



کاربرد آنالیز مودال در کاهش ارتعاشات و بهینه‌سازی کنترل حرکت ربات استوارت

یاسر یوسف نژادیان¹، علی اکبر عظمتی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکترونیک، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران

2- استادیار، گروه مهندسی مکترونیک، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران

* آبادان، صندوق پستی 6317836531، a.azemati@iauabadan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 تیر 1399

داوری اولیه: 2 شهریور 1399

پذیرش: 25 شهریور 1399

کلیدواژگان:

ربات استوارت

کنترل حرکتی

کاهش ارتعاشات

آنالیز مودال

چکیده

ربات استوارت در دسته ربات‌های موازی قرار دارد که شامل دو سکوی بالایی و پایینی می‌باشد که این دو سکو توسط 6 بازو و به وسیله‌ی مفاصل کروی به یکدیگر متصل شده‌اند. این ربات کاربرد گسترده‌ای در شبیه‌سازهای فضایی و پرواز دارد و با توجه به حساس بودن نتایج خروجی آن به کنترلر ضروری بود خطاها و نویز مسیر حرکتی ربات به حداقل می‌رسید. در این پژوهش به ارائه یک روش نوین برای کنترل ربات‌ها و همچنین مدلی جامع برای شناسایی رفتار ارتعاشی پرداخته شده است. بنابراین طبق این مدل می‌توان ارتعاش را به راحتی و بدون ایجاد مشکل کنترل نمود، پس از دست‌یابی به معادلات دینامیکی و کنترلی بازوهای ربات، از آنالیز مودال به منظور کنترل ارتعاشات ربات استفاده شد. نتایج حاصل از نظر بازوهای صلب و انعطاف پذیر در نقاط مختلف بازوی ربات مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی با فرض استفاده از مدل دینامیکی سیستم و انعطاف پذیر بودن حرکت بازوها و با بهره‌گیری از نرم‌افزار متلب انجام شد، این روش، نشان می‌دهد که، در ربات دارای اتصالات ارتعاشی به دلیل افزایش درجات آزادی، ارتعاشات نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه کنترل آن نیاز به صرف انرژی بیشتری نسبت به مدل اتصال صلب به منظور کنترل مکان ربات دارد همچنین میزان خطای مسیر حرکت ربات نسبت به مسیر مرجع کمتر از 15 سانتی‌متر بود که این امر ناشی از کاهش ارتعاشات ربات با استفاده از روش آنالیز مودال بود.

Application of Modal Analysis in Vibration Reduction and Optimization of Stewart Robot Motion Control

Yasser Yousefnejadian, Aliakbar Azemati*

Department of Mechatronic Engineering, Abadan Branch, Islamic Azad University, Abadan, Iran.

* P.O.B. 6317836531 Abadan, Iran, a.azemati@iauabadan.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 19 July 2020
First Decision: 23 August 2020
Accepted: 15 September 2020

Keywords:

Stewart Robot
Tracking Control
Vibration Reduction
Modal Analysis

Abstract

Stewart's robot falls into the category of parallel robots, consisting of two upper and lower platforms. The top platform, a moving platform and the bottom platform, are fixed, with the two arms connected by six spheres with spherical joints. In this study, we present a novel method for controlling robots as well as a comprehensive model for vibrational behavior detection. After achieving the dynamic and control equations of the robot arms, we performed a modal analysis to control the robot's position. We analyzed the results from two points of view of rigid and flexible arms in different parts of the robot arm using the aforementioned controller. Comparing the results, it can be said that in the robot model with elastic joints, due to the increase in degrees of freedom, the vibrations increase as well, thus controlling it requires more energy to control the robot's position than the rigid joint model. More energy, faster controller than rigid model. Also, by applying perturbations to the system, it was found that the performance of the controller was affected by disturbances to the system and the location error was increased. Finally, it can be stated that in a control system, determining the optimal coefficients in the relationships plays a major role in the performance of the controller.

1- مقدمه

انتقالی و چرخشی را دارد که بسته به شرایط بهره‌گیری از آن، می‌تواند حرکات دورانی و انتقالی مورد نظر را با دقت و سرعت قابل توجهی انجام دهد. این ربات (سکو) از زمان ابداع آن یعنی سال 1965 کاربردهای زیادی در صنایع مختلف داشته است که یکی از قدیمی‌ترین کاربردها، سیمولاتورهای پروازی می‌باشد. در این ربات، از عملگرهای هیدرولیکی یا پنوماتیکی که از دسته عملگرهای خطی به حساب می‌آیند، استفاده می‌گردد. به‌منظور

ربات استوارت¹ دارای دو سکو می‌باشد، سکوی بالایی متحرک و سکوی پایینی، ثابت است که این دو سکو توسط 6 بازو و به وسیله مفاصل کروی به یکدیگر متصل شده‌اند. این موضوع در شکل 1 نشان داده شده است. این ربات از طریق این بازوها، قابلیت سه نوع حرکت دورانی،

¹ Stewart

تیسینگ یک کنترل کننده مقاوم را به منظور کنترل ردیابی دقیق یک ربات استوارت دارای شش درجه آزادی با قابلیت حذف اغتشاش در فضای لینکی را معرفی نمودند. در این مدل کنترلی، با توجه به وجود اغتشاش، نویز اندازه‌گیری، اصطکاک‌های غیرخطی مدل نشده و در نتیجه تخریب دقت ردیابی سیستم، یک مشتق‌گیر غیرخطی در مسیر پیشرو، و یک مشاهده‌گر حالت تعمیم‌یافته در مسیر برگشتی، و همچنین یک کنترل کننده مشتقی برای کنترل کردن حرکت یک بازوی مکانیکی موازی دارای شش درجه آزادی، معرفی شد [4]. در مقاله نوایی و مرکزی در سال 2019، از یک الگوریتم کنترل فازی تطبیقی جهت ردیابی مسیر در بازوی مکانیکی سکوی استوارت، با هدف جبران تخریب عملکرد کنترل کننده و جبران انحراف مسیر به دلیل محدود بودن گشتاور محرک‌ها، پیشنهاد کردند. در این مقاله ابتدا، مدل‌سازی دینامیکی سیستم تثبیت موقعیت شش درجه آزادی، سپس دو سیستم فازی تک ورودی - تک خروجی و همچنین راهبرد کنترلی برحسب خطی‌سازی فیدبک بیان گردید [5].

در این پژوهش، ابتدا مدل دینامیکی یک ربات موازی شش درجه آزادی معروف به مکانیزم استوارت با بازوهای انعطاف پذیر استخراج می‌گردد. روش حل جسم صلب تنها می‌تواند برای مدل‌سازی اثر حرکت جسم صلب بر حرکت الاستیک مورد استفاده قرار بگیرد، درحالی‌که در مکانیزم مورد بررسی، حرکت جسم صلب مستقل از حرکت الاستیک می‌باشد. لذا، در این پژوهش با استفاده از روش یکطرفه، مکانیزم دارای بازوهای انعطاف پذیر مدل شده و روابط دینامیکی حاکم بر مسأله شامل اثرات کوپلینگ حرکت‌های الاستیک با حرکت جسم صلب استخراج خواهند شد. سپس شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی سیستم تعیین و محاسبه می‌گردند. سپس استحکام دینامیکی¹ سیستم تعیین می‌شود، فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات خمشی² سیستم بر حسب تابعی از نیروی اعمال شده محاسبه می‌گردند. در نهایت، با استفاده از روش کنترل ارتعاشات فعال³ بر اساس پاسخ آنالیز مودال به انتخاب کنترل افزایشنده⁴ برای مودهای بالا پرداخته می‌شود. برای این منظور، از سنسورها و عملگرهای پیزوالکتریک استفاده خواهد شد. از گذشته تاکنون، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه ربات‌های گاف استوارت و نحوه رفتار آنها مورد بررسی قرار گرفته است. این سکو بعلت داشتن ویژگی‌های

استفاده از عملگردهای دورانی نیز، از سروو موتورها برای حرکت سکوی استوارت استفاده می‌شود. با استفاده از این عملگرها، بازوهای دورانی ربات با بهره‌گیری از یک مفصل کروی به بازوی متحرک ربات متصل شده و به محض حرکت زاویه‌ای یا چرخشی آن، منجر به انتقال نیرو به بازوهای فوقانی و در نتیجه حرکت صفحه بالایی می‌شوند. نمایی از این ربات در شکل 1 نشان داده شده است.



Fig. 1 View of Stewart Robot (Platform) [1]

شکل 1 نمایی از یک ربات (سکو) استوارت [1]

سیروس‌پور و همکاران یک روش پسگام تطبیق شونده، به منظور توسعه یک کنترل کننده غیرخطی برای بازوی مکانیکی سکوی استوارت با در نظر گرفتن دینامیک‌های محرک هیدرولیک را به کار گرفتند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که این کنترل کننده دارای توانایی جبران عدم قطعیت‌های پارامتری سیستم همچون دینامیک‌های جسم صلب و دینامیک‌های محرک‌های هیدرولیک می‌باشد. در انتهای این مقاله عنوان شده است که به منظور بهبود نتایج بهتر است پارامترهای کنترلر لیاپانوف بهینه‌سازی گردد [1]. روی و همکاران از یک راهبرد کنترل مقاوم تطبیقی در مدل دینامیکی بازوی مکانیکی موازی دارای سه بازوی متحرک پنوماتیکی، با هدف رسیدن به کنترل ردیابی بهینه استفاده نمودند. در این مدل کنترل پیشنهادی، تأثیر ناشی از تغییر پارامترها، اغتشاش‌های نامعلوم، خطاهای مدل‌سازی در نیروهای استاتیک ماهیچه‌های پنوماتیک، و غیرخطی‌های نامعلوم متغیر با زمان در مفاصل پنوماتیک به طور قابل توجهی کاهش یافت. این مقاله بطور جامع بحث کنترل‌های دینامیکی، پنوماتیکی و الکتروپنوماتیکی ربات استوارت را مورد بررسی قرار داده و توانسته با استفاده از کنترل کننده ارائه شده، کنترل اغتشاش مناسب و کنترل موقعیت ربات را ارائه دهد. اما نکته قابل تامل در این مقاله، بررسی بازوهای سه درجه آزادی ربات استوارت بوده که بررسی بازوهای با 6 درجه آزادی، از نکاتی است که در این مقاله بدان پرداخته نشده است [3]. لو و

¹ Dynamic Stiffness

² Active Vibration Control Strategy

³ Modal Analysis Feedback

⁴ Control Gain

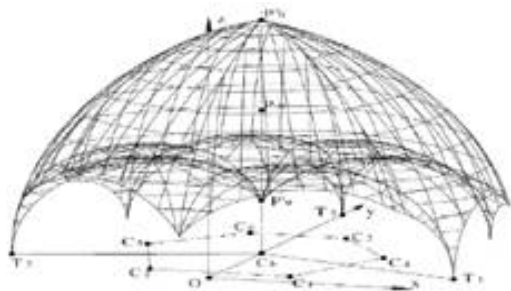


Fig. 3 The Overall 3D Workplace of the Stewart Robot [7]

شکل 3 فضای کاری کلی سه بعدی ربات استوارت [7]

3- مدل‌سازی

برای مدل‌سازی ربات استوارت با استفاده از روش نیوتن-اویلر، معادلات غیرخطی دینامیک ربات در فضای دکارتی محاسبه شده است. مختصات فضای دکارتی بردار q به صورت معادله (1) است [7]:

$$q = [t, \theta] \quad (1)$$

در این رابطه $t = [x, y, z]$ بردار انتقال سکوی متحرک و $\theta = [\varphi, \theta, \psi]$ زوایای اویلری مبدأ است. با توجه به شکل 4، بردار معرف هر بازو را می‌توان به صورت معادله (2) نوشت:

$$S_i = \mathfrak{R}_{pi} + t - b_i \quad (2)$$

در این رابطه S_i بردار یکه در جهت لینک i -ام، \mathfrak{R}_{pi} ماتریس دوران ربات، b_i بردار موقعیت i -امین بازو در صفحه زیرین می‌باشند.

برای حل سینماتیک مستقیم ربات، لازم است موقعیت دقیق ربات و همچنین جهت حرکت سکو با توجه به لینک‌ها محاسبه گردد، تجزیه و تحلیل دینامیکی سکو با در نظرگیری نیروها و تعادل هر بازو با توجه به شکل‌های 5 و 6 بصورت رابطه (3) است:

$$(Fs)_i = Q_i \ddot{t} - Q_i (\ddot{q}_p)_i a + V_i - F_i S_i \quad (3)$$

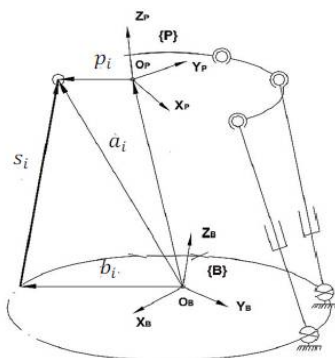


Fig. 4 Structure of Stewart Robot [8]

شکل 4 ساختار یک ربات استوارت [8]

مهمی نظیر شتاب و سرعت بالا، فضای کاری، هزینه ساخت کم، قابلیت حمل بار زیاد به نسبت وزن کم و ... کاربردهای فراوانی از جمله ابزار واسط لامسه‌ای، ربات‌های نجات‌بخش، بازتوان بخش، آموزش‌های ورزشی اشاره کرد [6]. در طرح کنترلی پیشنهاد شده در این مقاله، یک کنترل‌کننده تطبیقی با ترکیب کنترل‌کننده‌های مشتقی تناسبی، توسعه یافت که در آن، بهره کنترل‌کننده مشتقی تناسبی توسط قوانین تطبیق، تنظیم می‌شود. باتوجه به تحقیقات انجام شده، تاکنون استفاده از آنالیز مودال که روش نوینی به منظور کنترل ارتعاشات ربات استوارت، انجام نشده است. در این پژوهش به آن پرداخته خواهد شد و راهکار بهینه‌ای برای کنترل حرکت ربات در مسیر مرجع با استفاده از کنترل ارتعاشات با این روش ارائه و با روش‌های دیگر مقایسه خواهد شد.

2- ساختار ربات استوارت

ربات استوارت از پشت سرهم قرار گرفتن سه مفصل دورانی و یک لینک پریزماتیک ساخته شده است. ابعاد لینک‌ها به نحوی می‌باشد که حرکت مفاصل آن و بازوها تداخلی باهم نداشته باشند. ربات استوارت نسبت به ربات‌های کارتیزین مشابه، سریع‌تر و تمیزتر است. داشتن یک پایه و نصب آسان و بدون مانع و نیاز به فضای نصب کم از ویژگی‌های این ربات هستند. فضای کاری این ربات با توجه ساختار آن به سادگی به دست می‌آید. در شکل 2 نمونه‌ای از فضای کاری ربات از دید بالا می‌توان مشاهده نمود. همچنین اگر برای لینک پریزماتیک هم یک طول رفت و آمدی در نظر گرفته شود این فضا به فضای سه بعدی شکل 3 تبدیل می‌شود.

در این فضای کاری نقاط تکینگی وجود ندارد و تنها مکانهای انتهایی فضای کاری را می‌توان نقاط تکینگی دانست. حالات دیگر تکینگی در این ربات رخ نخواهد داد. با توجه به محدودیت‌های اتصالات دورانی می‌توان فضاهای کاری دیگری نیز برای این ربات متصور بود که با توجه به ترسیم این محدودیت‌ها این فضاهای کاری به دست می‌آیند.

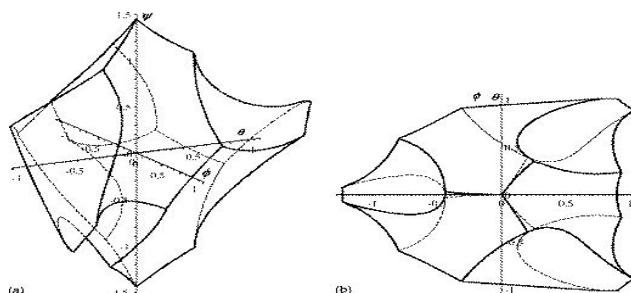


Fig. 2 Stewart Robot Workplace from the Top of the Robot [7]

شکل 2 فضای کاری ربات استوارت از بالای ربات [7]

درجات آزادی n اتصال است، توصیف گردد. اگر انرژی جنبشی با (KE) و انرژی پتانسیل با (PE) نشان داده شوند، می‌توان رابطه (6) را نوشت:

$$KE = \frac{1}{2\dot{q}^T M(q) \dot{q}}; PE = V(q) \quad (6)$$

در رابطه (6) بردار q بردار n ستونی از اتصالات است و $M(q)$ ماتریس $n \times n$ اینرسی و $V(q)$ نشان‌دهنده انرژی پتانسیل ناشی از گرانش است. با جایگزینی روابط (6) در معادلات اوایلر-لاگرانژ مدل دینامیکی سیستم به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = u \quad (7)$$

$C(q, \dot{q})\dot{q}$ نشان دهنده کریولیس و نیروهای تعمیم یافته گریز از مرکز است، $g(q)$ نشان‌دهنده نیروهای گرانشی تعمیم یافته و u نشان‌دهنده نیروهای تعمیم یافته ورودی از محرک‌ها می‌باشد. به‌طور متداول $M(q)$ ماتریس اینرسی در رابطه (7) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$M(q) = D(q) + J \quad (8)$$

در رابطه (8)، $D(q)$ نشان دهنده اینرسی از n لینک صلب و J ماتریس قطری ثابتی است که نشان‌دهنده اینرسی محرک‌ها می‌باشد. به‌عنوان مثال J برای ربات‌هایی که محرک آنها الکتریکی است، نشان‌دهنده اینرسی دورانی حول محور دوران است در حالیکه از اثر حرکت لینک بر روی محرک صرف‌نظر شده است. حرکت لینک ممکن است، مسیر محور مورد نظر را تغییر دهد و این به معنی آن است که کوپلینگ ژیرسکوپی بین محرک‌ها و اتصالات در روابط مدل بالا صرف‌نظر شده است. بنابراین در گزارش‌های فنی مدل‌های مربوط به اتصالات انعطاف‌پذیر بسیار مهم است. معادلات حرکت به‌طور متناسبی از مجموعه‌ای از پارامترها تعریف شده‌اند. به‌عبارت دیگر رابطه (8) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta = u \quad (9)$$

در رابطه فوق، θ یک برداری از پارامترها (جرم، ممان اینرسی و ...) و Y یک ماتریس با ابعاد مناسب شناخته شده برای رگرسیون خطی است. در مقابل، برای مدل یک ربات با اتصالات انعطاف‌پذیر، فرض می‌شود که لینک‌ها صلب هستند اما محرک‌ها به صورت الاستیک به لینک‌ها کوپل هستند. این کوپلینگ الاستیکی، باعث ایجاد درجات آزادی اضافه در هر اتصال می‌شود تا آنجا که $2i$ مختصات تعمیم‌یافته برای تعریف ساختار ربات مورد نیاز است. در ابتدا برای سادگی فرض می‌شود که همه اتصالات دورانی هستند و توسط یک موتور الکتریکی تحریک می‌شوند. این به معنی آن است که استاتور موتور i -ام

که در رابطه (3)، $(Fs)_i$ برابر با نیروی وارده به هر لینک توسط صفحه بالایی، Q_i وابسته به خاصیت اینرسی هر لینک، V_i وابسته به خاصیت دینامیکی و f_i مقدار اصطکاک i -امین مفصل کروی هر لینک خواهد بود.

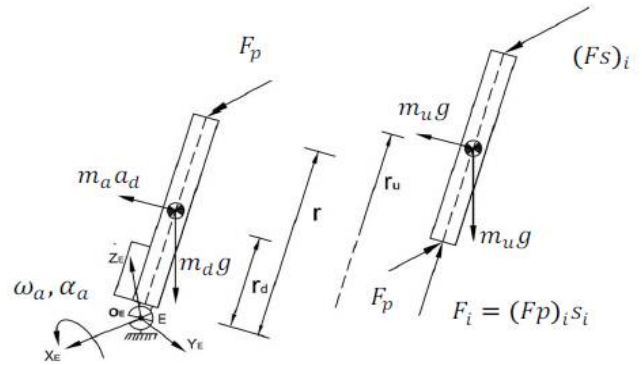


Fig. 5 Dynamic Analysis of each Robot arm [8]

شکل 5 آنالیز دینامیکی هر بازوی ربات [8]

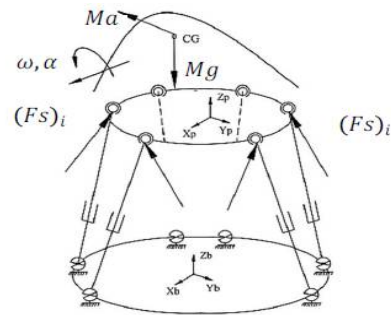


Fig. 6 Dynamic Analysis of the whole Robot [8]

شکل 6 آنالیز دینامیکی کل ربات [8]

با ترکیب روابط گفته شده، در نهایت دینامیک ربات بصورت رابطه (4) خواهد بود:

$$M_t(q)\ddot{q} + C_t(q, \dot{q}) + B_t(\dot{q}) + G_t(q) = J_{l,\omega} F \quad (4)$$

که در آن $J_{l,\omega}$ ماتریس ژاکوبین مربوط به $\dot{L}_i \cdot \omega$ به صورت رابطه (5) می‌باشد:

$$J_{l,\omega} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 & s_5 & s_6 \\ q_1 \times s_1 & q_2 \times s_2 & q_3 \times s_3 & q_4 \times s_4 & q_5 \times s_5 & q_6 \times s_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

بازوی یک ربات از n لینک با n اتصال تشکیل شده است. هر لینک می‌تواند توسط انرژی‌های الکتریکی، هیدرولیکی و یا پنوماتیکی تحریک گردد. در ربات صلب فرض می‌شود که همه لینک‌ها و کوپلینگ بین محرک‌ها و لینک‌ها کاملاً صلب بوده و دارای انعطاف و ارتعاش کمی هستند. بنابراین دینامیک ربات صلب می‌تواند با n مختصات تعمیم‌یافته که نشان‌دهنده

مسیرهای محور x ، y و چرخش حول محور x بر اساس مسیر مرجع تخمین زده می‌شوند. نتایج در شکل‌های 7 تا 9 ارائه شده است:

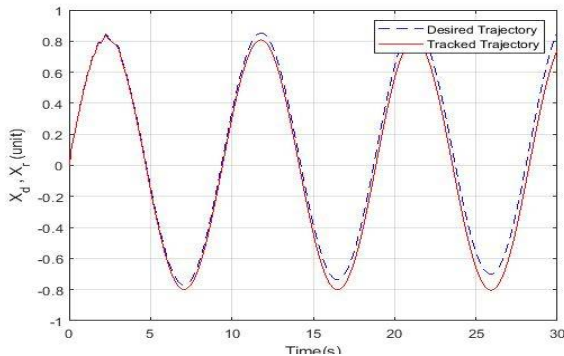


Fig. 7 Trace the reference path on the horizontal axis x

شکل 7 ردیابی مسیر مرجع بروی محور افقی x

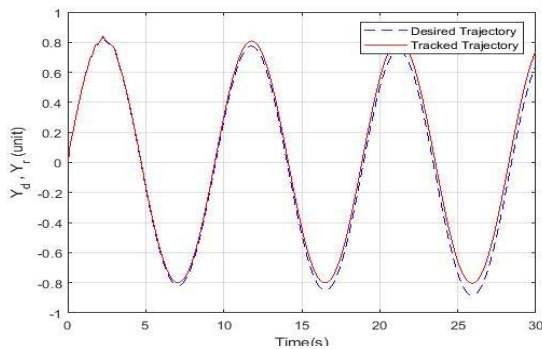


Fig. 8 Trace the reference path on the vertical axis y

شکل 8 ردیابی مسیر مرجع بروی محور قائم y

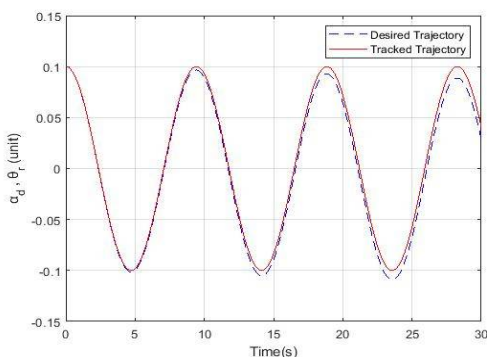


Fig. 9 Trace the reference path and rotate around the horizontal axis x

شکل 9 ردیابی مسیر مرجع و چرخشی حول محور افقی x

از این رو در شکل 10 میزان خطای ردیابی مسیر ربات ارائه شده است.

4-1- شبیه سازی برای مفاصل ارتجاعی

در شکل 11 خطای مسیریابی سیستم بر اساس آنالیز مودال با استفاده از کنترلر مورد نظر ارائه شده است:

به صورت صلب به لینک i -ام متصل شده است در حالی که روتور آن به صورت الاستیکی به لینک i -ام کوپل شده است. با توجه به شکل 1، q^{2i} نشان‌دهنده زاویه لینک i -ام و q^{2i-1} نشان دهنده زاویه محرک i -ام می‌باشد، هر دو زاویه اندازه‌گیری می‌شوند نسبت به لینک قبلی. بنابراین زاویه لینک‌ها دقیقاً همان متغیرهای اتصال دناویت- هارتنبرگ هستند تا آنجا که توصیف سینماتیک از بازو همانند اتصال صلب ربات است. باید توجه داشت که $q^{2i} - q^{2i-1}$ نشان‌دهنده جابجایی الاستیک اتصال است. بردارهای q_1 و q_2 به ترتیب زاویه‌های اتصال و محرک هستند و به صورت رابطه (10) تعریف می‌شوند:

$$q_1 = (q^2, q^4, \dots, q^{2n})^T, \quad q_2 = (q^1, q^3, \dots, q^{2n-1})^T$$

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

در رابطه (10)، q یک بردار $2i$ از مختصات تعمیم‌یافته برای سیستم است. اتصالات انعطاف‌پذیر توسط یک فنر پیچشی خطی در هر اتصال مدل شده است و با K که ماتریس قطری از ضرایب سفتی اتصال است، نشان داده شده است. همچنین فرض شده است که روتورها را می‌توان به صورت سیلندره‌های یکنواخت مدل کرد. برای مثال انرژی پتانسیل گرانشی سیستم به موقعیت روتور وابسته است و بنابراین تابعی از q^1 است. اگر مطابق با مدل صلب، اینرسی محرک با یک ماتریس $n \times n$ قطری شود بنابراین اینرسی و نیروهای عکس‌العمل وابسته خواهد شد به سرعت‌ها و شتاب‌های روتور. در این مورد معادلات دینامیکی حرکت برای ربات‌هایی با اتصال الاستیک را می‌توان به صورت رابطه (11) بیان نمود:

$$\begin{bmatrix} D(q_1) & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C(q_1, \dot{q}_1) \dot{q}_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g(q_1) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K(q_1 - q_2) \\ -K(q_1 - q_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ u \end{bmatrix} \quad (11)$$

و یا رابطه (11) را می‌توان به صورت رابطه (12) بازنویسی کرد:

$$D(q_1)\ddot{q}_1 + C(q_1, \dot{q}_1)\dot{q}_1 + g(q_1) + K(q_1 - q_2) = 0$$

$$J\ddot{q}_2 - K(q_1 - q_2) = u \quad (12)$$

در این مورد، نیروهای اینرسی، نیروهای عکس‌العمل و غیره، وابسته خواهند بود به سرعت‌ها و شتاب‌های روتور و نهایتاً معادلات حرکت به صورت زیر حاصل شده‌اند [8]:

$$\begin{bmatrix} M_{11}(q_1) & M_{12}(q_1) \\ M_{21}(q_1) & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1(q_1, \dot{q}_1) \dot{q}_1 \\ C_2(q_1, \dot{q}_1) \dot{q}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g(q_1) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K(q_1 - q_2) \\ -K(q_1 - q_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ u \end{bmatrix} \quad (13)$$

4- نتایج شبیه سازی

با پیاده‌سازی معادلات دینامیکی ربات، ردیابی موقعیت ربات در

برحسب زمان کنترل‌کننده‌های PID، کنترل‌کننده مد لغزشی SMC و آنالیز مودال برای مفاصل صلب و انعطاف‌پذیر در برخی نقاط اتصال پرداخته می‌شود. این موضوع در شکل‌های 13 و 14 ارائه شده است.

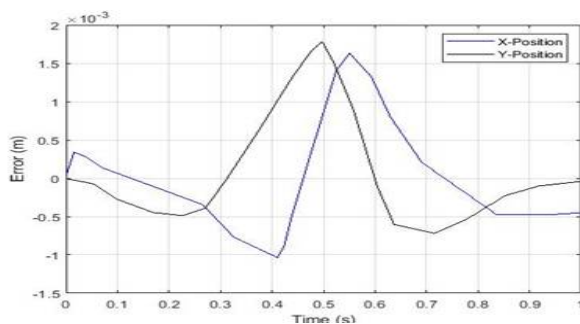


Fig. 12 System routing error by control based on modal analysis for rigid joints

شکل 12 خطای مسیریابی سیستم توسط کنترل بر اساس آنالیز مودال برای مفاصل صلب

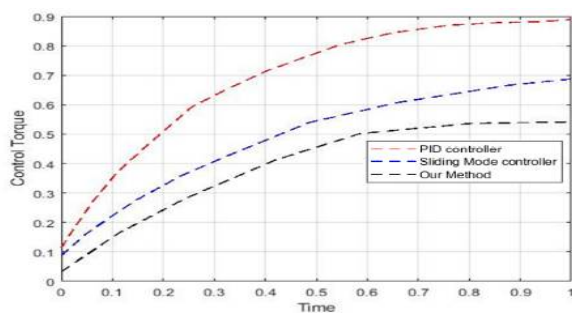


Fig. 13 Comparison of controller's performance based on control torque over time in flexible connections

شکل 13 مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌ها بر اساس گشتاور کنترلی برحسب زمان در اتصالات انعطاف‌پذیر

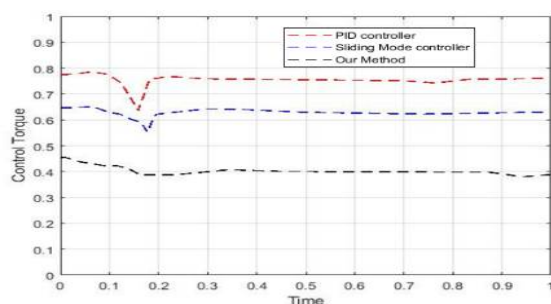


Fig. 14 Comparison of controller performance based on control torque over time in rigid connections

شکل 14 مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌ها بر اساس گشتاور کنترلی بر حسب زمان در اتصالات صلب

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، روش آنالیز مودال نسبت به الگوریتم‌های دیگر دارای عملکرد بهتری بوده و میتواند با ایجاد یک جریان هارمونیک و کاهش ارتعاشات، موقعیت ربات را حین ردیابی مسیر کنترل نماید. لذا می‌توان نتیجه این موضوع

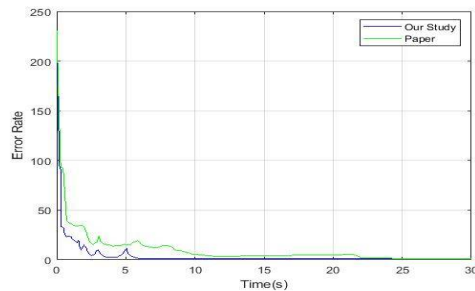


Fig. 10 Reference path tracking control error rate

شکل 10 میزان خطای کنترل ردیابی مسیر مرجع

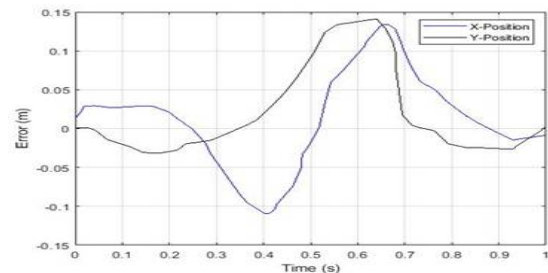


Fig. 11 System routing error based on modal analysis for elastic joints

شکل 11 خطای مسیریابی سیستم بر اساس آنالیز مودال برای مفاصل ارتجاعی

همان‌طور که در شکل 11 نیز نشان داده شده است، با استفاده از روش آنالیز مودال در مفاصل ارتجاعی که میزان ارتعاش قابل توجهی دارند، میزان خطای کنترل مسیر ربات نسبت به مسیر مرجع کمتر از 15 سانتی‌متر می‌باشد که این موضوع در سیستم با مقیاس متر بسیار مناسب است.

2-4- شبیه‌سازی برای مفاصل صلب

باتوجه به این که موتورها در انتهای بازوها قرار دارند، وظیفه انتقال نیرو در راستای انتقال شتاب، زاویه حرکت و تعیین مکان ربات را دارند. این کار توسط کنترل‌کننده مناسب تعیین می‌گردد. در حالتی که بازوها صلب هستند، دامنه نوسانی بازوها کاهش یافته و در نتیجه نیروی کششی و به تبع آن، گشتاور وارد بر بازوها افزایش خواهد یافت در مفاصل صلب میزان خطای مکانیابی کاهش یافته که این موضوع را می‌توان در شکل 12 ملاحظه نمود.

از مقایسه شکل‌های 11 و 12 ملاحظه می‌گردد که زمانی که بازوها صلب باشند، به دلیل اینکه ارتعاش کمتری را تحمل می‌نمایند، کنترل دقیقتری در راستای مسیر حرکت بازوها ارائه می‌دهند.

5- نتیجه‌گیری

در ادامه به بررسی نتایج حاصل از مقایسه گشتاور کنترلی

نتایج، می‌توان گفت، در مدل ربات با اتصالات ارتجاعی بدلیل افزایش درجات آزادی، ارتعاشات نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه کنترل آن نیاز به صرف انرژی بیشتری نسبت به مدل اتصال صلب به‌منظور کنترل مکان ربات است در نتیجه با صرف انرژی بیشتر، کنترل‌کننده سریعتر نسبت به مدل صلب عمل می‌نماید. همچنین با اعمال اغتشاش به سیستم مشخص شد که عملکرد کنترلر با اعمال اغتشاش به سیستم تحت تأثیر قرار گرفت و میزان خطای مکانیابی افزایش یافت. در نهایت می‌توان اذعان نمود در یک سیستم کنترلی، تعیین ضرایب بهینه در روابط نقش بسزایی در عملکرد آن کنترلر دارد.

7- تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح پایان نامه با عنوان «شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کنترل حرکت ربات استوارت براساس پاسخ آنالیز مودال» در دانشگاه آزاد اسلامی واحد آبدان می‌باشد.

8- فهرست علائم

a	بردار شتاب مرکز صفحه فوقانی
b_i	بردار موقعیت i -امین بازو در صفحه زیرین
C	بردار کریولیس و مرکز گرا
$J_{i,\omega}$	ماتریس ژاکوبین مربوط به $\dot{L}_i \cdot \omega$
M_i	جرم صفحه‌ای متحرک
P_i	بردار موقعیت لینک - i ام در صفحه فوقانی
q	بردار موقعیت مفاصل
\mathcal{R}_{pi}	ماتریس دوران ربات
S_i	بردار یکه در جهت لینک i -ام
V_i	بردار دینامیکی بازو - i ام

9- مراجع

- [1] Morán ES, Báez EP, Aguilar E, Escobar L, Pinto N.2018. Design of a Spatial Disorientation Simulator using a Modified Stewart-Gough Platform. IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting, pp. 1-6.
- [2] M. R. Sirouspour, S. E. Salcudean, 2016. Nonlinear control of hydraulic Robots, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 2, pp. 173-182.
- [3] Roy S, Roy SB, Kar IN.2017. Adaptive-robust control of Euler-LaGrange systems with linearly parametrizable uncertainty bound. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 26(5), pp.1842-50.
- [4] Navvabi H, Markazi AH.2019. Hybrid position/force control of Stewart Manipulator using Extended Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller (E-AFSMC). ISA transactions, 88(1), pp. 280-95.

را در شکل 15 که مقایسه ردیابی مسیر مرجع با استفاده از کنترل‌کننده‌های مورد نظر می‌باشد را مشاهده نمود:

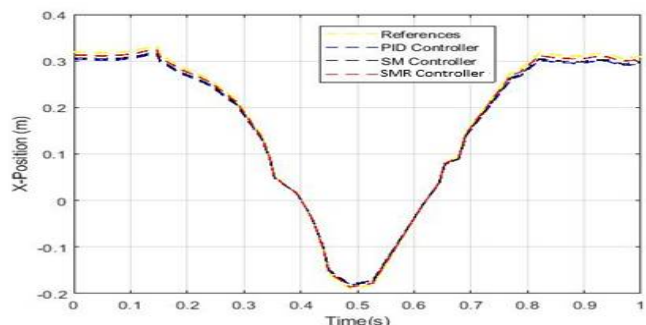


Fig. 15 Comparison of reference path tracking with different controllers
شکل 15 مقایسه ردیابی مسیر مرجع با کنترل‌کننده‌های مختلف

6- نتایج

معرفی مختصری از نسل جدید ربات‌های موازی تحت عنوان ربات‌های استوارت، مزایا و معایب آنها به همراه تاریخچه‌ای از کارهای علمی صورت گرفته شده در این زمینه ارائه شده است. مشاهده شد که بزرگترین مزیت این‌گونه ربات‌ها، سبکی و ارزانی و قابل حمل بودن آنها است. در عوض به علت محدودیت‌ها و معادلات پیچیده و غیرخطی، احتیاج به سیستم کنترلی مناسبی برای آنها داریم تا بتواند روابط را خطی‌سازی و ساده‌سازی کند. مدل‌سازی دینامیکی ربات استوارت مورد بررسی قرار گرفت و روابط دینامیکی عملکرد نهایی و ارتباط آنها باهم معرفی شد. مشاهده شد که بزرگترین اختلاف دینامیک ربات‌های استوارت و لینکی در این است که این رباتها فقط توانایی انتقال نیروهای کششی را به‌عملگر نهایی را دارا می‌باشند. وجود چنین محدودیتی، علاوه بر اینکه فرآیند کنترل ربات را با فرآیندی چالشی‌تر روبرو می‌کند، بلکه از قابلیت حرکت ربات در تمام فضا جلوگیری کرده و فضایی به نام فضای کاری مجاز را ایجاد می‌کند که در آن کشش همه بازوها می‌تواند مثبت باقی بماند و همان طور که در مورد سیستم صفحه‌ای دیده شد، روابط ربات با قید کامل، این الزام را ایجاد می‌کند که به‌کمک الگوریتمی کمکی، از میان بی‌نهایت جواب ممکن برای کشش بازوها، موردی انتخاب شود که تمامی کشش‌ها، مثبت باقی بمانند. از این رو در این پژوهش از آنالیز مودال به‌منظور کنترل ارتعاشات ربات پرداخته شد. نتایج حاصل با را از دو نقطه نظر بازوهای صلب و انعطاف‌پذیر در نقاط مختلف بازوی ربات با استفاده از پاسخ آنالیز مودال مورد بررسی و تحلیل قرار دادیم و نتایج حاصل شده را با مقاله سلیمی و همکاران [9]، مورد مقایسه قرار دادیم. با مقایسه بین

- Kinematic Analysis of the Motion of a Six Degrees of Freedom Wave Energy Converter Based on the Concept of the Stewart-Gough Platform. 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, pp, 15-37.
- [9] Salimi A, Danaei B, Kalhor A, Tale Masouleh A.2017. Trajectory tracking control of a pneumatically actuated 6-DOF Gough–Stewart parallel robot using Backstepping-Sliding Mode controller and geometry-based quasi forward kinematic method. *International Conference on Robotics and Mechatronics*, Oct, pp. 239-245.
- [5] Lou JH, Tseng SP.2018. Developing a Real-Time Multi-Axis Servo Motion Control System. In Proceedings of the 6th International Conference on Control, Mechatronics and Automation, pp. 86-91.
- [6] Furqan M, Suhaib M, Ahmad N.2019. Studies on Stewart platform manipulator a review. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(9), pp. 59-70.
- [7] Ko B, Park JW, Kim DW.2017. A study on iterative learning control for vibration of Stewart platform. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 15(1):258-66.
- [8] Galvan-Pozzo's DE, Ocampo-Torres FJ.2018.