت بر موقعیت عضوهای در گیر

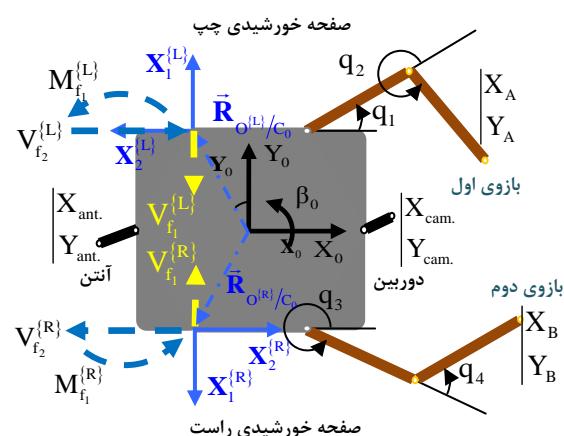
در الواقع، در هر لحظه پس از حل معادلات جسم صلب، عناصر شتاب مربوطه به عنوان ورودی این دسته معادلات جسم انعطاف‌پذیر بوده و پس از حل این معادلات با توجه به ورودی داده شده، خروجی به صورت یک نیروی تعمیم‌یافته اغتشاشی به پایه متحرک این سیستم اعمال می‌گردد. فقط با استی توچه نمود، رابطه زیر بین مولفه مکانی پایه ربات چرخدار و مبدأ مختصات مرجع جسم انعطاف‌پذیر $\{i\}$ ام یا دو نقطه از جسم

$$\bar{\mathbf{R}}_{O^{\{i\}}} = \bar{\mathbf{R}}_{C_0} + \bar{\mathbf{R}}_{O^{\{i\}}/C_0} \quad (4)$$

که این رابطه بهمراه 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:

$$\ddot{\bar{q}}^{\{i\}} = (\mathbf{M}_f^{\{i\}})^{-1} (\mathbf{Q}_e^{\{i\}} + \mathbf{Q}_v^{\{i\}} - \mathbf{K}^{\{i\}} \bar{q}^{\{i\}}) \quad (\lambda)$$

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 به دست 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 سیسیم ریات جرخ دار مفروض، و پارامترهای هندسی، آن

به فرم زیر بازنویسی می شود:

$$\tilde{Q}^{(i)} = \tilde{Q}_{app}^{(i)} + \tilde{Q}_{react}^{(i)} + \tilde{Q}_{supp}^{(i)} \quad (11)$$

که $\tilde{Q}_{react}^{(i)}$ نیروهای عکس العملی از مجری های نهایی بوده و $\tilde{Q}_{supp}^{(i)}$ نیروهای کنترلی خنثی کننده برای کنترل اجزای انعطاف پذیر می باشد و $\tilde{Q}_{app}^{(i)}$ نیروهای کنترلی لازم برای کنترل موقعیت ربات در حین عملیات می باشد که آن را می توان به دو بخش تقسیم نمود:

$$\tilde{Q}_{app}^{(i)} = \tilde{Q}_m^{(i)} + \tilde{Q}_f^{(i)} \quad (12)$$

که در آن $\tilde{Q}_m^{(i)}$ بخش کنترلی برای حرکت مجری های نهایی و $\tilde{Q}_f^{(i)}$ برای حرکت جسم توسط مجری های نهایی می باشد. می توان معادلات حرکت جسم را به صورت زیر فرض نمود:

$$M\ddot{x} + F_w = F_c + F_o + GF_e \quad (13)$$

که در آن M ماتریس جرمی، G ماتریس کارگیرش، F_w بردار نیروهای حاصل از ترم های غیر خطی سرعت، F_c نیروهای تعیین یافته مربوط به برخورد جسم با محیط، F_e نیروهای تعیین یافته اعمالی توسط هر بازو به جسم و F_o مربوط به نیروهای تعیین یافته خارجی اعمال شده به جسم می باشد. اگر قانون کنترلی برای حرکت جسم و کنترل موقعیت آن به صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$v = \ddot{x}_d + K_d(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_p(x_d - x) \quad (14)$$

که در آن K_p و K_d ماتریس های ضریب بهره قطری می باشند؛ با قراردادن مقدار قانون کنترلی فوق در معادلات حرکت جسم، نیروی لازم برای حرکت جسم به دست می آید:

$$F_{e_{req}} = G^{\#} \{ Mv + F_w - (F_c + F_o) \} \quad (15)$$

و یا:

$$F_{e_{req}} = G^{\#} \{ M(\ddot{x}_d + K_d \dot{e} + K_p e) + F_w - (F_c + F_o) \} \quad (16)$$

که در آن $e = (x_d - x)$ خطای تعییب برای حرکت جسم و $G^{\#}$ معکوس مجازی ماتریس کارگیرش G می باشد و به فرم زیر تعریف می شود:

$$G^{\#} = W^{-1} G^T (G W^{-1} G^T)^{-1} \quad (17)$$

که در آن W ماتریس وزنی می باشد. بنابراین، نیروی لازم برای حرکت جسم توسط هر مجری نهایی یا $F_{e_{req}}^{(i)}$ مستقیماً توسط $F_{e_{req}}$ بدست می آید، پس داریم:

$$\tilde{Q}_f^{(i)} = F_{e_{req}}^{(i)} \quad (18)$$

در عملیات جابه جایی اجسام ضروری به نظر می رسد. همچنین به منظور به انجام رسیدن یک عملیات موفق در این سیستم های رباتیکی انعطاف پذیر، بایستی کنترلی نیز بر اجزای انعطاف پذیر، در ضمن عملیات جابه جایی اجسام، نیروهای اغتشاشی حاصل از تحریک دینامیک تند آن ها را نیز به حداقل ممکن رساند و درنهایت دینامیک عملیات جابه جایی جسم با موفقیت به اتمام رسد. بنابراین، ترکیب این دو دیدگاه کنترلی منجر به یک کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت یا کنترل ترکیبی خنثی کننده می گردد. همچنین، به منظور دستیابی به نتایج عملکردی بهتر و با توجه به دینامیک خطای اجزای انعطاف پذیر که در آن مقادیر میراکننده مجازی منجر می شود تا ریشه های معادله مشخصه این دینامیک در سمت چپ منحنی موهومی قرار گیرد، دستیابی به یک مقدار بهینه برای این پارامتر مطلوب می باشد. راهکار مواجهه با این موضوع به روز شدن مقادیر این پارامتر با توجه به میزان تحریک دینامیک تند این سیستم ها در عملیات جابه جایی جسم و همچنین میزان مجاز محدوده عملگری می باشد. 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

بر حسب متغیرهای خروجی \tilde{X} برابر باشد با:

$$\tilde{H}^{(i)}(q^{(i)}) \ddot{\tilde{X}}^{(i)} + \tilde{C}^{(i)}(q^{(i)}, \dot{q}^{(i)}) = \tilde{Q}^{(i)} + \tilde{Q}_{flex}^{(i)} \quad (9)$$

که بالا نویس (i) مطابق با i این بازوی عامل و $q^{(i)}$ بردار مختصات تعیین یافته شامل زوایای مفصلی و جابه جایی ها می باشد و $\tilde{X}^{(i)}$ مختصات خروجی را توصیف می نماید. همچنین، $\tilde{C}^{(i)}$ شامل تمامی جملات غیر خطی سرعت و جملات ثقلی می باشد. بردار $\tilde{Q}_{flex}^{(i)}$ نیروهای انعطاف پذیر بوده و $\tilde{Q}^{(i)}$ نیز بردار نیروی تحریک شدن صفحات انعطاف پذیر بوده و تعیین یافته در فضای کاری می باشد که:

$$\begin{aligned} \tilde{H}^{(i)} &= J_c^{(i),T} H^{(i)} J_c^{(i),T} \\ \tilde{C}^{(i)} &= J_c^{(i),T} C^{(i)} - \tilde{H}^{(i)} J_c^{(i)} \dot{q}^{(i)} \\ \tilde{Q}^{(i)} &= J_c^{(i),T} Q^{(i)} \\ \tilde{Q}_{flex}^{(i)} &= J_c^{(i),T} Q_{flex}^{(i)} \end{aligned} \quad (10)$$

که در آن $J_c^{(i)}$ ماتریس ژاکوبین مطابق با i این بازوی عامل می باشد. همچنین، نیروی تعیین یافته $\tilde{Q}^{(i)}$ در فضای کاری

و یا:

$$\dot{V}(e_f, \dot{e}_f) = -\underline{X}^T Q \underline{X} + 2\tilde{B}_{f_{virtual}}^{(i)^T} \left[\Gamma^{-1} \dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{(i)} + \underline{K}^T (\underline{M}_f^{(i)})^{-1} \underline{Y} \right] \quad (41)$$

با توجه به مثبت بودن عبارت اول سمت راست معادله فوق، در صورتی که 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 حاصل شده با این ورودی کنترلی پایدار می باشد. پس داریم:

$$\dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{(i)} = -\Gamma \underline{K}^T (\underline{M}_f^{(i)})^{-1} \underline{Y} \quad (42)$$

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

$$\dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{(i)} = \underline{B}_{f_{virtual}}^{(i)} - \hat{\underline{B}}_{f_{virtual}}^{(i)} \rightarrow \dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{(i)} = -\dot{\hat{\underline{B}}}_{f_{virtual}}^{(i)} \quad (43)$$

قانون تطبیق طراحی شده به روش لیاپانوف برای میراکننده مجازی به این صورت به دست می آید:

$$\dot{\hat{\underline{B}}}_{f_{virtual}}^{(i)} = \Gamma \underline{K}^T (\underline{M}_f^{(i)})^{-1} \underline{Y} \quad (44)$$

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

۳- پیاده سازی کنترلر و بررسی نتایج شبیه سازی

با درنظر گرفتن خصوصیات ذکر شده در جدول ۱، برای سیستم ربات چرخ دار با صفحات خورشیدی انعطاف پذیر به مشخصات ذکر شده در جدول ۲، به بررسی نتایج برای کنترلر تطبیقی ترکیبی خنثی کننده بروی این سیستم رباتیکی مفروض می پردازیم. همچنین، مقادیر شرایط اولیه شبیه سازی های این قسمت برای قانون تطبیق طراحی شده این اجزای انعطاف پذیر در جدول ۳ آورده شده است. همچنان که در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است، خط و نرخ خطای متغیرهای فضای کاری تعریف شده برای این سیستم رباتیک چند جسمی مفروض به خوبی به صفر همگرا شده و در نتیجه یک عملیات جابه جایی جسم موفق را رقم زده است. این در حالی است که قانون تطبیق طراحی شده برای عملگرهای نصب شده بر روی صفحات خورشیدی انعطاف پذیر، مقادیر میرایی مجازی را به نحوی تغییر می دهند (شکل ۷) که این اجزاء علی رغم داشتن شرایط تحریک اولیه نیز به خوبی کنترل شوند (شکل های ۸ و ۹). همان طور که

که در آن $0 < \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_r$ ماتریس ضرب ماتریس $\Gamma = \text{diag}[\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_r]$ بهره می باشد. با توجه به لم کالمن- یاکوبیچ- پوپوف^۱، می توان گفت که اگر سیستمی پایدار باشد، آنگاه ماتریس های متقارن و مثبت معین \underline{Q} موجود می باشند به طوری که:

$$\underline{A}^T \underline{\rho} + \underline{\rho} \underline{A} = -\underline{Q}$$

$$\underline{\rho} \underline{B} = \underline{C}^T \rightarrow \underline{B}^T \underline{\rho}^T = \underline{C} \rightarrow \underline{B}^T \underline{\rho} = \underline{C} \quad (34)$$

با توجه به مثبت معین بودن تابع لیاپانوف تعریف شده به بررسی مشتق این تابع می پردازیم. پس داریم:

$$\dot{V}(e_f, \dot{e}_f) = \dot{\underline{X}}^T \underline{\rho} \underline{X} + \underline{X}^T \underline{\rho} \dot{\underline{X}} + 2\tilde{B}_{f_{virtual}}^{(i)^T} \Gamma^{-1} \dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{(i)} \quad (35)$$

با قرار دادن از معادلات دینامیکی خطای اجزای انعطاف پذیر در فرم فضایی حالت داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_f, \dot{e}_f) = & \left[\underline{A} \underline{X} + \underline{B} ((\underline{M}_f^{(i)})^{-1} \underline{K} \tilde{B}_{f_{virtual}}^{(i)}) \right]^T \underline{\rho} \underline{X} \\ & + \underline{X}^T \underline{\rho} \left[\underline{A} \underline{X} + \underline{B} ((\underline{M}_f^{(i)})^{-1} \underline{K} \tilde{B}_{f_{virtual}}^{(i)}) \right] + 2\tilde{B}_{f_{virtual}}^{(i)^T} \Gamma^{-1} \dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{(i)} \end{aligned} \quad (36)$$

پس از انجام مرتب سازی داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_f, \dot{e}_f) = & \underline{X}^T \underline{A}^T \underline{\rho} \underline{X} + \underline{X}^T \underline{\rho} \underline{A} \underline{X} \\ & + 2\tilde{B}_{f_{virtual}}^{(i)^T} \Gamma^{-1} \dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{(i)} + \left[\underline{B} (\underline{M}_f^{(i)})^{-1} \underline{K} \tilde{B}_{f_{virtual}}^{(i)} \right]^T \underline{\rho} \underline{X} \\ & + \underline{X}^T \underline{\rho} \underline{B} (\underline{M}_f^{(i)})^{-1} \underline{K} \tilde{B}_{f_{virtual}}^{(i)} \end{aligned} \quad (37)$$

پس از ساده سازی و با توجه به اینکه $((\underline{M}_f^{(i)})^{-1})^T = (\underline{M}_f^{(i)})^{-1}$ معادله فوق را به صورت زیر باز آرایی می کنیم:

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_f, \dot{e}_f) = & \underline{X}^T \left[\underline{A}^T \underline{\rho} + \underline{\rho} \underline{A} \right] \underline{X} + 2\tilde{B}_{f_{virtual}}^{(i)^T} \Gamma^{-1} \dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{(i)} \\ & + \tilde{B}_{f_{virtual}}^{(i)^T} \underline{K}^T (\underline{M}_f^{(i)})^{-1} \underline{B}^T \underline{\rho} \underline{X} \\ & + \tilde{B}_{f_{virtual}}^{(i)^T} \underline{K}^T (\underline{M}_f^{(i)})^{-1} \underline{B}^T \underline{\rho} \underline{X} \end{aligned} \quad (38)$$

که در نتیجه:

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_f, \dot{e}_f) = & -\underline{X}^T Q \underline{X} \\ & + 2\tilde{B}_{f_{virtual}}^{(i)^T} \left[\Gamma^{-1} \dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{(i)} + \underline{K}^T (\underline{M}_f^{(i)})^{-1} \underline{B}^T \underline{\rho} \underline{X} \right] \end{aligned} \quad (39)$$

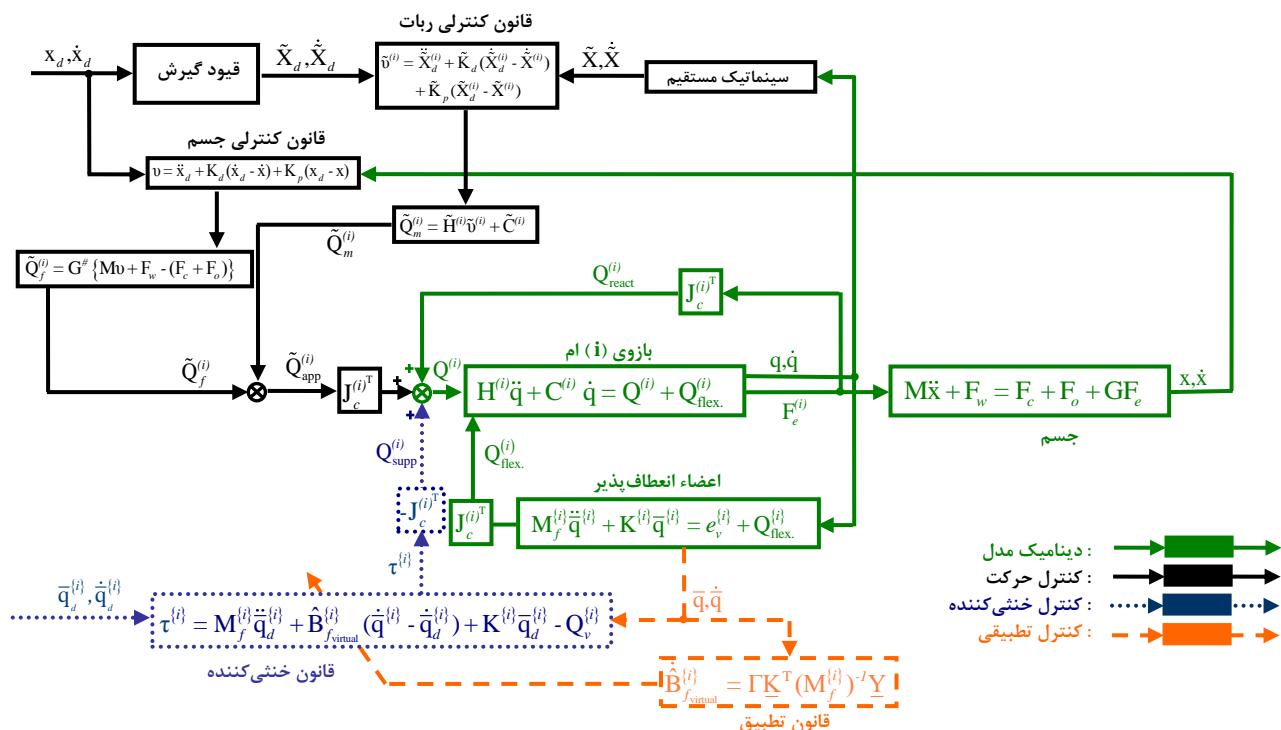
و با درنظر گرفتن معادلات دینامیکی خطای اجزای انعطاف پذیر در فرم فضایی حالت داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_f, \dot{e}_f) = & -\underline{X}^T Q \underline{X} \\ & + 2\tilde{B}_{f_{virtual}}^{(i)^T} \left[\Gamma^{-1} \dot{\tilde{B}}_{f_{virtual}}^{(i)} + \underline{K}^T (\underline{M}_f^{(i)})^{-1} \underline{C} \underline{X} \right] \end{aligned} \quad (40)$$

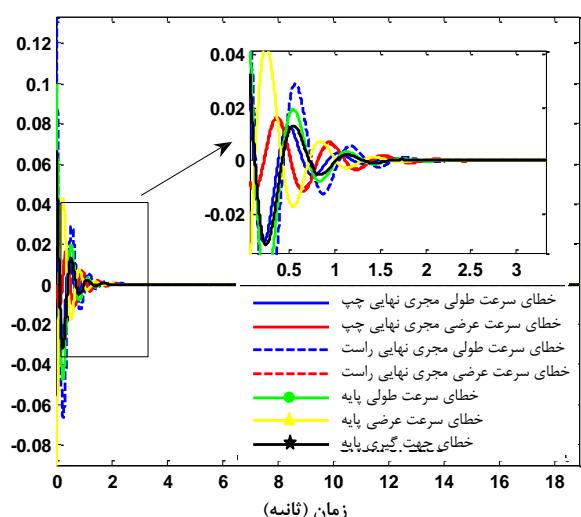
1. Kalman-Yakubovich-Popov Lemma

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 مختلط کردن عملیات جایه‌جایی جسم، درنهایت می‌تواند منجر به آسیب‌پذین صفحات خورشیدی گردد.

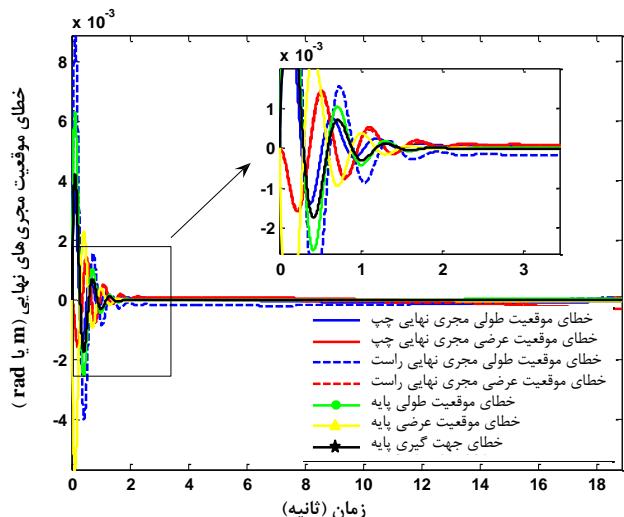
در شکل ۱۰ نشان داده شده است، این امر کنترل نیروهای تعیین یافته اغتشاشی که برپایه متحرک سیستم اعمال می‌شوند را دربر دارد. همچنین، مسیر حرکت این سیستم رباتیک چند جسمی انعطاف‌پذیر، با توجه به این کنترل‌طرایحی شده در عملیات جایه‌جایی جسم و نیروهای تعیین یافته مفصلی، به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. این امر در حالی



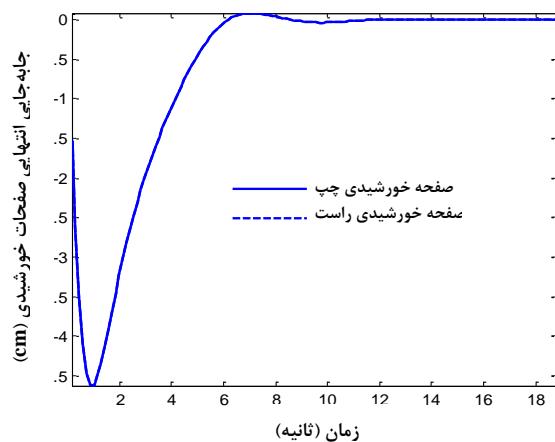
شکل ۴ نمایش شماتیکی روش کنترلی تطبیقی ترکیبی خنثی کننده برای سیستم های رباتیکی با اجزای انعطاف پذیر



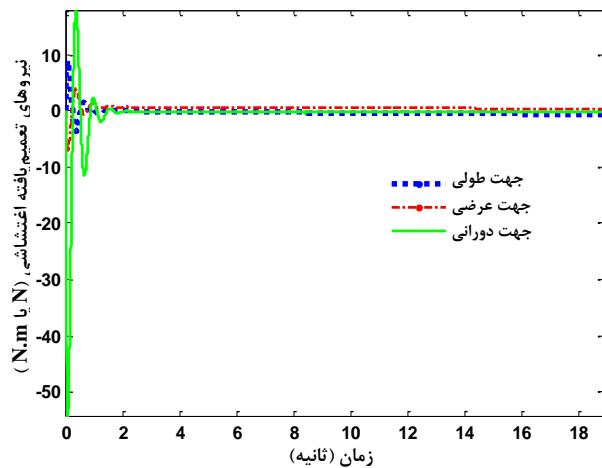
شکل ۶ نمایش نرخ خطای متغیرهای تعمیم یافته ربات با توجه به کنترل تطبیقی، ترکیبی، خنثی، کننده برای صفحات خورشیدی



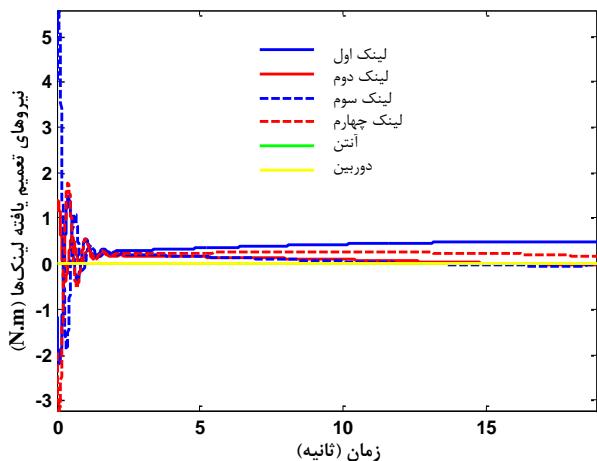
شکل ۵ نمایش خطای متغیرهای تعمیم یافته ربات با توجه به کنترلر تطبیق، ترسی، خستگی، کننده برای صفحات خودشیدی



شکل ۹ نمایش تغییرات انتهای صفحات خورشیدی برای ربات با توجه به کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی کننده



شکل ۱۰ نمایش نیروهای اغتشاشی تمیم یافته ربات برای کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی کننده برای صفحات خورشیدی



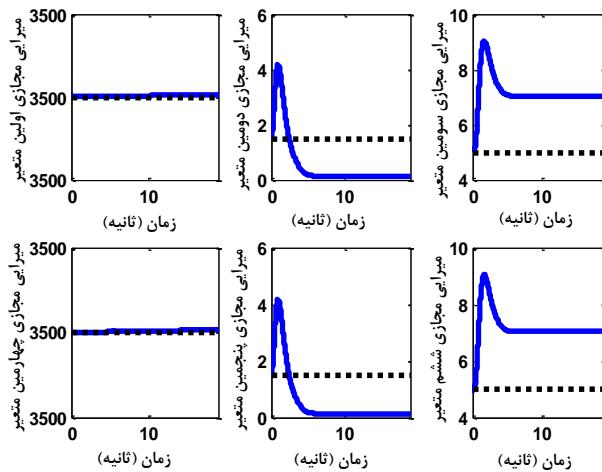
شکل ۱۱ نمایش نیروهای عملگری تمیم یافته مفصلی ربات با توجه به کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی کننده

جدول ۱ پارامترها و مشخصات جرمی برای ربات چرخ دار مفروض

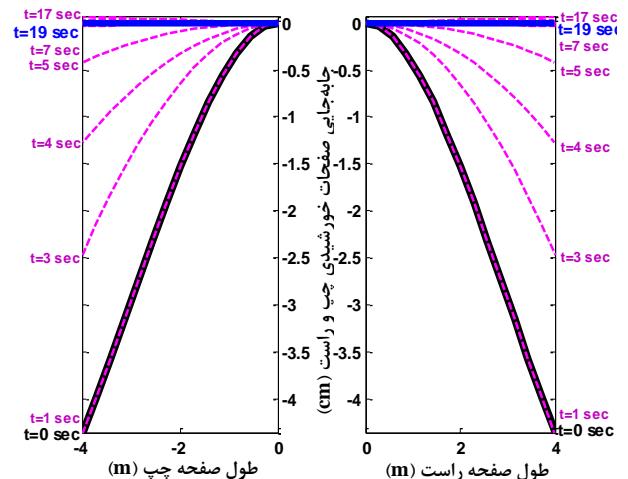
i, j	m_{ij} (kg)	l_{ij} (m)	$I_{X_{ij}}, I_{Y_{ij}}, I_{Z_{ij}}$ (kg.m ²)
$i=1 \quad j=1$	۳۰۰	۰/۷۵	۰/۵ و ۰/۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۱۰
$i=1 \quad j=2$	۴	۱	۰/۵
$i=2 \quad j=3$	۳	۱	۰/۵

جدول ۲ مشخصات پارامترهای صفحات خورشیدی [۲۷]

$$\begin{aligned} m &= ۹ \text{ (kg)} & \rho &= ۱/۴ \text{ (g/cm}^3\text{)} \\ L_b &= ۴ \text{ (m)} & E &= ۶ \cdot (\text{GPa}) \\ a &= ۱۶ \text{ (cm}^2\text{)} & EI &= ۲ \cdot (\text{N.m}^2) \end{aligned}$$



شکل ۷ نمایش پارامترهای میراکننده مجازی بهروزشده برای صفحات خورشیدی برای کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی کننده (پارامتر تخمین زده شده N.m/sec) — پارامتر واقعی (N.m/sec) ■■■

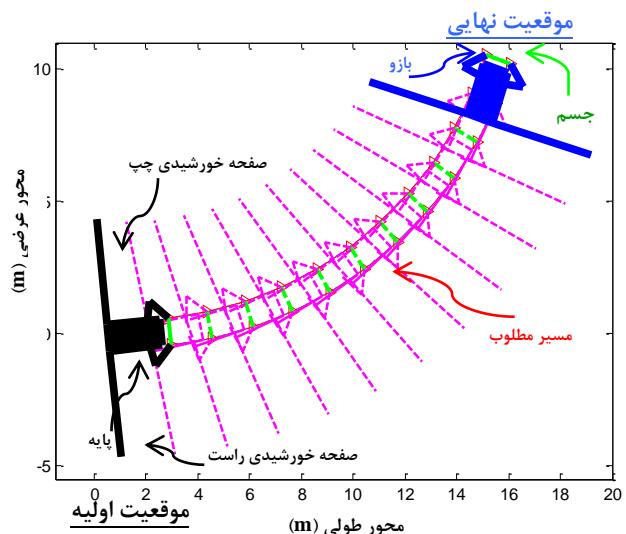


شکل ۸ نمایش میزان تغییر شکل صفحات خورشیدی ربات با توجه به کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی کننده

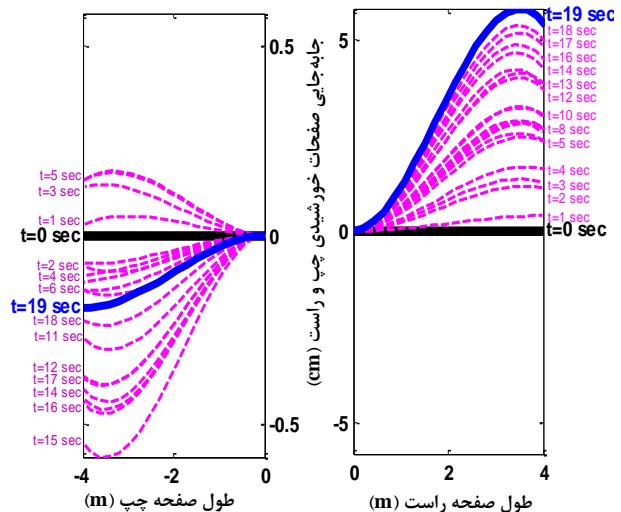
بررسی قرار گرفت. بدین منظور یک کنترل ترکیبی نیرو-موقعیت یا کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی کننده ارائه گردید. این کنترلر بر پایه مدل دینامیکی استخراج شده برای این سیستم‌ها پایه‌گذاری شده است. باید توجه داشت که کنترل این سیستم، بهدلیل وجود شرایط کمبود عملگری ناشی از دینامیک ذاتی اجزای انعطاف‌پذیر و دینامیک بهشدت غیرخطی آن‌ها، بسیار پیچیده‌تر می‌باشد. بنابراین، بدین منظور می‌توان کنترل خنثی کننده ترکیبی تطبیقی را به عنوان یک راهکار در نظر گرفت. کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی کننده به طور کامل بررسی شد و همگرایی خطاب و پایداری آن، وقتی میرایی مجازی تغییر می‌کند، ارائه گردید. درنهایت نتایج شبیه‌سازی شده بر روی یک سیستم رباتیک مورد بررسی قرار گرفت. همچنان، نشان داده شد که این الگوریتم توانست، با کنترل وضعیت اجزای انعطاف‌پذیر و به تبع آن کاهش نیروهای اغتشاشی واردہ بر پایه متحرک سیستم رباتیک، موقعیت جسم را در عملیات جابه‌جایی اجسام به نحو مناسبی کنترل نماید.

جدول ۳ شرایط اولیه شبیه‌سازی کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی کننده برای اجزای انعطاف‌پذیر

$$\begin{aligned}\hat{B}_{f_{\text{virtual}}}^{(i)}(\cdot) &= [3500 \quad 1/5 \quad 5]^T & \Gamma_1 = 700, \Gamma_2 = 10, \Gamma_3 = 15 \\ \bar{q}_i(\cdot) &= [\cdot \quad \cdot \quad \cdot]^T & \dot{\bar{q}}_i(\cdot) = [\cdot \quad -1/1 \quad \cdot]^T \\ K_p = \tilde{K}_p &= 900 & K_d = \tilde{K}_d = 300\end{aligned}$$



شکل ۱۲ نمایش حرکت ربات چرخ دار مفروض با توجه به کنترل تطبیقی ترکیبی خنثی کننده



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

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، کنترل فعل اجزای انعطاف‌پذیر بر روی سیستم‌های رباتیک چندجسمی با اجزای انعطاف‌پذیر مورد

- 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.

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

بالا نویس‌ها:

$$\{i\} \quad \text{شمارنده عضو انعطاف‌پذیر}$$

$$(i) \quad \text{شمارنده بازو}$$

زیر نویس‌ها:

$$f \quad \text{نمایشگر انعطاف‌پذیری در یک عنصر}$$

$$r \quad \text{نمایشگر صلیبت در یک عنصر}$$

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",

- [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.
- [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.