



معیار پایداری برای ربات موازی محرک کابل

مهدی بامداد^{۱*}، شیرکو فاروقی^۲

۱- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

* شاهرود، صندوق پستی ۳۶۱۹۹۵۱۶۱، bamdad@shahroodut.ac.ir

چکیده- در این مقاله، معیار پایداری بهبود یافته‌ای برای ربات‌های موازی با محرک کابلی ارائه می‌شود. این دسته از ربات‌ها نسبت به سایر ربات‌های سری و حتی ساختار موازی مزایایی دارند، اما به سادگی در معرض اختلالات قرار می‌گیرند. حضور مؤلفه‌های نیرو و ممان خارجی ممکن است موجب نقض قیود حرکتی شود. معیار پایداری، عددی بین صفر و یک را پیشنهاد می‌کند. چنین معیاری می‌تواند ملاکی برای ارزشیابی توانایی ربات در بازگشت به حالت تعادل اولیه هنگام ایجاد و تأثیر اختلالات خارجی باشد. در ارائه معیار، از روابط گیبس ایل و مفهوم انرژی شتاب استفاده شده است. مدل‌سازی دینامیکی ربات بر اساس سینماتیک و روابط نیوتن-اولر برای محاسبه معیار صورت گرفته است. برای نشان دادن قابلیت معیار پیشنهاد شده، ربات کابلی شش درجه آزادی با شش کابل، شبیه‌سازی شده است. نتایج در قالب دو شبیه‌سازی ارائه و تحلیل شده‌اند. معیار پایداری علاوه بر پارامترهای سینماتیکی تابع پارامتر سینتیکی کشش کابل‌ها در ابتدای حرکت است. بنابراین با استفاده از معیار پیشنهادی می‌توان ارزیابی صحیح‌تری از پایداری در حوزه وسیع‌تری از ربات‌های موازی کابلی حاصل نمود.

کلیدواژگان: ربات موازی، محرک کابلی، پایداری، معیار.

Stability measure for a parallel cable driven robot

M. Bamdad^{1*}, S. Faroghi²

1- Assist. Prof., Mech. Eng., Shahrood Univ., Shahrood, Iran

2- Assist. Prof., Mech. Eng., Urmia Univ. Tech., Urmia, Iran

* P.O.B. 3619995161, Shahrood, Iran. bamdad@shahroodut.ac.ir

Abstract- A modified measure for the parallel cable driven robots is presented in this paper. These robots have additional advantages compared to other robots and even the parallel structures, but they are readily exposed to disturbances. The presence of external wrench (Force-Moment) may be the cause of violation against the motion constraint. The stability measure proposes a number between zero and one that could be the criterion for the evaluation of the robot's ability while returning to its original equilibrium which was influenced by external disturbances. To offer a stability measure, Gibbs-Appell equations and acceleration energy are used. Robot kinematic and dynamic modeling based on Newton-Euler's method calculates the measure. To illustrate the capabilities of the proposed measure, a 6 DOF cable robot with six cables is simulated. The results of the two simulations are presented and analyzed. The stability measure is depended to kinematic parameters and also to kinetics parameters as cables tension at the beginning of motion. Therefore using the proposed measure one can better evaluate the stability within the wider range of parallel cable robots.

Keywords: Parallel Robot, Cable- Driven, Stability, Measure.

۱- مقدمه

صاحبان صنایع قرار گرفته است. عملگر نهایی در ربات موازی با محرک کابل، با حداقل دو زنجیره سینماتیکی مستقل به پایه متصل است و کابل‌ها جایگزین بازوهای صلب در زنجیره

ربات‌های موازی به علت خصوصیتی مانند سختی زیاد، پایداری بالا و تحمل بار با وزن زیاد، بسیار مورد توجه محققان و

اشاره کرده‌اند [۱۰]. قیود تماسی انگشت‌ها ایجاب می‌کند که جسم به جلو برده شود و سطح جسم نمی‌تواند کشیده شود. در حالی که کابل می‌تواند بکشد اما نمی‌تواند به سمت جلو، به جسم نیرو وارد کند. از این شباهت در اعمال نیروهای یک طرفه برای محاسبه سختی و تحلیل پایداری ربات‌های کابلی بر اساس پنجه‌های چندانگشتی بهره گرفته شده است [۱۱، ۱۲]. دست‌یابی به میزان سختی مدنظر می‌تواند در کنترل حرکت عملگر نهایی نقش مؤثری داشته باشد به نحوی که کنترل موقعیت عملگر نهایی بر مبنای تأمین سختی در جهت‌های اصلی صورت گرفته و نتایج بهتری را نسبت به کنترل بر مبنای اصل کمینه‌سازی نیروی کابل‌ها به همراه داشته است [۱۳]. از آنجا که مسأله پایداری می‌تواند بر اساس ماتریس سختی مورد بررسی قرار گیرد [۱۴]، بهزادی‌پور سختی کابل‌ها را بر اساس نیروهای مخالف در ربات‌های مقید کامل مطالعه کرده و شرایط ناپایداری بر اساس سختی چرخشی تولید شده بوسیله نیروهای داخلی کابل‌ها را توجیه کرده است [۱۵].

پایداری تعادل استاتیکی می‌تواند به عنوان یک مسأله بهینه‌سازی مقید مطرح شود. با ارائه روابط مستقیم و معکوس هندسی-استاتیکی تحلیل پایداری برای ربات‌های مقید ناقص با تعداد کابل کمتر از شش در [۱۶] مطرح شده است. همچنین بوسچر معیاری برای سنجش پایداری ربات معرفی کرده است [۱۷]. این معیار بدون دخالت محدودیت‌های کشش در کابل‌ها و فقط بر اساس موقعیت سینماتیکی محاسبه شده است. به علاوه، این معیار، صرفاً برای ربات‌های کابلی مقید ناقص آویزان مطرح می‌شود. در مورد ربات‌های کابلی مقید کامل، تحقیقات صورت گرفته در حوزه پایداری محدود به بررسی ماتریس سختی و تأثیر آن در شرایط پایداری بر اساس شباهت ربات‌های کابلی با پنجه‌های چند انگشتی است. در این مقاله معیار پایداری به نحوی تدوین می‌شود که قابلیت پیاده‌سازی و ارزیابی ربات‌های مقید کامل نیز با این معیار بر پایه سینماتیک و دینامیک مسأله فراهم شود.

بخش دوم به بحث کوتاهی درباره تحلیل پایداری ربات‌های کابلی با توجه به فرضیات مسأله می‌پردازد. در بخش سوم مدل دینامیکی ربات بر اساس سینماتیک و روابط نیوتن-اویلر استخراج می‌شود. نوآوری مقاله تحت عنوان معیار پایداری بهبود یافته، در بخش چهارم مطرح می‌شود. به منظور استخراج

سینماتیکی هستند [۱]. با وجود این که ربات از وزن و اینرسی کمی برخوردار است، فضای کاری می‌تواند وسیع باشد [۲]. مشکل اصلی در ربات موازی با محرک کابلی، تحریک یک جانبه محرک‌ها است. شرط مثبت بودن کشش در تمام کابل‌ها به دو دلیل مسأله‌ای محوری محسوب می‌شود، اول آنکه کابل فقط می‌تواند جسم را بکشد و نمی‌تواند آن را به جلو براند. دوم این که اگر یکی از کابل‌ها در کشش قرار نداشته باشد، هیچ نیرویی تحمل نکرده و قوای محرکه سیستم با یک کابل کمتر عمل می‌کند.

ربات‌های کابلی را می‌توان به دو دسته مقید کامل و مقید ناقص تقسیم کرد. در مکانیزم‌های مقید کامل همه درجات آزادی عملگر نهایی مهار می‌شود و تعداد کابل‌ها بایستی از درجات آزادی سیستم حداقل یکی بیشتر باشد [۳]. محرک‌های اضافی برای کنترل بهتر درجات آزادی سیستم و حذف شرایط تکین به کار برده می‌شوند. در یک ربات مقید کامل نیروی ایجاد کننده کشش در کابل‌ها به صورت داخلی توسط کابل‌ها فراهم می‌شود و لزومی به بکارگیری نیروهای خارجی نیست. فالکون با ۷ کابل [۴] و وارپ با ۸ کابل [۵] مکانیزم‌های فضایی مقید کامل هستند. هنگامی که تعداد کابل‌های محرک مساوی و یا کمتر از درجات آزادی عملگر نهایی در فضا باشد، ربات به صورت مقید ناقص حرکت می‌کند. در این حالت نیروی خارجی مانند جاذبه، فنر، سیلندر فشاری به عنوان نیروی تعادلی لازم برای تولید کشش در کابل‌ها استفاده می‌شود. در تاریخچه ربات‌های کابلی، نوع مقید ناقص، بیشتر به چشم می‌خورد. در مکانیزم‌هایی با ساختارهای عظیم مانند جرثقیل و تلسکوپ تعداد کمتر محرک‌ها، پیچیدگی را کاهش می‌دهد [۶-۸]. مشکل چنین سیستم‌هایی این است که عملگر نهایی به راحتی نوسان کرده و رنج (نیرو - ممان) خارجی، مکان عملگر نهایی را تغییر می‌دهد.

یانگ پایداری یک جرثقیل سه کابله را بر اساس انحنای مسیر مرکز جرم بررسی کرده است. آزمونی که برای تشخیص پایداری و یا ناپایداری ارائه شده، نمی‌تواند تمام ابعاد حرکتی مخصوصاً چرخش‌های عملگر نهایی را در یک ربات کابلی فضایی در نظر گرفته و معیار کمی دقیقی برای میزان پایداری عمومی ارائه دهد [۹]. محققان از نظر نحوه اعمال نیروها به شباهت‌های ربات‌های کابلی با پنجه‌های لامسه‌ای چندانگشتی

۳- مدل دینامیکی ربات

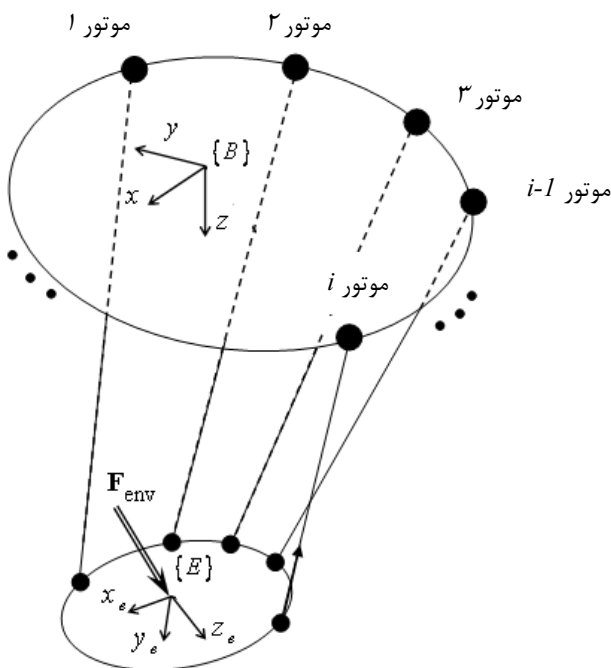
یک ربات کابلی با قابلیت تأمین ۶ درجه آزادی برای عملگر نهایی، در شکل ۱ نشان داده شده است. معادلات سینماتیک و دینامیک ربات جهت ایجاد ارتباط بین عملگر نهایی و صفحه ی پایه بیان شده است [۱۸].

در این ربات موتورهای نصب شده در صفحه پایه با شش کابل به صفحه عملگر نهایی متصل شده‌اند. دستگاه مختصات اینرسی $\{B\}$ بر صفحه ثابت و دستگاه مختصات $\{E\}$ روی صفحه متحرک اختیار شده است. موقعیت و جهت صفحه متحرک نسبت به دستگاه مختصات ثابت، به صورت بردار $X = (x_m, y_m, z_m, \psi, \theta, \phi)^T$ در نظر گرفته شده است. وضعیت مرکز دستگاه مختصات $\{E\}$ است. ترمهای سرعت خطی و زاویه‌ای در دو دستگاه مختصات ثابت و متحرک به صورت v و \tilde{v} نمایش داده می‌شود:

$$v = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}_{\{E\}}, \quad \tilde{v} = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{z}_e \\ \dot{\psi}_e \\ \dot{\theta}_e \\ \dot{\phi}_e \end{bmatrix}_{\{B\}} \quad (1)$$

و ماتریس ژاکوبین از دیدگاه دستگاه های مختصات ثابت و متحرک قابل بیان است.

$$\dot{q} = \tilde{J}\tilde{v}, \quad \dot{q} = Jv \quad (2)$$



شکل ۱ مدل کلی ربات محرک کابلی فضایی

معیار پایداری از روابط گیبس اپل و مفهوم انرژی شتاب بهره گرفته می‌شود.

در بخش پنجم از یک ربات شش درجه آزادی با شش کابل به عنوان مدل استفاده شده و معیار جدید ارائه شده از جنبه‌های مختلف در شبیه‌سازی‌ها ارزیابی می‌شود.

۲- مسأله پایداری و فرضیات

ربات‌های موازی کابلی از مزایایی خاصی نسبت به سایر ربات‌های سری و حتی ربات‌هایی با ساختار موازی برخوردارند. بنابراین در مواردی به کار گرفته می‌شوند که ممکن است در معرض اختلالات و رنج (نیرو-ممان) خارجی نظیر باد قرار می‌گیرند. از طرف دیگر، وارد شدن نیروی ضربه‌ای به دلایلی نظیر برخورد اجزای متحرک ربات با مانع خارجی باعث انحراف ربات از مسیر اصلی خود می‌شود.

مطلوب است که عملگر نهایی تحت تأثیر اختلالات در کمترین زمان ممکن به حالت اولیه‌اش برگردد. تعیین مسیر دقیق طی شده بستگی به عواملی دارد که در مدل ایده‌ال در نظر گرفته نمی‌شود. این موارد شامل استهلاک محیطی، اصطکاک اجزا، جرم و انعطاف کابل‌ها، تلفات انرژی در کابل‌ها است. اگر مقدار قابل توجهی رنج اعمال شود، ممکن است که بار به محدوده های خارج از فضای کاری پرتاب شود و تا برقراری کشش مثبت در تعدادی از کابل‌ها، نوسان کند. در تحلیل، چنین سیستمی به نظر پیچیده می‌رسد.

فرضیاتی برای تحلیل پایداری در مقابل اختلالات در این مقاله در نظر گرفته شده است. جرم کابل‌ها قابل چشم‌پوشی است، کش نمی‌آیند و شکم‌دهی ندارند. عملگر نهایی یک جسم یک‌پارچه صلب است [۱۷]. نقاط اتصال کابل‌ها به عملگر نهایی و همچنین به مجموعه پولی-موتور ثابت هستند. هر موتور دقیقاً یک کابل را کنترل می‌کند.

اختلالات خارجی فرض شده برای بارگذاری نامعلوم مقداری نامعلوم است که فقط بر عملگر نهایی عمل می‌کند. اگر تکانه بزرگ باشد، پیش‌پس حاصل بزرگ خواهد بود و این موجب می‌شود صفحه متحرک جابجایی بزرگی داشته باشد که خلاف فرضیات مسأله است. تحلیل پایداری با فرض جابجایی بسیار محدود عملگر نهایی صورت می‌گیرد و طول کابل‌ها ثابت نگه‌داشته می‌شوند.

۴-۲- تعریف معیار پایداری

معیار پایداری پیشنهاد شده بر اساس تابع گیبس تعریف می‌شود. هدف اصلی در این مقاله تعیین انرژی شتاب عملگر نهایی با فرض جابجائی‌های کوچک روی مسیر پیچیده حرکت تحت اختلال ضربه‌ای است. کاهش تابع انرژی منجر به کاهش ارتعاشات واداشته سیستم می‌شود.

بر اساس محدودیت‌های طراحی اجزای ربات و شرایط لازم محرکه کابل، نیروی داخلی n کابل ربات در محدوده مجاز باید در نظر گرفته شود:

$$T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (10)$$

نیروهای پیش کشش به منظور حفظ تعادل استاتیکی صفحه متحرک بدون بار، به ربات اعمال می‌شود. این واقعیت بر اساس نمونه آزمایشگاهی ربات در نظر گرفته شده است [۲۰]. میزان کشش مثبت اولیه نیز در رابطه نامساوی (۱۰) صدق می‌کند.

بر اساس معادله دینامیک حرکت و پیش کشش کابل‌ها T_{pre} ، شتاب اولیه سیستم نمایش داده می‌شود:

$$\dot{v}_{int} = -D^{-1} \left(J^T T_{pre} + \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{C} \end{bmatrix} \right) \quad (11)$$

در جایی که:

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} (I_3 - I_2) \omega_y \omega_z \\ (I_1 - I_3) \omega_x \omega_z \\ (I_2 - I_1) \omega_x \omega_y \end{bmatrix} \quad (12)$$

اگر نرم اینرسی به فرم (۱۳) در روابط محسوب شود به این ترتیب انرژی شتاب S_{int} از نرم شتاب \dot{v}_{int} از رابطه (۸) حاصل می‌شود.

$$D_\omega = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

حداکثر توانایی ربات در ایجاد سطح انرژی شتاب مقدار $\|S\|$ است و عدم پایداری به این معنی است که ربات قادر نیست با حداکثر سطح انرژی، اختلال ایجاد شده را مهار کند. حال با استفاده از نسبت انرژی شتاب در حرکت به وضعیت ماند، معیار پایداری بهبود یافته بدون بعد مطرح می‌شود:

$$RM = \frac{\|S\|}{\|S_{int}\|} \quad (14)$$

بر اساس این معیار پایداری، اگر نرم انرژی شتاب در اختلال

با توجه به دینامیک حرکت، سرعت‌های زاویه‌ای در دو دستگاه مختصات $\{B\}$ و $\{E\}$ نسبت به هم بیان می‌شوند:

$$[\omega]_{\{E\}} = P [\omega]_{\{B\}} \quad (3)$$

و ماتریس P به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \cos \theta_y \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

گشتاورهای مفاصل، عامل ایجاد نیروی کشش T در بازوان کابلی هستند. با استفاده از اصل کار مجازی، رابطه بین نیروهای مفاصل و بردار نیرو-گشتاور نقطه انتهایی را می‌توان مطابق رابطه (۵) ثابت کرد. از طرفی برقراری تعادل در حوزه نیروهای عملگر نهایی، لزوم تساوی بین رنج‌های اعمال شده از طرف ربات F_e و رنج‌های خارجی وارده به ربات F_{env} را ایجاد می‌کند.

$$J^T T = F_e, \quad F_e = -F_{env} \quad (5)$$

معادله حرکت بر اساس رابطه نیوتن اوایلر قابل بیان است:

$$\begin{bmatrix} D_v \dot{v} \\ D_\omega \dot{\omega} + \omega \times D_\omega \omega \end{bmatrix}_{\{E\}} = -J^T T \quad (6)$$

ماتریس $D \in \mathbb{R}^{n \times n}$ $D = [D_v \quad D_\omega]$ برای عملگر نهایی متشکل از جرم D_v و ممان اینرسی D_ω است. رابطه دینامیکی صفحه متحرک به فرم کلی (۷) نوشته می‌شود.

$$D \dot{v} + C(v) + G = -\tilde{J}^T T \quad (7)$$

۴- معیار پایداری

در این قسمت معیار پایداری در برابر اختلالات برای ربات کابلی مطرح می‌شود و معیار بهبود یافته به عنوان نوآوری این مقاله با معیار مطرح شده R در [۱۷] مقایسه می‌شود.

۴-۱- انرژی شتاب

تابع گوس با نرم انرژی به صورت اسکالر بکار گرفته شده است. بر مبنای روابط گیبس-اپل، انرژی شتاب S تعریف می‌شود [۱۹].

$$S = \frac{1}{2} \dot{v}^T D \dot{v} \quad (8)$$

بردار شتاب به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود.

$$\dot{v} = -D^{-1} \left(J^T T + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \times D_\omega \omega \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$

در معیار پیشین جمله‌های غیرخطی وابسته به سرعت به دلیل حالت سکون اولیه حذف شده‌اند و تحلیل استاتیکی صورت گرفته است [۱۷].

در معیار بهبود یافته RM از مدل دینامیکی کامل بهره گرفته شده و شتاب اولیه نیز بر همین اساس قابل محاسبه است. تعریف معیار پایداری بهبود یافته در این مقاله با جابجایی‌های کوچک عملگر نهایی حتی با داشتن مقادیر سرعت و شتاب زاویه‌ای معتبر است. این امکان، تحلیل پایداری را نسبت به حالت پیشین که از مدل دینامیک کامل بهره نمی‌برد، متمایز می‌سازد.

۴-۵- اعتبارسنجی معیار پیشنهاد شده

معیار پیشنهادی RM با در نظر گرفتن مدل دینامیکی کامل‌تر بر پایه استراتژی جامع‌تر، در این مقاله نیازمند اعتبارسنجی است. پر واضح است که با حذف بهبودهای در نظر گرفته شده نسبت به معیار پیشین، بایستی به نتایج یکسانی در مقایسه R با RM دست یافت.

در نظر گرفتن کشش صفر برای کابل‌ها در انرژی شتاب اولیه و حذف ترم‌های غیرخطی مدل دینامیکی، معیار بهبود یافته RM را دقیقاً برابر معیار R مطرح شده در [۱۷] نمایش می‌دهد.

۵- شبیه‌سازی

در این بخش ابتدا مشخصات ربات کابلی آورده شده و سپس دو شبیه‌سازی تشریح می‌شود. مطابق با شکل ۲ نحوه‌اتصال شش کابل از صفحه پایه به متحرک نشان داده شده است. صفحات پایه و عملگر نهایی به صورت مثلث متساوی الاضلاع طراحی شده است. ضلع صفحه پایه ربات برابر $0/95m$ و ضلع صفحه متحرک برابر $0/3m$ است. محل دقیق اتصال کابل‌ها به صفحه متحرک پایینی، رئوس مثلث است. دو دستگاه مختصات بر روی هر کدام از این صفحات و منطبق بر مرکز سطح آنها در نظر گرفته شده است. مرکز سطح با فرض همگن بودن سطوح، منطبق بر مرکز جرم است.

با هدف جابجایی مواد و قطعات با استفاده از ربات، بار روی صفحه متحرک عملگر نهایی قرار می‌گیرد. جرم کل بار و صفحه حامل متحرک برابر 12 kg است در حالی که صفحه حامل بار به تنهایی جرمی برابر با 3 kg دارد.

ایجاد شده در سیستم، دارای حداکثر مقدار کمتر از $\|S_{int}\|$ باشد عملگر نهایی می‌تواند آنرا تحمل کند. در غیر این صورت پایداری از بین می‌رود. معیار پایداری مبین آن است که ربات در طول مسیر حرکت خود تا چه حد در برابر اختلالات مقاوم است. معیار می‌تواند مقادیری بین ۰ و ۱ داشته باشد، که ۱ متناظر با وضعیت بیشترین پایداری در برابر اختلالات و صفر متناظر با کمترین پایداری است.

معیار علاوه بر موقعیت سینماتیکی تابع پارامتر سینماتیکی حداقل کشش کابل‌ها در ابتدای حرکت نیز بوده و بنابراین محدوده مجاز کشش کابل‌ها می‌تواند در محاسبه این معیار دخالت کند.

۴-۳- معیار برای ربات‌های کابلی غیرمعلق

در معیار پایداری R ، هدف بیان این مسأله است که اگر به متحرک نهایی ربات مورد نظر اغتشاش خارجی وارد شود، برای در کشش باقی ماندن کابل‌ها، نسبت نیروی اغتشاش به وزن چه میزان می‌تواند باشد (به پیوست رابطه (الف-۳) مراجعه شود). از این روی در این معیار، شتاب گرانش به عنوان تنها شتاب اعمالی روی عملگر نهایی در حالت ابتدایی مطرح است. اگر ربات مقید ناقص، معلق در نظر گرفته نشود، برای محاسبه معیار بایستی سطوح دقیق‌تری از شتاب‌های اولیه اعمال شود.

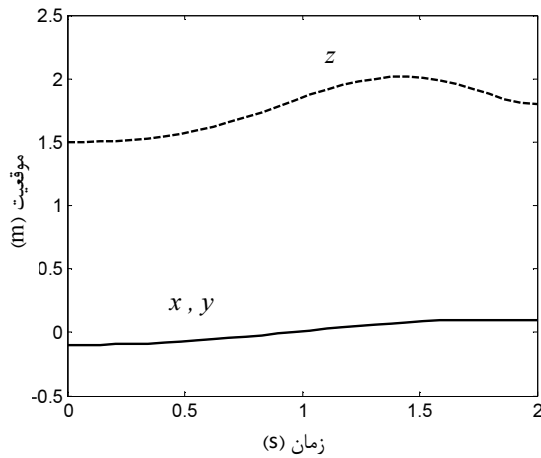
معیار مطرح شده در این مقاله می‌تواند این نقص را در حوزه ربات‌های غیرمعلق برطرف نماید. این امر را می‌توان با در نظر گرفتن تأثیر پیش کشش کابل‌ها روی انرژی شتاب در معیار محاسبه کرد.

۴-۴- معیار با اعمال مدل کامل دینامیک حرکت

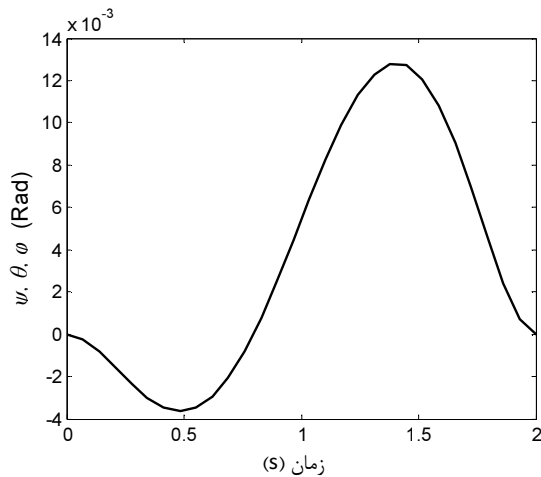
در معیار R برای کاهش پیچیدگی مدل‌سازی، فرض شده که سرعت زاویه‌ای اولیه به اندازه ای کوچک باشد که با برقراری $\|D_{\omega}\dot{\omega}\| \ll \|\omega \times D_{\omega}\omega\|$ از ترم‌های غیرخطی شامل شتاب‌های کوریولیس، جانب به مرکز چشم‌پوشی شود. در این راستا، استفاده از تقریب خطی در تحلیل پایداری به مسائلی محدود می‌شود که اختلال سرعت‌های دورانی ناچیز ایجاد می‌کند. بنابراین معادله حرکت به طور تقریبی قابل ارائه است.

$$\begin{pmatrix} \bar{F} \\ \bar{M} \end{pmatrix} \approx D \begin{pmatrix} \bar{a} \\ \bar{\alpha} \end{pmatrix} \quad (15)$$

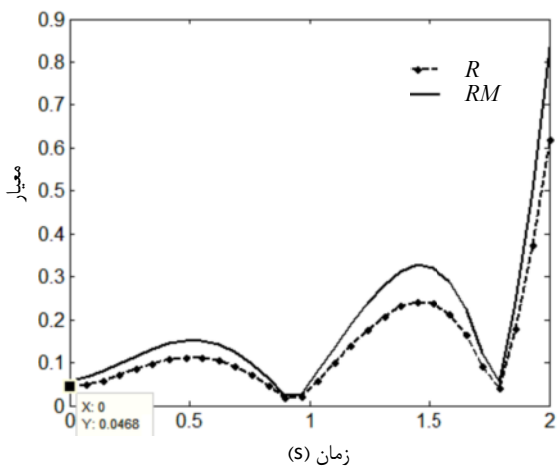
معیار بهبود یافته RM نسبت به معیار R افزایش یافته است.



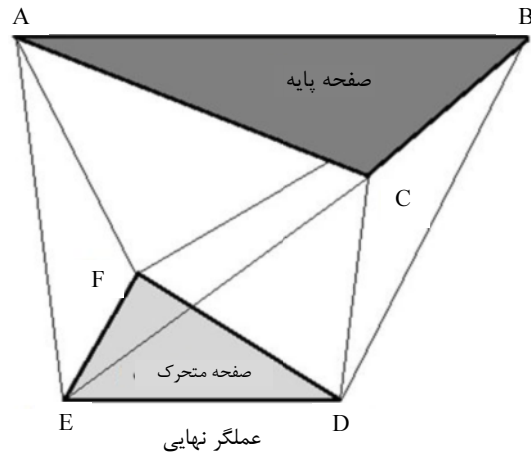
شکل ۳ موقعیت مسیر حرکت (x_m, y_m, z_m)



شکل ۴ زوایای چرخش مسیر حرکت (ψ, θ, ϕ)



شکل ۵ معیارهای پایداری RM , R روی مسیر حرکت



شکل ۲ مدل ربات کابلی شش درجه آزادی و نحوه اتصال کابل‌ها

نیروهای پیش کششی که بی‌تردید در هنگام راه اندازی سیستم بایستی در نظر گرفته و محاسبه شوند، در معیار پایداری پیشنهادی لحاظ می‌شوند. نیروهای پیش کشش در کابل‌ها در جهت تکمیل و بهبود معیار پایداری در این شبیه‌سازیها، پیاده‌سازی شده است.

توزیع نیروی پیش کشش به صورت یکسانی روی کابل‌ها صورت نمی‌گیرد، بلکه به موقعیت شروع حرکت و وضعیت استاتیک ربات بستگی دارد. حرکت بین دو وضعیت عملگر نهایی در ابتدا X_0 و انتها X_f طراحی می‌شود که در هر دو نقطه مرزی سرعت عملگر نهایی برابر صفر است.

$$X_0 = (-0.1, -0.1, 1.5, 0, 0, 0)$$

$$X_f = (0.1, 0.1, 1.8, 0, 0, 0)$$

$$T_0 = [4.367, 7.253, 3.034, 2.22, 7.967, 5.896] \quad (16)$$

۵-۱- شبیه‌سازی اول:

حرکت ربات در این شبیه‌سازی با در نظر گرفتن شرایط نقاط ابتدا و انتهای مسیر مطابق (۱۶)، طرح‌ریزی شده است. موقعیت و زوایای عملگر نهایی X مطابق با شکل‌های ۳ و ۴ در طول زمان ۲ ثانیه پیشنهاد می‌شود.

معیار پایداری معرفی شده در [۱۷] با ارجاع به فرمولاسیون اشاره شده در پیوست و مرجع مذکور محاسبه می‌شود. مقدار معیار برای نقطه ابتدایی در زمان $t=0$ در پیوست محاسبه شده است. ارائه محاسبات تنها به منظور نشان دادن صحت عملکرد معیار پیشنهاد شده در این مقاله است.

در شکل ۵ دو معیار پایداری برای مقایسه، گزارش شده‌اند. طبق رابطه (۱۴) و با در نظر گرفتن پیش کشش کابل‌ها، مقدار

۵-۲- شبیه‌سازی دوم

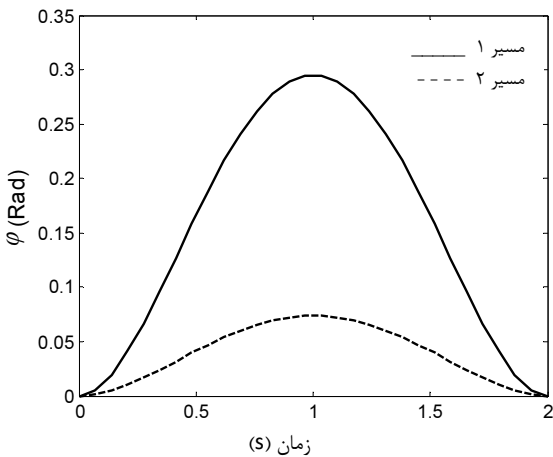
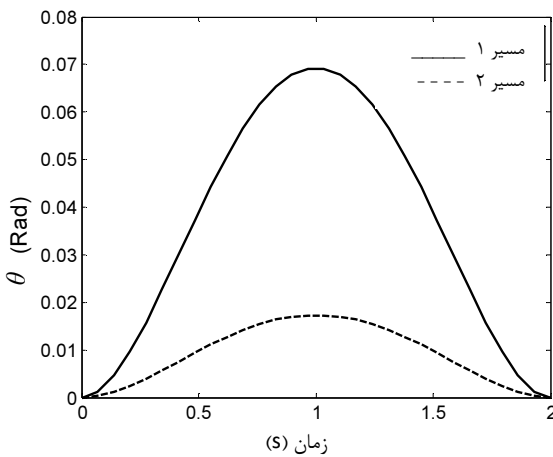
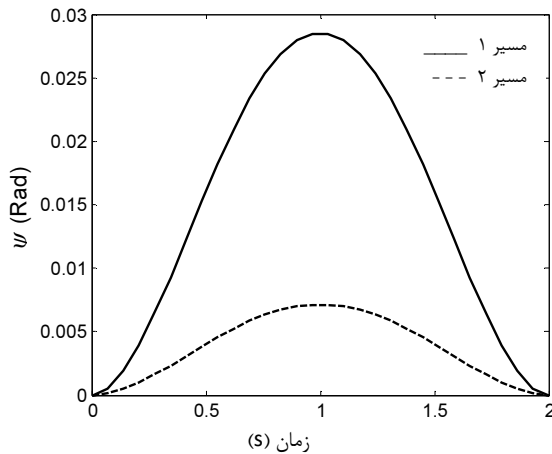
برای مقایسه دو معیار پایداری، در این شبیه‌سازی شرایطی ایجاد می‌شود که معیارها عملکرد متفاوتی را نشان دهند. این مسأله با این هدف مطرح شده و دو مسیر برای حرکت ربات طراحی شده است. این در حالی است که مشخصات نقاط ابتدا و انتهای مسیر همانند شبیه‌سازی اول است.

موقعیت عملگر نهایی در طول حرکت مطابق شکل ۶ برای هر دو مسیر تغییر می‌کند. وضعیت دورانه‌های صفحه متحرک شده است (شکل ۷). با بررسی شکل‌های ۴ و ۷ می‌توان دریافت که در مقایسه با شبیه‌سازی اول، هر دو مسیر این شبیه‌سازی دارای تغییرات زوایای چرخش بزرگ‌تری هستند. مسیر شماره یک (Traj. 1)، تغییرات قابل ملاحظه‌ای، نزدیک ۲۰ برابر در زوایای چرخش عملگر نهایی و بار حامل ایجاد می‌کند.

در شکل ۸ مشاهده می‌شود که مشابه شبیه‌سازی اول معیار بهبود یافته، مقادیر بزرگ‌تری را نسبت به معیار R روی مسیرها نشان می‌دهد. تنها در ناحیه انتهای بازه حرکتی مسیر شماره یک، خلاف این رویه اتفاق افتاده است.

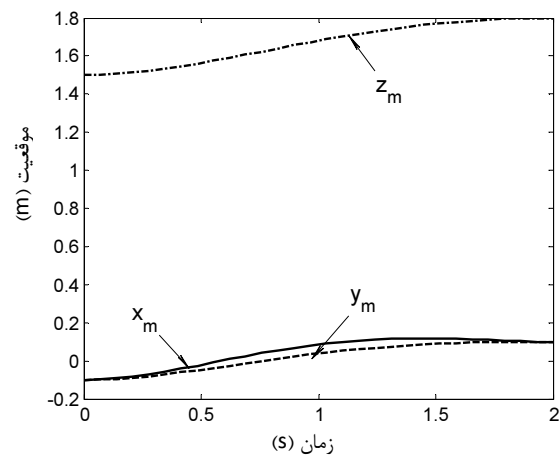
موقعیت و زوایای عملگر نهایی ربات، به اندازه و جهت نیروهای وارده از سوی کابل‌ها بستگی دارد. این موقعیت می‌تواند تحت تأثیر اختلال‌های خارجی قرار بگیرد.

قابلیت ربات برای رسیدن به یک تعادل پایدار در حالی که تمام نیروهای کابل‌ها مثبت هستند، مقاومت ربات را در برابر اختلالات تضمین می‌کند.



شکل ۷ زوایای چرخش حرکت (ψ, θ, ϕ) هر دو مسیر (Traj. 1 & Traj. 2)

با پیاده‌سازی رابطه (۷) مقادیر نیروهای داخلی کابل‌ها در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب برای مسیرهای شماره یک و دو حاصل شده است.



شکل ۶ موقعیت حرکت (x_m, y_m, z_m) برای هر دو مسیر (Traj. 1 & Traj. 2)

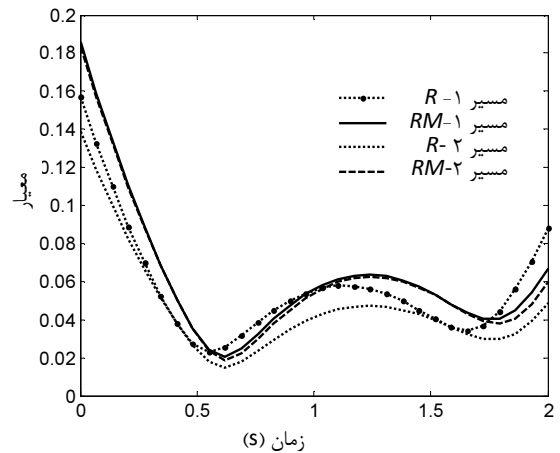
است که قابلیت تغییر زوایای چرخش بزرگتری را برای صفحه متحرک حامل بار ایجاد می‌کند. بنابراین مسیر شماره یک توانایی بیشتری برای مقاوم بودن در برابر اختلالات از خود نشان خواهد داد.

در ناحیه‌ای از بازه حرکتی مسیر شماره یک معیار R نسبت به معیار بهبود یافته دارای مقادیر بزرگتری است. دلیل را بایستی با ملاحظه پارامترهای سینماتیکی و سینیتیکی مؤثر در تعیین معیار پایداری جستجو کرد. بعد از تشریح مشخصات سینماتیکی حرکت در شکل‌های ۶ و ۷، مقادیر نیروهای کشش کابل‌ها در این ناحیه بررسی می‌شود. در انتهای بازه حرکتی مسیر شماره یک، میزان نیروی کابل‌های ششم و دوم به شدت کاهش یافته و به مرز از دست رفتن کشش می‌رسند و این در حالی است که افت کشش در کابل‌ها در معیار R لحاظ نشده است. این مسیر به همین دلیل، انتخاب مناسبی برای طراحی مسیر حرکت ربات نیست و این دلیل افت معیار بهبود یافته در ناحیه مزبور است.

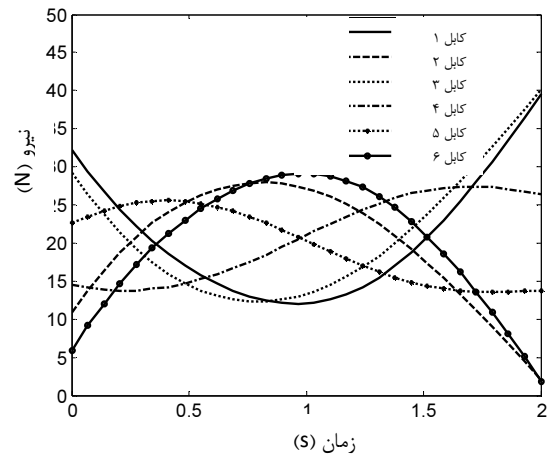
۶- نتیجه‌گیری

این مقاله معیاری برای سنجش پایداری ربات معرفی می‌کند که می‌تواند ملاکی برای ارزشیابی توانایی ربات برای بازگشت به حالت تعادل اولیه اش تحت تأثیر اختلالات خارجی باشد. معیار پیشنهاد شده RM با در نظر گرفتن سطح نیروی کابل‌ها به صورت هم‌زمان با انرژی شتاب، برگرفته از مشخصات سینواستاتیکی است و به عنوان نمونه دیدگاه جامع‌تری را نسبت به معیارهای قبلی ارائه می‌دهد. از روابط گیبس اپل و مفهوم انرژی شتاب بر اساس سینماتیک ربات و معادلات نیوتن-اولر، برای تعریف معیار بهره گرفته شده است. معیار بهبود یافته علاوه بر در نظر گرفتن اثرات دینامیکی اختلال، قادر است در مکانیزم‌هایی به غیر از معلق مقید ناقص نیز سنجیده شود.

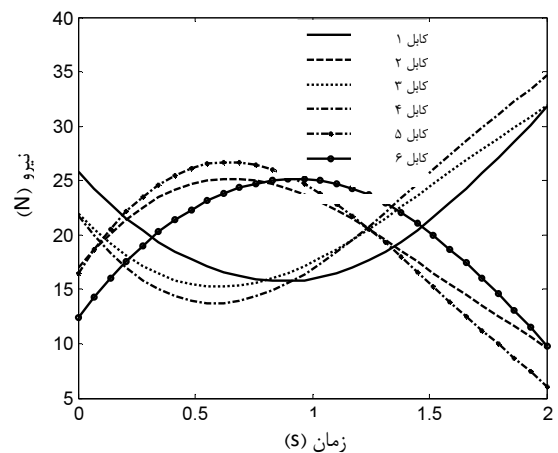
ربات کابلی دارای شش درجه آزادی با شش کابل شبیه‌سازی شده است. ربات باری به جرم ۱۲ کیلوگرم را حمل می‌کند. نیروی پیش کشش ناشی از تحمل وزن صفحه متحرک بدون بار، به عنوان پیش کشش در کابل‌ها لحاظ شده است. تحلیل و نتیجه‌گیری در قالب دو شبیه‌سازی ارائه شده‌اند. انرژی شتاب در مسیری که تغییرات وسیع‌تری برای زوایای



شکل ۸ مقایسه معیارهای پایداری در دو مسیر



شکل ۹ نیروی کابل‌ها در مسیر شماره یک



شکل ۱۰ نیروی کابل‌ها در مسیر شماره دو

تغییرات زوایای چرخش مسیر شماره یک بزرگتر هستند و تأمین آن، نیازمند سطوح بالاتر کشش کابل‌ها نسبت به مسیر شماره دو (Traj. 2) است. توزیع کشش کابل‌ها به گونه‌ای

$$\begin{aligned}
 \mathcal{S}_4^w &= \begin{bmatrix} -0.1425 \\ 0 \\ 0 \\ 0.1463 \\ 0.139 \\ -0.1406 \end{bmatrix}, \mathcal{S}_5^w = \begin{bmatrix} 0.0823 \\ -0.161 \\ -0.168 \\ 0.0845 \\ 0.0802 \\ 0.0812 \end{bmatrix}, \mathcal{S}_6^w = \begin{bmatrix} 0.0475 \\ -0.0615 \\ 0.0415 \\ -0.0376 \\ 0.0604 \\ -0.0548 \end{bmatrix} \\
 \hat{f}_1 &= \begin{bmatrix} 0.1634 \\ -0.266 \\ 0.9500 \\ -0.6371 \\ 0.3678 \\ 0.1506 \end{bmatrix}, \hat{f}_2 = \begin{bmatrix} -0.0012 \\ -0.3552 \\ 0.9348 \\ 0 \\ -0.7239 \\ -0.1949 \end{bmatrix}, \hat{f}_3 = \begin{bmatrix} -0.0012 \\ 0.2395 \\ 0.970 \\ 0 \\ -0.7518 \\ 0.1314 \end{bmatrix} \\
 \hat{f}_4 &= \begin{bmatrix} 0.1677 \\ 0.1431 \\ 0.9754 \\ 0.6541 \\ 0.3777 \\ -0.1189 \end{bmatrix}, \hat{f}_5 = \begin{bmatrix} -0.3434 \\ -0.1544 \\ 0.9264 \\ 0.6213 \\ 0.3587 \\ 0.2055 \end{bmatrix}, \hat{f}_6 = \begin{bmatrix} -0.3474 \\ 0.0312 \\ 0.9372 \\ -0.6285 \\ 0.3629 \\ -0.1736 \end{bmatrix} \\
 \hat{u}_{1,2,3,4,5} &= \begin{bmatrix} 0.6124 \\ -0.3535 \\ -0.0935 \\ 0.2472 \\ -0.1217 \\ 0.6445 \end{bmatrix}, \hat{u}_{1,2,3,4,6} = \begin{bmatrix} -0.6178 \\ -0.3567 \\ 0.0468 \\ 0.2494 \\ 0.0614 \\ 0.6503 \end{bmatrix} \\
 \hat{u}_{1,2,3,5,6} &= \begin{bmatrix} -0.5952 \\ -0.3436 \\ -0.1703 \\ -0.2414 \\ -0.2189 \\ 0.6264 \end{bmatrix}, \hat{u}_{1,2,4,5,6} = \begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.6905 \\ 0.1542 \\ -0.0881 \\ -0.3091 \\ 0.6294 \end{bmatrix} \\
 \hat{u}_{1,3,4,5,6} &= \begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.7096 \\ -0.0639 \\ -0.0905 \\ 0.2566 \\ 0.6468 \end{bmatrix}, \hat{u}_{2,3,4,5,6} = \begin{bmatrix} 0.6062 \\ -0.350 \\ 0.1267 \\ -0.2458 \\ 0.1627 \\ 0.638 \end{bmatrix} \\
 \|\hat{f}_{1,2,3,4,5\min}\| &= \frac{(\hat{f}_1 \times \hat{f}_2 \times \hat{f}_3 \times \hat{f}_4 \times \hat{f}_5) \hat{f}_{\text{gravity}}}{(\hat{f}_1 \times \hat{f}_2 \times \hat{f}_3 \times \hat{f}_4 \times \hat{f}_5) \hat{u}_{1,2,3,4,5}} \\
 &= 10.7159\text{N}
 \end{aligned}$$

چرخش عملگر نهایی ایجاد می‌کند، بالاتر است. این امر منجر به افزایش مقدار معیار می‌شود. کشش نامطلوب کابل‌ها در این مسیر با پایداری مناسب، نتیجه‌ای ارائه می‌دهد که با تخمین مثبت معیار پایداری R برای این مسیر هم‌خوانی ندارد. این تخمین بیش از حد خوش‌بینانه در معیار بهبود یافته RM بر اساس استراتژی انتخاب معیار، تعدیل شده است. معیار پایداری بهبود یافته مقدار کوچک‌تری را بنا به وضعیت نامناسب کشش کابل‌ها محاسبه می‌کند. این در حالی است که معیار R نسبت به وضعیت نیروهای داخلی کابل‌ها حساسیتی از خود نشان نمی‌دهد.

۷- پیوست

در این قسمت با استناد به [۱۷]، روابط صرفاً به منظور محاسبه آورده شده‌اند. این روابط بر اساس نگاشت نیرو و ممان‌ها در فضای میانی پیشنهاد شده است.

ماتریس ژاکوبین J بر مبنای رنج‌های اعمال شده بیان شده است:

$$J = [\mathcal{S}_1^w \quad \mathcal{S}_2^w \quad \mathcal{S}_3^w \quad \mathcal{S}_4^w \quad \mathcal{S}_5^w \quad \mathcal{S}_6^w]^T \quad (\text{الف-۱})$$

اندازه رنجی که موجب شروع اختلالات عملگر نهایی می‌شود عبارت است از:

$$\|\hat{f}\| = \sqrt{m \mathcal{S}^T M^{-1} \mathcal{S}^w} \quad (\text{الف-۲})$$

m جرم صفحه متحرک و M ماتریس اینرسی در فضای میانی معرفی شده است. مقدار $\|\hat{f}\|$ با ضریب وزن عملگر نهایی نرمال شده است و معیار پایداری را تبیین می‌کند:

$$R = \frac{1}{mg} \min \|\hat{f}\| \quad (\text{الف-۳})$$

بردار واحد $\hat{u}_{i,j,k,l,m}$ عمود بر \hat{f}_i و \hat{f}_j و \hat{f}_k و \hat{f}_l و \hat{f}_m تعریف می‌شوند. داده‌های شبیه‌سازی اول در بخش ۵-۱ در روابط اعمال می‌شود:

$$\mathcal{S}_1^w = \begin{bmatrix} 0.1634 \\ -0.0012 \\ -0.0012 \\ 0.1677 \\ -0.3434 \\ -0.3434 \end{bmatrix}, \mathcal{S}_2^w = \begin{bmatrix} -0.2660 \\ -0.3552 \\ 0.2395 \\ 0.1431 \\ -0.1544 \\ 0.0312 \end{bmatrix}, \mathcal{S}_3^w = \begin{bmatrix} 0.95 \\ 0.9348 \\ 0.9709 \\ 0.9754 \\ 0.9264 \\ 0.9372 \end{bmatrix}$$

the feed-supporting system of a next generation large radio telescope”, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 18, No. 11, 2001, pp. 633-643.

- [8] Lambert C., Nahon M., Chalmers D., “Implementation of an aerostat positioning system with cable control. Mechatronics”, *IEEE/ASME Transactions*, Vol. 12, No.1, 2007, pp. 32-40.
- [9] YANG L.I., “Stability and 3-D spatial dynamics analysis of a three cable crane”, in *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Dallas, TX*, 1992, pp. 2069-2076.
- [10] Voglewede P., Ebert-Uphoff I., “On the connections between cable-driven robots, parallel robots and grasping”, in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Vol. 5, 2004, pp. 4521-4526.
- [11] Lee Y.T., Choi H.R., Chung W.K., “Stiffness control of a coupled tendon-driven robot hand”, *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 14, No. 5, 1994, pp. 10-19.
- [12] Howard W.S., Kumar V., “On the stability of grasped objects”, *Robotics and Automation, IEEE Transactions*, Vol. 12, No. 6, 1996, pp. 904-917.
- [13] Liu X., Qiu, Y.Y., Sheng, Y., “Stiffness enhancement and motion control of a 6-DOF wire-driven parallel manipulator with redundant actuators for wind tunnels”, *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, Vol. 30, No. 6, 2009, pp.1156-1164.
- [14] Park J., Chung W.K., Moon W., “Wire-suspended dynamical system: Stability analysis by tension closure”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 3, 2005, pp. 298-308.
- [15] Behzadipour S., Khajepour A., “Stiffness of cable-based parallel manipulators with application to stability analysis”, *J. of Mechanical Design*, Vol. 128, 2006, pp. 303-311.
- [16] Carricato M. Merlet J.P., “Stability Analysis of Underconstrained Cable-Driven Parallel Robots”, *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, pp. 1-9.
- [17] Bosscher P., Ebert-Uphoff I., “Disturbance robustness measures for underconstrained cable-driven robots”, in *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2006, pp. 4206-4212.
- [18] Alp A.B., Agrawal S.K., “Cable-suspended robots: Design, planning and control”, in *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2002, pp. 4275-4280.
- [19] Korayem M.H., Shafei A. M., "Application of recursive Gibbs-Appell formulation in deriving the motion equation of revolute-prismatic joints", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 1-10, 2012. (In Persian)
- [20] Korayem M.H., Bamdad M., Tourajizadeh, H., Shafiee, H., Zehtab, R. M., Iranpour, A., “Development of ICASBOT: A Cable-Suspended Robot’s with Six DOF”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2011, pp. 1-19.

$$\|\hat{f}_{1,2,3,4,6\min}\| = \frac{(\hat{f}_1 \times \hat{f}_2 \times \hat{f}_3 \times \hat{f}_4 \times \hat{f}_6) \hat{f}_{\text{gravity}}}{(\hat{f}_1 \times \hat{f}_2 \times \hat{f}_3 \times \hat{f}_4 \times \hat{f}_6) \hat{u}_{1,2,3,4,6}} = 5.3624N$$

$$\|\hat{f}_{1,2,3,5,6\min}\| = \frac{(\hat{f}_1 \times \hat{f}_2 \times \hat{f}_3 \times \hat{f}_5 \times \hat{f}_6) \hat{f}_{\text{gravity}}}{(\hat{f}_1 \times \hat{f}_2 \times \hat{f}_3 \times \hat{f}_5 \times \hat{f}_6) \hat{u}_{1,2,3,5,6}} = 19.5095N$$

$$\|\hat{f}_{1,2,4,5,6\min}\| = \frac{(\hat{f}_1 \times \hat{f}_2 \times \hat{f}_4 \times \hat{f}_5 \times \hat{f}_6) \hat{f}_{\text{gravity}}}{(\hat{f}_1 \times \hat{f}_2 \times \hat{f}_4 \times \hat{f}_5 \times \hat{f}_6) \hat{u}_{1,2,4,5,6}} = 17.6699N$$

$$\|\hat{f}_{1,3,4,5,6\min}\| = \frac{(\hat{f}_1 \times \hat{f}_3 \times \hat{f}_4 \times \hat{f}_5 \times \hat{f}_6) \hat{f}_{\text{gravity}}}{(\hat{f}_1 \times \hat{f}_3 \times \hat{f}_4 \times \hat{f}_5 \times \hat{f}_6) \hat{u}_{1,3,4,5,6}} = 7.3178N$$

$$\|\hat{f}_{2,3,4,5,6\min}\| = \frac{(\hat{f}_2 \times \hat{f}_3 \times \hat{f}_4 \times \hat{f}_5 \times \hat{f}_6) \hat{f}_{\text{gravity}}}{(\hat{f}_2 \times \hat{f}_3 \times \hat{f}_4 \times \hat{f}_5 \times \hat{f}_6) \hat{u}_{2,3,4,5,6}} = 14.5225N$$

کوچکترین اختلال نیرو و ممان 73.304N است. با اعمال در رابطه (الف-۳) معیار پایداری حاصل می‌شود:

$$R_s = \frac{\|\hat{f}_{1,2,3,4,5\min}\|}{mg} = \frac{5.362N}{114.58N} = 0.0468$$

۸- مراجع

- [1] Merlet J.P., *Parallel Robots*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 2000.
- [2] Korayem M.H., Bamdad M., “Dynamic Load Carrying Capacity of Cable-Suspended Parallel Manipulators”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 44, 2009, pp. 829-840.
- [3] Roberts R.G., Graham T., Lippitt T., “On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots”, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 15, No. 10, 1998, pp. 581-597.
- [4] Kawamura S., Choe W., Tanaka S., Pandian S., “Development of an ultrahigh speed robot falcon using wire drive system”, in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Nagoya, Japan, Vol. 1, 1995, pp. 215-220.
- [5] Maeda K., Tadokoro S., Takamori T., “On design of a redundant wire-driven parallel robot warp manipulator”, in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Detroit, 1999, pp. 895-900.
- [6] Albus J., Bostelman R., Dagalakakis N., “The NIST robocrane”, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, No. 5, 1993, pp. 709-724.
- [7] Su Y.X., Duan B.Y., Nan R.D., Peng B., “Development of a large parallel-cable manipulator for