

ماهنامه علمی پژوهشی

ہ، مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

کنترل پیشبین غیرخطی ربات شش درجه آزادی سکوی استوارت

 *2 مجتبی قربانی 1 ، سیدکمال جسینی ثانی

1 - دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برق ، دانشگاه فردوسی مشهد
 2 - استادیار، مهندسی برق ، دانشگاه فردوسی مشهد
 * مشهد، صندوق پستی k.hosseini@um.ac.ir ، 9177948974

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این مقاله کنترل پیشبین غیرخطی برای ربات موازی شش درجه آزادی استوارت ارائهشده است. کنترل پیشبین، مسیر کنترلی بهینه ربات را	مقاله پژوهشی کامل ان بر 18 مار 1204
در یک افق محدود و مشخص انتخاب میکند. هدف اصلی این تحقیق طراحی کنترل کننده ی پیش بین برای ربات شش درجه آزادی استوارت	دریافت: 10 مرداد 1394 یذیرش: 15 آبان 1394
است. در این پژوهش ابتدا سینماتیک و دینامیک ربات استوارت با در نظر گرفتن دینامیک الکتروموتورهای محرکها معرفی می گردد. در ادامه به 	ارائه در سایت: 24 آذر 1394
معرفی کنترل پیش بین عیرحطی پرداخته شده و متناسب با دینامیک ربات شش درجه آزادی، کنترل کننده طراحی می شود. با قرص وجود با معرفی است است است است اینامی با کسی است این میشود. کسی کسی کسی است می است است است است است است است است است و	کلید واژگان:
نامعینیهای مختلف برای ربات معادله دینامیخی ربات بازنویسی شده و کنترل کننده با توجه به این نامعینیها طراحی و پایداری کنترل کننده با استاد از بنا بر اراز فرافات ها در کنتر اکندید و فراده را تر در با معد در در ترار ها توجه به این نامعینیها طراحی	سکوی استوارت کنترا بر شرید خرخها
استفاده از نظریه لیاپانوف اثبات می دردد. دسرل دسده ی پیشتهادی با توجه به محدود بودن توان و دشتاور موتورها در عمل، شخوی استوارت را به گیندام کنتر ایم کند که مسیمه دنتا به نمید دیارت گرد در انتروام مشروف با می در می شد. ایکتر دم یک مراد تداری	ىيىرل پيسىيى غيرخطى نامعىنى ھاي سىستى
به تونهای تسرل می تند به مسیر موردنظر به خوبی ردینی تردد. در انتهای پروهش برای بررشی روش آرامهشده، شخوی استوارت سبیهشاری و روش کنترلی بیشناهادی با دیگر روش های مرسوم از جمله روش کنترل گشتاه، محاسبهشده، کنترل مد لغذشی و کنترل کنندهی تناسب	کنترل ربات
انتگرال گیر -مشتق گیر ازنظر خطای ردیابی و تلاش کنترلی مقایسه شده است.	پايدارى لياپانوف

Nonlinear model predictive control of Stewart platform 6 dof

Mojtaba Ghorbani, Seyed Kamal Hosseini Sani

Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran * P.O.B. 9177948974 Mashhad, Iran, k.hosseini@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	Abstract	
Original Research Paper Received 09 August 2015 Accepted 06 November 2015 Available Online 15 December 2015	This paper presents a nonlinear predictive approach for Stewart platform (6 degrees of freedom) optimal control is computed directly from the minimization of receding horizon cost function offline optimization. The main purpose of this research is to design the predictive controller for St platform. In this study, the kinematics and dynamics of Stewart robot are introduced, considering the study of the study of the study of the study of the study.	
<i>Keywords:</i> Stewart platform Nonlinear model predictive control uncertain system robot manipulator Lyapunov stability	dynamics of actuators. Following the introduction of nonlinear model predictive control will be discussed and according to robot dynamics, controller will be designed. In addition, given the various uncertainties, robot dynamic equation could be rewritten. The controller is designed according to these uncertainties and then stability control is confirmed using Lyapunov theory. Due to the limited engine power and the output torque electric drive in practice, the proposed controller manages Stewart platform in such a way that it could track the desired trajectory well. To review the proposed method at the end of the study, Stewart platform is simulated and the control method proposed in this paper was compared with computed torque control (CTC) method, sliding mode control and Proportional-Integrator-Differentiation (PID) controller.	

و دقت بالاتری بوده که با توجه به این مزایا ، این گروه از رباتها در تولید

1-مقدمه

سکوی استوارت ، یک ربات موازی با 6 درجه آزادی است که نخستین بار

ماشین ابزارها ، شبیه سازها ، رادیو تلسکو پها و غیره کاربرد فراوانی یافته اند؛ اما در کنار مزیت های گفته شده باید توجه نمود که فضای کاری ربات های موازی در مقایسه با ربات های سری بسیار کمتر بوده و همچنین، حل مسائل سینماتیکی و دینامیکی آن ها به مراتب دشوار تر است. به دست آوردن مدلی دقیق از ربات، همواره مورد توجه و بررسی پژوه شگران قرار داشته است. ربات استوارت نیز از این قاعده مستثنی نبوده و محاسبه ی مدلی دقیق از انواع مختلف آن مورد توجه محققین بوده است. اما کار کرد ربات در محیط ها و شرایط مختلف باعث تغییر در ساختار واقعی ربات

توسط استوارت [1] در سال 1965 معرفی گردید. این ربات همان طور که در شکل 1 نشان داده شده است، متشکل از دو صفحه² بوده که از طریق 6 بازو³ به یکدیگر متصل شده است. هر یک از لینکها می تواند از طریق محرکهای هیدرولیکی، پنیوماتیکی و یا الکتریکی حرکتی خطی داشته باشد. این بازوها از طریق مفصل کروی به صفحه محرک فوقانی و به وسیله یمضل یونیور سال⁴ به صفحه ثابت زیرین متصل است.

- 1- Stewart platform
- 2- plate
- 3- link
- 4- Universal joint

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Ghorbani, S. K. Hosseini Sani, Nonlinear model predictive control of Stewart platform 6 dof, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 41-50, 2016 (in Persian)



Fig. 1 The Stewart platform

شكل 1 ساختار ربات استوارت

شده و این باعث ایجاد اختلاف بین مدل واقعی ربات و مدل بهدست آمده برای ربات خواهد شد. لذا کنترل ربات با وجود این نامعینی های مختلف، از مهم ترین مباحث در کنترل ربات شش درجه آزادی استوارت است. تاکنون روش های متعددی برای کنترل ربات باوجود این نامعینی های مختلف ارائه شده است که در ادامه برخی از آن ها بررسی خواهد شد.

برای کنترل ربات استوارت با نامعینیهای مختلف، استفاده از کنترل مقاوم توسط برخی محققین پیشنهاد گردید. سیهان لی و همکاران برای کنترل موقعیت سیستم شبیهساز پرواز شش درجهی آزادی، استفاده از دینامیک معکوس ترکیبشده با کنترلکنندهی [∞] ا را معرفی کرده و بهمنظور مقابله با تأثیر خطاهای مدلسازی و همچنین حذف اغتشاش، از راهبرد کنترل مقاوم [∞] ا در حلقه بیرونی کنترلکنندهی دینامیک معکوس، استفاده کردند [2].

از دیگر موارد استفاده از کنترل مقاوم برای کنترل ربات استوارت می توان به مرجع [3] اشاره کرد. در این مقاله یک کنترل کننده [∞]**H**، به منظور مقابله با اغتشاشها و عدم قطعیتهای ناشی از خطاهای مدل سازی در بازوی مکانیکی موازی شش درجه آزادی به همراه دینامیک محرکهای الکترومکانیک پیشنهادشده و به منظور طراحی یک کنترل ردیابی موقعیت، کنترل کننده [∞]**H** با یک کنترل کننده دینامیک معکوس که در آن دینامیکهای معکوس تخمین زده شده اند، ترکیب گردید.

مرجع [4] کنترل کننده مقاوم برای یک سکوی استوارت شش درجه آزادی، باقابلیت حذف اغتشاش در فضای لینکی و باهدف کنترل ردیابی دقت بالا را معرفی کرد. در این طرح کنترلی، با توجه به وجود نویز اندازه گیری، اغتشاش، و اصطکاکهای غیرخطی مدل نشده و درنتیجه تخریب دقت ردیابی سیستم، یک مشتق گیر غیرخطی در مسیر پیشرو، و یک مشاهده گر

تناسبی²، توسعه یافت؛ که در آن، بهره کنترلکننده مشتقی تناسبی توسط قوانین تطبیق، تنظیم میشود.

در مرجع [6] یک مدل کامل دینامیکی بر اساس روش نیوتن - لاگرانژ برای کنترل سکوی استوارت، در فضای وظیفه معرفی شد و یک طرح کنترل تطبیقی ترکیبی، با استفاده از راهبرد فیلتر کردن دینامیکهای سیستم، توسعه داده شد و سپس، یک تخمین گر با بهرهی مناسب، برای قانون تطبیق پارامترها طراحی گردید.

یک راهبرد کنترل مقاوم تطبیقی، به منظور جبران عدم قطعیتهای پارامتری و غیرخطیهای نامعلوم، در مدل دینامیکی بازوی مکانیکی موازی با سه محرک پنوماتیک، باهدف رسیدن به کنترل ردیابی دقیق؛ در مرجع [7] به کار گرفته شد. طرح کنترل پیشنهادی، به طور قابل توجهی، تأثیر ناشی از تغییر پارامترها، اغتشاشهای نامعلوم، خطاهای مدل سازی در نیروهای استاتیک ماهیچههای پنوماتیک، و غیرخطیهای نامعلوم مانند نیروهای اصطکاک متغیر با زمان در ماهیچههای پنوماتیک را تضعیف نمود.

اقبال و بهاتی در مرجع [8] یک کنترل کننده ی مد لغزشی مقاوم، برای کنترل موقعیت سکوی استوارت با در نظر گرفتن دینامیکهای نامعین، مطرح کردند. مرجع [9] یک روش پسگام تطبیق شونده، به منظور توسعه یک کنترل کننده غیرخطی برای بازوی مکانیکی سکوی استوارت با در نظر گرفتن دینامیکهای محرک هیدرولیک، به کار گرفت. این کنترل کننده توانایی جبران عدم قطعیتهای پارامتری در دینامیکهای سیستم، شامل دینامیکهای جسم صلب و دینامیکهای محرکهای هیدرولیک را دارا بود.

کنترل کننده ی کاربردی برای سکوی استوارت شش درجه آزادی با محرکهای پنوماتیک، در مرجع [10] معرفی شد. در راهبرد کنترلی پیشنهاد شده، یک کنترل کننده ی LOG باهدف ردیابی مسیر مرجع در سکوی متحرک، بکار گرفته شد. سپس، به منظور بهبود عملکرد ردیابی، طرح کنترلی LOG با یک ساختار کنترل انتگرالی، ترکیب گردید. کنترل کننده ی LOG در رویکرد پیشنهادی، ترکیبی از فیلتر کالمن(یعنی تخمین گر خطی درجه دوم (LOE)) و یک تنظیم کننده خطی درجه دوم (LOG) است. اما در روش پیشنهادی، برای طراحی کنترل کننده ی LOG بایستی مدل دقیقی از سیستم، در دسترس باشد که به دلیل وجود خطاهای مدل سازی و اغتشاش های موجود این روش چندان کاربردی نخواهد بود.

یک کنترل کننده ی مد لغزشی تطبیقی در فضای کاری، بر اساس معادلات دینامیکی نیوتن - اویلر در یک شبیه ساز پرواز شش درجه آزادی، با قابلیت شناسایی پارامترهای سکوی متحرک، مانند بار، ممانهای اینرسی و مرکز جرم، در مرجع [11] پیشنهاد گردید. طرح کنترل پیشنهادی، پارامترهای نامعین ثابت را با استفاده از کنترل کننده تطبیقی غیرخطی شناسایی کرده و سپس، به منظور جبران اغتشاشهای خارجی، از کنترل کننده مد لغزشی، استفاده می کند.

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.11.4]

استفاده از روشهای هوشمند نیز جهت کنترل ربات استوارت مورد
استفاده قرار گرفته است، که از آن میان میتوان به پژوهش یانگ و همکاران
اشاره کرد، که یک الگوریتم کنترل تناسبی- مشتقی- انتگرالی فازی برای یک
بازوی مکانیکی سکوی استوارت با در نظر گرفتن دینامیک محرکهای
هیدرولیک، معرفی کردند و در رویکرد پیشنهادی آنها، یک الگوریتم کنترلی
با استفاده از ترکیب الگوریتم کنترل منطق فازی با کنترل PID، معرفی شد
.[12]

حالت تعمیمیافته در مسیر فیدبک، و همچنین یک کنترلکننده مشتقی
تناسبی غیرخطی، برای رسیدن به عملکرد بهتر کنترلی، استفاده شد.
از سایر روشهای مقاوم در مقابل نامعینیهای ربات میتوان به کنترل
تطبیقی اشاره کرد. پیادهسازی یک طرح کنترل تطبیقی در فضای مفصلی 1
برای کنترل حرکت یک بازوی مکانیکی موازی شش درجه آزادی، در مرجع
[5] معرفی شد. در طرح کنترلی پیشنهادشده در این مرجع، یک
کنترلکنندهی تطبیقی با استفاده از ترکیب کنترلکنندههای مشتقی

2- Proportional differential (PD)

1- Joint space

در مرجع [13] یک کنترل کننده یفازی تطبیقی کاربردی، بر اساس رویکرد فضای کاری، به منظور بهبود دقت ردیابی موقعیت در سکوی استوارت، با پارامترهای غیرخطی و متغیر با زمان، طراحی گردید. در این پژوهش، از یک سیستم منطق فازی، به منظور اصلاح پارامترهای کنترل کننده PID، استفاده شد.

دانگسو و همکاران در مرجع [14] یک الگوریتم کنترل فازی تطبیقی برای ردیابی مسیر در بازوی مکانیکی سکوی استوارت، با هدف جبران انحراف مسیر و جبران تخریب عملکرد کنترل کننده، به دلیل محدود بودن گشتاور محرکها، پیشنهاد کردند.

در مرجع [15] مدلسازی و کنترل یک سیستم تثبیت موقعیت مقیاس کوچک با محرکهای پیزوالکتریک، معرفی شد. در ابتدا، مدلسازی دینامیکی سیستم تثبیت موقعیت شش درجه آزادی، و سپس دو سیستم فازی تک ورودی- تک خروجی و نیز، راهبرد کنترلی مبتنی بر خطیسازی فیدبک بیان گردید.

یانگجین و همکاران یک کنترل ردیابی مسیر برای بازوهای مکانیکی موازی شش درجه آزادی با محرکهای هیدرولیک، به همراه عدم قطعیتها و اغتشاشهای نامعین بار، معرفی کردند [16].

مرجع [17] حلی از معادله سینماتیک مستقیم بر اساس مشاهده گر، برای سکوی استوارت با شش مفصل کشویی و شش مفصل کروی، پیشنهاد کرد. این الگوریتم کنترلی، برای پیادهسازی یک کنترل کننده مد لغزشی با فیدبک خروجی، به بازوی مکانیکی سکوی استوارت، اعمال گردید. با روش حل پیشنهادی، کنترل موقعیت سکوی متحرک شش درجه آزادی، میتواند با بکار بردن یک کنترل فیدبک خروجی، و بدون نصب هر گونه حسگر خارجی (همانند ژیروسکوپ)، انجام شود.

استفاده از روش کنترل مقاوم برای کنترل ربات استوارت در بسیاری از موارد، مورد استفاده پژوهشگران قرارگرفته است و این در حالی است که استفاده از این روش کاهش دقت سیستم و بهنوعی افزایش خطای کنترل ربات را به دنبال خواهد داشت. علاوه بر کنترل مقاوم ، استفاده از روشهای تطبیقی و هوشمند نیز بسیار موردتوجه قرارگرفته است. از بزرگترین مشکلات استفاده ی از این روشها حجم بالای محاسبات خواهد بود که این باعث عدم توانایی در پیاده سازی عملی و کاربردی شدن این روشها خواهد شد. هرچند روشهای مختلف کنترل تطبیقی و هوشمند در حالتهایی که شد. هرچند روشهای مختلف کنترل تطبیقی و هوشمند در حالتهایی که کاهش خواهد یافت که در این صورت با فرض بر ساده سازی روابط خطای سیستم نیز افزایش خواهد یافت.

از سویی دیگر چنانچه مطالعات مختلف درزمینهی کنترل ربات استوارت با محرکهای الکترومکانیک مورد توجه قرار گیرد، ملاحظه خواهد شد که اکثریت روشهای معرفی شده نیازمند استفاده از موتورهایی با توانایی بالا بوده

تولیدی موتور محرک لینکها، میتوان کنترل پیشبین غیرخطی را بر روی ربات استوارت پیاده سازی عملی نیز نمود.

در بخش دوم مقاله مدل دینامیکی ربات معرفی شده و در بخش سوم به تشریح ایده کنترل پیش بین غیرخطی پرداخته شده است. در ادامه ی بخش سوم در مورد مقاوم بودن و همچنین پایدار بودن روش پیشنهادی بحث شده است. در بخش چهارم کنترل پیش بین غیر خطی بر روی ربات استوارت شبیه سازی شده و ویژگی های آن مورد بررسی قرار گرفته است.

2-مدلسازی ربات استوارت

رابطهی (2) نوشت .

با استفاده از روش نیوتن - اویلر که در مرجع [18] معرفی شده است، معادلات غیرخطی دینامیک ربات در فضای دکارتی محاسبه شده است. معرفی علائم در بخش فهرست علائم صورت گرفته است. مختصات فضای دکارتی بردار p به صورت (1) معرفی می شود [20،19]. (1) که در آن $[x \ y \ z] = f$ بردار انتقال سکوی محرک و $[\psi \ \theta \ \phi] = \Theta$ زوایای اویلری مبدأ است. با توجه به شکل2، بردار معرف هر بازو را می توان به صورت

 $S_i = \Re_{pi} + t - b_i \tag{2}$

با استفاده از معادله (2) سینماتیک معکوس ربات با اندازه گیری طول هر لینک به دست میآید.

برای حل سینماتیک مستقیم ربات، لازم است موقعیت دقیق ربات و همچنین جهت حرکت سکو با توجه به لینکها محاسبه گردد. با توجه به ساختار ربات مشخص می گردد که سینماتیک مستقیم ربات، از حل همزمان 6 معادله غیرخطی بهدست آمده و با استفاده از محاسبات عددی معرفی شده در مرجع [18] محاسبه می گردد. تجزیه و تحلیل دینامیکی سکو با در نظر گفتن نیروها و تعادل هر بازو با توجه به شکل 3 و شکل 4 به صورت رابطه ی (3) است.

$$(Fs)_i = Q_i \ddot{t} - Q_i (\tilde{q}_p)_i \alpha + V_i - F_i s_i$$
(3)

که در رابطه (3)، $(Fs)_i$ عبارت است از نیروی وارده به هر لینک توسط صفحه بالایی و همچنین Q_i وابسته به خاصیت اینرسی هر لینک و V_i وابسته به خاصیت دینامیک هر لینک خواهد بود.



 Fig. 2 The Simplified structure Stewart platform

 شکل 2 ساختار ساده شده ربات استوارت

که این خود حاکی از نامناسب بودن این روشها برای استفاده عملی در كنترل ربات خواهند بود. در این مقاله سعی خواهد شد تا با استفاده از روش کنترل پیشبین غیرخطی با تخمین نامعینیهای سیستم، کنترل ربات استوارت انجام گیرد. روش معرفی شده در این پژوهش به گونهای است که با ترکیب روش کنترل گشتاور محاسبه شده و همچنین تخمین نامعینی سیستم، ربات کنترل خواهد شد. کنترل کنندهی معرفی شده در این تحقیق نیاز به حجم محاسبات بالایی نداشته و همچنین از دقت مناسبی در قیاس با سایر روشهای مرسوم برخوردار است. از سویی دیگر با توجه به محدود فرض کردن میزان گشتاور



Fig. 5 Electromechanical actuator

شكل 5 محرك الكترومكانيكي

بسیار بالاتر از سیستم حرکتی است، دینامیک بخش الکتریکی در مقایسه با بخش مکانیکی قابل صرفنظر کردن است و تنها دینامیک بخش مکانیکی در نظر گرفته میشود. با این فرض میتوان گشتاور موتور را متناسب با جریان موتور فرض نمود. رابطه حرکت محرک الکترومکانیکی بهصورت (7) خواهد بود.

$$F = K_{\rm a}T_{\rm m} - D_{\rm a}\ddot{L} - B_{\rm a}\dot{L}$$
⁽⁷⁾

$$K_a$$
 که در رابطه (7) D_a ماتریس اینرسی محرک، B_a ماتریس ضریب میرایی و K_a بهره محرک ماتریس بوده که در پیوست در مورد آن توضیح داده شده است.
ارتباط بین فضای دکارتی و فضای مفاصل را میتوان به صورت رابطه (8) بیان نمود.

$$L = J_{1,q}q$$

$$\ddot{L} = J_{1,q}\ddot{q} + \dot{J}_{1,q}\dot{q}$$
(8)
$$\sum_{i=1}^{n} J_{i,q}\ddot{q} + \dot{J}_{i,q}\dot{q}$$
(8)

$$F = K_{a}T_{m} - D_{a}J_{l,q}\ddot{q} - D_{a}\dot{J}_{l,q}\dot{q} - B_{a}J_{l,q}\dot{q}$$
⁽⁹⁾

$$D(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) = u$$

$$D = K_{a}^{-1}[J_{l,\omega}^{-T}M_{t} + D_{a}J_{l,q}]$$

$$C = K_{a}^{-1}[J_{l,\omega}^{-T}C_{t} + D_{a}\dot{J}_{l,q} + B_{a}J_{l,q}\dot{q}]$$

$$G = K_{a}^{-1}J_{l,\omega}^{-T}[B_{t} + G_{t}]$$
(10)

که در رابطه (10)، $u_{\rm T} = T_{\rm m}$ بوده و میزان گشتاور موتور محرک خواهد بود. گشتاور تولیدشده در موتور نیز متناسب با جریان موتور الکتریکی محرک الکترومکانیکی بوده و با افزایش گشتاور تولیدی میزان جریان موردنیاز نیز افزایش خواهد یافت.

3-كنترل پيشيين غيرخطي

هدف از طراحی کنترل کننده برای ربات، ردیابی مسیر دلخواه و به دست آوردن کمترین خطای ردیابی است. کنترل کننده ی پیش بین بر پایه کمینه سازی تابع هزینه، بهترین بردار کنترلی را در یک افق پیش بین معین محاسبه می نماید. محاسبه می نماید. $J = \frac{1}{2} \int_{T_1}^{T_2} (q(t + \tau) - q_r(t + \tau))^2 d\tau = \frac{1}{2} \int_{T_1}^{T_2} e_q(t + \tau)^2 d\tau$ (11)





شکل 3 آنالیز دینامیکی هر بازوی ربات



Fig. 4 Dynamic Analysis of the robot

شکل 4 آنالیز دینامیکی کل ربات

به طور مشابه نیرو و تعادل لحظه ای برای کل سکوی متحرک را می توان به صورت روابط (4) و (5) نوشت.

$$Ma = Mg - \sum_{i=1}^{\circ} (Fs)_i$$
(4)

و

$$MR \times g - \sum_{i=1}^{6} [(q_p)_i \times (F_s)_i] + \sum_{i=1}^{6} f_i$$

= $I_p \alpha + \omega \times I_p \omega + MR \times a$ (5)

که در رابطهی (5**)،** _fi مقدار اصطکاک *i*-امین مفصل کروی خواهد بود.

با ترکیب روابط گفته شده، درنهایت دینامیک ربات به صورت رابطه (6) خواهد بود.

$$M_t(q)\ddot{q} + C_t(q,\dot{q}) + B_t(\dot{q}) + G_t(q) = J_{l,\omega}F$$
(6)

جزئیات عناصر ماتریسهای معرفیشده روابط قبل، در پیوست پژوهش آورده

شده است.

1-2 دینامیک محرکهای ربات با پیشرفت و توسعه در تولید سرو موتورهای الکتریکی، امروزه استقبال از این موتورها و بهره گیری از آنها در تولید محرکهای مختلف افزایشیافته و در بسیاری از موارد جایگزین محرکهای روغنی شده است . یک محرک الکترومکانیکی شامل یک موتور، درایور موتور و یک مبدل نیرو است. در شکل5 نمای کلی محرک به همراه بالاسکرو نشان داده شده است. با توجه به اینکه پهنای باند حلقه بسته بین سرو موتور و سرو درایور

در رابطهی (11) عبارت (t + τ e_q(t + τ جطای ردیابی مسیر مرجع و (**τ)** میزان گامهای پیشبینیشده از مسیر حرکت ربات است. با استفاده از سری تیلور

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

می توان مسیر آینده حرکت ربات را تا au گام بعد با استفاده از موقعیت فعلی ربات (رابطهی (12)) محاسبه نمود.

$$q(t + \tau) = q(t) + \tau \dot{q}(t) + \frac{\tau^2}{2!} \ddot{q}(t)$$
(12)

با توجه به مدل دینامیکی معرفیشدهی ربات (رابطه(10))، ماتریس مشتقات . .

مسير بهصورت رابطه

(13)خواهد بود.

$$Q(t) = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \\ \ddot{q}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \\ -D(q)^{-1} (C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times 1} \\ \mathbf{0}_{n \times 1} \\ -D(q)^{-1} u(t) \end{bmatrix}$$
(13)

درنتیجه مدل پیش بینی شده از مسیر آینده به صورت رابطه (14) به دست خواهد آمد.

$$q(t + \tau) = T(\tau)Q(t) \tag{14}$$

 $I_{6\times6}$ که در رابطهی (14)، $[I_{6\times6} \ \tau \times I_{6\times6} \ \frac{\tau^2}{2!} \times I_{6\times6}]$ و همچنین $I_{6\times6}$ ماتریس واحد به ابعاد **6 × 6** میباشد.

به طور مشابه محاسبات انجام گرفته را می توان برای پیش بینی مسیر واقعی طی شده توسط ربات $(q_r(t + \tau))$ نیز انجام داد.

$$q_{r}(t + \tau) = T(\tau)Q_{r}(t)$$

$$Q_{r}(t) = [q_{r}(t) \dot{q}_{r}(t) \ddot{q}_{r}(t)]^{T}$$
(15)

با توجه به روابط (14)و(15)، پیشبینی خطای طی مسیر در *τ* گام بعد به صورت رابطه (16) خواهد بود.

$$e_{q}(t + \tau) = q(t + \tau) - q_{r}(t + \tau)$$

= T(\tau)(Q(t) - Q_{r}(t)) (16)

$$J = \frac{1}{2} (Q(t) - Q_r(t))^T \Pi (Q(t) - Q_r(t))$$
(17)

که در آن جهت سادهسازی روابط تابع Π بهصورت رابطه (18) شده است.

با ساده كردن رابطه (19) رابطه (20) حاصل خواهد شد.

$$u(t) = -D(q) \{ K_{p}(q - q_{r}) + K_{d}(q - q_{r}) - D(q)^{-1} (C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)) - \ddot{q}_{r} \}$$
$$K_{p} = (\frac{10}{3T^{2}}) \times I_{6\times6}$$
$$K_{d} = (\frac{5}{2T}) \times I_{6\times6}$$
(20)

1-3- كنترل پيش بين غير خطى مقاوم

هدف از طراحی کنترل کننده ها برای یک سیستم، پیاده سازی آن ها بر روی ربات واقعی می باشد. لذا هرچه کنترل کننده ی سکوی استوارت دقیق تر و مدل ساخته شده از ربات به واقعیت شبیه تر باشد، ربات در ردیابی مسیر مرجع دارای خطای کمتری خواهد بود. اما همواره در مدل سازی سیستم ها نامعینی های مختلفی وجود دارد که توانای مدل کردن آن ها مقدور نبوده و یا بسیار دشوار می باشد. برای مثال در ربات ها، نیروی اصطکاک بین قطعات محرک ربات، متغیر بوده و متناسب با شرایط محیطی ربات و به مرور زمان تغییر می کند. پژوه شگران این گونه متغیرها را به صورت نامعینی فرض کرده و با توجه به اینکه این متغیرها نامعلوم می باشد، در برخی از تحقیقات با شناسایی کردن مقدار متغیرها و در برخی دیگر از تحقیقات با توجه به نامعین بودن این متغییرها کنترل کننده ربات را طراحی می نمایند [21].

در این پژوهش نامعینیها به صورت افزوده به مقادیر واقعی متغیرها به عنوان خطای مدلسازی درنظر گرفته می شود.

$$\begin{cases} D(q) = D_0(q) + \Delta D \\ C(q, \dot{q}) = C_0(q, \dot{q}) + \Delta C \\ G(q) = G_0(q) + \Delta G \end{cases}$$
(21)

نیروی اصطکاک $\Re(t) \in \Re^n$ و هم چنین اغتشاش خارجی b(t) به صورت افزوده به مدل معرفی شده ربات در رابطه (10) در نظر گرفته شده است. در نهایت مدل ربات با در نظر گرفتن نامعینی ها به صورت رابطه (22) خواهد بود.

بعد از ساده سازی رابطه (22) مدل دینامیکی ربات به صورت (23) نمایش داده میشود.

$$D_0(q)\ddot{q} + C_0(q,\dot{q})\dot{q} + G_0(q) = u + \eta(\ddot{q},\dot{q},q,b)$$

$$\eta = -\{\Delta D\ddot{q} + \Delta C\dot{q} + \Delta Gq + F_r - b\}$$
(23)

رای ضمانت اینکه کنترلکننده طراحی شده نسبت به نامعینیها مقاوم بوده سیستم ناپایدار نیست، باید میزان نامعینی تابع η به بردار کنترلی افزوده نود. باتوجه به اینکه میزان η نامشخص است، تخمینی از میزان واقعی امعینی ربات (η) به کاربرده می شود. این تخمین از نامعینی با $\eta_{\rm est}$ نمایش

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

نمود که همواره مثبت معین باشد، در این صورت e_n همواره همگرا به صفر خواهد بود. از سوی دیگر ماتریس اینرسی ربات (D_0) همواره مثبت معین بوده، در نتیجه میزان بهره رویتگر را به صورت (36) فرض نمود. (36) $\overline{L}(q, \dot{q}) = LD_0^{-1}(q)$ (36) $(J = LD_0^{-1}(q)(q) - (q)(q) = (R
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1 + Q
e 1$

$$\dot{\eta}_{est} = -LD_0^{-1}(q)\eta_{est} + L[\ddot{q} + D_0^{-1}(q)(C_0(q, \dot{q})\dot{q} + G_0(q) - u(t))]$$
(39)

از معادله معرفی شده در رابطه (39) و همچنین با جایگذاری قانون کنترل پیشبین غیر خطی معرفی شده در رابطهی (24) و معادلهی(38)، دینامیک تخمین نامعینیها بهدست میآید.

$$\dot{\eta}_{\text{est}} = L(\ddot{e}_{q}(t) + K_{d}\dot{e}_{q}(t) + K_{p}e_{q}(t))$$
(40)

با انتگرال گیری از رابطهی (40) و همچنین جایگذاری آن در قانون کنترلی (24)، معادله (41) بهدست خواهد آمد.

$$u(t) = -D_{0}(q) \{ K_{p}e_{q} + K_{d}\dot{e}_{q} - D_{0}(q)^{-1} (C_{0}(q,\dot{q})\dot{q} + G_{0}(q)) - \ddot{q}_{r} \} - L[\dot{e}_{q}(t) + K_{d}e_{q}(t) + K_{p} \int e_{q}(t) dt]$$
(41)

4-شبيەسازى

نمود.

در این بخش برای اعتبارسنجی کنترلکننده طراحی شده، به شبیهسازی ربات استوارت و بررسی عملکرد کنترلکننده پرداخته میشود. در شبیهسازی صورت گرفته، مقادیر سکوی استوارت به صورت جدول 1 انتخاب می گردد. به منظور انجام شبیه سازی مسیری دلخواه برای ربات در نظر گرفته میشود. مسیر طراحی شده برای حرکت در راستای 1x، حرکت در راستای 2^y و حرکت در راستای 3^c مطابق شکل 6 می باشد. مسیر طراحی شده برای

جدول 1 مشخصات فیزیکی ربات

Table 1 Physical Properties re	obot
مقدار عددی	مشخصات فیزیکی و یا هندسی
50 (kg)	جرم صفحه متحرک (فوقانی)
2.075 (m)	شعاع صفحه متحرك
2350 (kg)	جرم بار روی صفحه متحرک
2.082 (m)	فاصله صفحهی فوقانی از مبدا
140 (kg)	جرم لينكها
2.5 (m)	طول لينكها
26.25 (Nm)	گشتاور نامی موتور
78.76 (Nm)	حداكثر گشتاور موتور

با اعمال بردار کنترلی محاسبه شده در رابطه (24) و جایگذاری آن در رابطهی

(23)، مدل دینامیکی خطای ردیابی مسیر مرجع ربات بدست خواهد آمد.

$$\ddot{e}_{q}(t) + K_{d}\dot{e}_{q}(t) + K_{p}e_{q}(t) = D_{0}^{-1}(q)e_{\eta}(t)$$

$$e_{\eta} = \eta - \eta_{est}$$
(25)

معادلهی (25) را میتوان به فرم فضای حالت نوشت. بدین منظور متغیرهای فضای حالت به صورت $X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} e & e \end{bmatrix}^T$ در نظر گرفته شدهاست. $\dot{X} = AX + BD_0^{-1}e_n$

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{6\times6} & I_{6\times6} \\ -K_{p} & -K_{d} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{6\times6} \\ I_{6\times6} \end{bmatrix}$$
(26)

باتوجه به اینکه $K_p \in K_d$ و K_d هردو مثبت میباشند، لذا ماتریس A دارای مقادیر ویژه سمت راست نبوده و به عبارتی دیگر هوریتز است. لذا بنا به قاعده لیاپانوف میتوان گفت که برای هر ماتریس مثبت معین Q ، ماتریس مثبت معین P وجود دارد که در رابطه (27)زیر صدق نماید.

$$A^{\mathrm{T}}P + PA = -Q \tag{27}$$

$$V = X^{\mathrm{T}} P X + e_{\eta}^{\mathrm{T}} \Gamma e_{\eta}$$
⁽²⁸⁾

$$\dot{V} = -X^{\mathrm{T}}QX + 2e_{\eta}^{\mathrm{T}} \{(D_{0}^{-1})^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}PX + \Gamma \dot{e}_{\eta}\}$$
 (29)
حال اگر با توجه به رابطه (29) ، معادله (30) فرض گردد:

$$\dot{e}_{\eta} = -\Gamma^{-1} \left(D_0^{-1} \right)^{\mathrm{T}} B^{\mathrm{T}} P X \tag{30}$$

مشتق تابع لیاپانوف همواره منفی خواهد شد.

$$\dot{Y} = -X^{\mathrm{T}}QX \tag{31}$$

که باتوجه به نظریه لیاپانوف، $(t)_{e_{\eta}} \in X$ همواره کراندار و محدود خواهند بود. همان گونه که در بخش سوم مرجع [19] بیان شده است و با توجه به اینکه به طور کلی، هیچ اطلاعات قبلی در مورد مشتق و تغییرات نامعینیها موجود نیست، میتوان فرض کرد که $\eta = 0$ باشد و در نتیجه مشتق خطای تخمین به صورت رابطهی (32) خواهد بود.

$$\dot{e}_{\eta} = \dot{\eta} - \dot{\eta}_{\text{est}} = \mathbf{0} - \dot{\eta}_{\text{est}} = -\dot{\eta}_{\text{est}}$$
(32)

این فرض مقدار نامعینیها را ثابت و در نتیجه میزان تغییرات آنها را صفر فرض مینماید. در این صورت با استفاده از معادلهی (30) رابطه (33) حاصل خواهد شد.

$$\dot{\eta}_{\text{est}} = -\dot{e}_{\eta} = \Gamma^{-1} (D_0^{-1})^{\mathrm{T}} B^{\mathrm{T}} P X$$
(33)

 $\eta = \mathbf{0}$ همواره محدود بوده و همچین با توجه به اینکه $e_{\eta}(t)$

جه گرفت که $\eta_{ m est}$ همواره محدود خواهد بود.	مىتوان نتي
ویتگر غیرخطی معرفی شده در مرجع [17]، رابطه (34) حاصل	باتوجه به ر
	خواهد شد.
$\dot{\eta}_{\rm est} = \overline{L}(q, \dot{q})\eta - \overline{L}(q, \dot{q})\eta_{\rm est} = \overline{L}(q, \dot{q})e_{\eta}$	(34)
بهرهی رویتگر بوده و $L \in \Re^{n imes n}$ خواهد بود. با ساده \overline{L} (34)	در رابطهی
ی (34) نتیجه میشود که:	سازی رابطه
$\dot{e}_{\eta} + \overline{L}(q,\dot{q})e_{\eta} = 0$	(35)
لخواه بودن مقدار ماتریس \overline{L} ، میتوان آن را به گونهای انتخاب.	باتوجه به د

1- Moving along the x axes (surge)
 2- Moving along the y axes (sway)
 3- Moving along the z axes (heave)

دوران حول محور x^{1} ، دوران حول محور y^{2} و دوران حول محور x^{3} مطابق شکل 7 است.

از جمله نکاتی که باید هنگام شبیه سازی به آن توجه کرد، میزان حداکثر توان موتورهای محرکها است. برای شبیهسازی ربات در این پژوهش حداکثر گشتاور موتورها مقدار محدودی مطابق جدول 1 که به عنوان ورودی کنترلی ربات میباشد، در نظر گرفته شده است.

کنترل کننده ی معرفی شده در این تحقیق با روشهای کنترلی گشتاورمحاسبه شده⁴، کنترل کنندهی مد لغزشی⁵ و کنترل کنندهی تناسبی -انتگرال گیر -مشتق گیر⁶ مقایسه شده و هر کدام از کنترل کنندهها در مدل شبیه سازی شده ربات استوارت مورد بررسی قرار گرفته است.

باتوجه به مرجع [22] کنترل کننده ی PID دارای بهرههای تناسبی، انتگرالی و مشتقی بسیار بزرگی خواهد بود. بزرگ بودن این بهرهها باعث می شود که با کوچکترین مقدار اغتشاش، فرمان کنترلی بسیار بزرگ شود؛ بنابراین در صورتی که فرمان کنترلی محدود شود، امکان اعمال فرمان کنترلی مناسب برای کاهش دادن خطا وجود ندارد و ردیابی مسیر توسط ربات بسیار نامناسب خواهد شد. لذا در صورت محدود بودن مقدار گشتاور تولیدی موتور، کنترل کننده ی PID خطای ردیابی بسیار زیادی دارد. باتوجه به مسیر دلخواه نشان داده شده درشکلهای 5 و 6، خطای ردیابی این کنترل کننده مطابق شکلهای 8 و 9 خواهد بود. لذا در ادامه ی پژوهش از مقایسه این کنترل کننده با سایر کنترل کننده ها صرف نظر می گردد.

با استفاده کردن از کنترل کنندههای مدلغزشی، گشتاور محاسبه شده و کنترل غیرخطی پیشبین، میزان خطای ردیابی کردن مسیر مرجع به صفر همگرا خواهد شد. مقایسه میزان اندازه خطای ردیابی توسط سه روش گفته شده در شکل 10 نشان داده شده است.

در این پژوهش برای مقایسه میزان خطای کنترل کنندهها از معیارهای ⁸ انتگرال مجذورخطا⁷ (ISE)، انتگرال حاصل ضرب زمان در مجذور خطا⁸ (ITSE) و همچنین انتگرال قدرمطلق خطا⁹ (IAE) استفاده شده است.

از نظر معیار انتگرال قدرمطلق خطا، میزان اهمیت خطا از ابتدا تا انتهای مسیر یکسان بوده و این معیار، قدرمطلق میزان اختلاف مسیر پیموده شده با مسیر مورد نظر را اندازه گیری مینماید.





Fig. 7 Desired trajectory rotation around the x, y and z axes





Fig. 8 Error of tracking desired trajectory moving along the x, y and z axes with PID controller

شکل 8 خطای ردیابی مسیر دلخواه حرکت ربات در راستای محورهای*y , X* و z با استفاده از کنترلکننده PID



Fig. 9 Error of tracking desired trajectory rotation around the x, y and z axes with PID controller

شکل 9 خطای ردیاب مسیر دلخواه دوران ربات حول محورهای *y , x* و z با استفاده از کنترلکننده PID

باتوجه به معیار انتگرال مجذور خطا، میزان اهمیت خطا از ابتدا تا انتهای مسیر یکسان نخواهد بود. از نظر این معیار هرچقدر خطا کمتر باشد، میزان اهمیت آن نیز کمتر خواهد بود و این متفاوت بودن اهمیت به گونه ای است که خطاهای ناچیز تقریبا بی اهمیت و رفتهرفته با افزایش خطا میزان اهمیت

47

با نسبت توان دوم خطا افزایش مییابد.
از نظر معیار انتگرال حاصلضرب زمان در مجذور خطا، میزان اهمیت
خطا در ابتدا و انتهای مسیر یکسان نیست. در این معیار با افزایش زمان
رفتهرفته بر میزان اهمیت خطا نیز افزوده میشود و میزان خطای نهایی
سیستم اهمیت به سزایی خواهد داشت.
کنترلکنندهی مدلغزشی باتوجه به میزان خطا در ابتدای مسیر،
معیارهای IAE و ISE نسبت به دو روش دیگر مقدار زیادتری را نشان خواهد
داد ولی باتوجه به پاسخ نهایی بهتر این کنترلکننده معیار ITSE، کمتر
خواهد بود. روش پیشنهادی در این پژوهش با توجه به افزایش یافتن سرعت

0 1 2 <u>3</u> 4 5 6 *Time* (s)

Fig. 6 Desired trajectory moving along the x ,y and z axes

شکل 6 مسیر دلخواه حرکت ربات در راستای محورهای *y, x* و z

Rotation around the x axes (roll)
 Rotation around the y axes (pitch)
 Rotation around the z axes (yaw)
 Computed Torque Control (CTC)
 Sliding mode control (SMC)
 Proportional-Integrator-Differentiation (PID)
 Integral Square Error (ISE)
 Integral Time Square Error (ITSE)
 Integral Absolute Error (IAE)

همگرایی به مسیر دلخواه و اندازه خطای ردیابی کمتر نسبت به روش کنترلی گشتاور محاسبه شده معیارهای ISE، IAE و ITSE کمتر خواهند بود. در جدول 2 مقادر معیارهای مختلف گفته شده برای هر سه کنترلکننده نشان داده شده است.

شکل 11 مسیر حرکت ربات در راستای محورهای y،x و Z و همچنین مسیر دوران ربات حول محورهای x، Y و Z را نمایش میدهد. در صورتی که مرکز صفحه متحرک ربات (صفحهی فوقانی) بعنوان مبدا در نظر گرفته شود، شکل 12 نمایش حرکت این نقطه در صفحه مختصات XyZ خواهد بود.

بردار کنترلی ربات استوارت، در واقعیت گشتاور موتورهای محرکها بوده و گشتاورموتورهای سروالکتریک نیز با جریان الکتریکی ورودی رابطهای مستقیم دارد، لذا با کاهش یافتن میزان تلاش کنترلی به نوعی در میزان مصرف انرژی صرفهجویی شده است.

برای هریک از انواع روشهای کنترلی مورد بحث در این پژوهش، نمودارمجموع تلاش کنترلی آنها در شکل 13 نشان داده شده است.

جدول 2 مقادیر معیارهای ISE، IAE و ITSE هر سه کنترل کننده Table 2 IAE, ISE and ITSE of controllers

معیار اندازہ گیری خطا	SMC	СТС	NPC
انتگرال قدرمطلق خطا (IAE)	2317.6	580.6844	420.8499
انتگرال مجذورخطا (ISE)	753.2672	45.2672	41.5006
انتگرال حاصلضرب زمان در مجذور خطا (ITSE)	0.3317	1.2206	1.1532





شکل 10 اندازهی مجموع خطای ردیابی مسیر دلخواه





Fig. 12 Three-dimensional movement of the movable plate

شکل 12 نمایش سه بعدی حرکت مرکز صفحه متحرک



Fig. 13 Absolute total control effort of controllers (Torque actuators)

شکل 13 مجموع اندازه تلاش کنترلی کنترلکنندهها **(**گشتاور موتور محرکها)

5-نتيجه گيري

در این پژوهش معادلات دینامیکی ساختار ربات شش درجه آزادی استوارت به صورت مختصر معرفی و سپس معادلات دینامیکی محرکهای الکترومکانیکی سکو نمایش داده شده است.

در ادامه به معرفی کنترلپیشبین غیرخطی پرداخته شده که به نوعی ترکیبی از دو روش کنترلگشتاور محاسبه شده و کنترلپیشبین میباشد. کنترلپیشبین غیرخطی با در نظر گرفتن نامعینیهای مختلف سیستم از قبیل عدم دقت محاسبات، وجود اصطکاک ، تغییر در فیزیک قطعات ربات و غیره ابتدا تخمینی مناسب از نامعینیهای سیستم بدست آورده شده و سپس در قانون کنترلی مورد نظر قرار داده شدهاست.

به منظور مقایسه ی روش پیشنهادی با دیگر روش های کنترلی مرسوم، کنترل کننده های گشتاور محاسبه شده، مد لغزشی و همچنین تناسبی-

Fig. 11 Trajectory of robot with NPC

شکل 11 مسیرحرکت ربات با کنترلکنندهی پیش بین غیر خطی

انتگرال گیر-مشتق گیر نیز مورد بررسی قرار گرفتهاند. نتایج حاصل از شبیه سازی ها نشان می دهد که کنترل کننده ی تناسبی -انتگرال گیر -مشتق گیر با فرض محدود بودن محدود بودن سیگنال کنترلی، ردیابی بسیار نامناسبی از مسیر مرجع را خواهد داشت و همچنین دیگر روش های کنترلی نسبت به کنترل کننده ی پیشبین غیر خطی، عملکرد ضعیف تری را خواهند داشت. در روش پیشنهاد شده در این پژوهش، میزان تلاش کنترلی کمتری در مقایسه با سایر روش های ذکر شده، نیاز خواهد بود. نتایج حاصل از شبیه سازی کارآمدی روش پیشنهاد شده (کنترل پیش بین غیر خطی) را نشان می دهد. این روش با توجه به در نظر گرفتن

نامعینی و همچنین اعمال محدودیت در ورودی کنترلی قابلیت پیادهسازی عملي را نيز دارد.

6-فهرست علائم

$$a$$
 بردار شتاب مرکز صفحه متحرک (فوقانی)
 b_i بردار موقعیت i_{-1} مین بازو در صفحه زیرین
 b_i بردار کوریولیس و مرکزگرا
 D ماتریس اینرسی
 p مختصات دکارتی بردار خطا ردیابی مسیر
 p مختصات دکارتی بردار خطا ردیابی مسیر
 F_i نیروی محرک تولید شده توسط موتور محرک
 F_i نیروی محرک تولید شده توسط موتور محرک
 f_i ماتریس ممان اینرسی صفحه متحرک
 $J_{1,\omega}$ $J_{1,\omega}$
 $J_{1,\omega}$ $J_{1,\omega}$ $J_{1,\omega}$
 L_i ماتریس ژاکوبین مربوط به p و i $J_{1,\mu}$
 L_i ماتریس ژاکوبین مربوط به p و i $J_{1,\mu}$
 F_i مول لینک I_{-1} م
 p_i بردار موقعیت لینک I_{-1} م در صفحه فوقانی
 q_r $(q_p)_i$
 Q_i ماتریس دوران ربات
 R مردار موقعیت مرکز گرانش
 R بردار یکه در جهت لینک I_{-1} م
 V_i بردار دینامیکی بازو I_{-1} م

علائم يونانى

- Θ بردار زوایای اویلر
- w سرعت زاویهای
 - شتاب زاویهای α
- گشتاور تولید شدہ توسط الکتروموتور محرک i-ام au_{i}

بالانويسها

T ترانهاده ماتریس

زيرنويسها

7-پيوست

- *i* نشان دهنده لینک *i*-ام
- بخش ثابت یک ماتریس
- r مقادیر واقعی و خوانده شده

 $C_{p} = \begin{bmatrix} M\omega \times (\omega \times R) \\ \omega \times I_{p}\omega + MR \times (\omega \cdot R)\omega \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M\tilde{R} \\ M\tilde{R}\tilde{R} - I_{p} \end{bmatrix} \overset{\cdot}{\Re}_{\omega} \dot{\Theta}$

$$C_{a} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{6} \boldsymbol{C}_{c} \boldsymbol{j}_{i} \\ \sum_{i=1}^{6} \boldsymbol{C}_{q} \boldsymbol{j}_{i} \times \boldsymbol{V}_{c} \boldsymbol{j}_{i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{6} \boldsymbol{Q}_{i} (\boldsymbol{\tilde{q}}_{p})_{i} \boldsymbol{j} \\ \sum_{i=1}^{6} \boldsymbol{C}_{q} \boldsymbol{j}_{p} \boldsymbol{j}_{i} \boldsymbol{Q}_{i} (\boldsymbol{\tilde{q}}_{p})_{i} \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\mathfrak{R}}}_{\omega} \dot{\boldsymbol{\Theta}}$$
(45)

(44)

$$G_{\rm p} = -\begin{bmatrix} Mg\\ MR \times g \end{bmatrix} \tag{46}$$

$$G_{a} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{6} (V_{g})_{i} \\ \sum_{i=1}^{6} ((q_{p})_{i} \times (V_{g})_{i}) \end{bmatrix}$$
(47)

$$B_{t} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{6} (V_{f})_{i} \\ \sum_{i=1}^{6} ((q_{p})_{i} \times (V_{g})_{i}) - f_{i} \end{bmatrix}$$
(48)

$$(V)_i = (V_c)_i + (V_g)_i + (V_f)_i$$
(49)

که در روابط فوق $(V_c)_i$ و $(V_g)_i$ دینامیک لینک i-ام و همچنین $(V_c)_i$ نیروی اصطکاک مفصل *i*-ام میباشد.

$$\mathfrak{R}_{\omega} = \begin{bmatrix} C\psi C\theta & -S\psi & \mathbf{0} \\ C\theta S\psi & C\psi & \mathbf{0} \\ -S\psi & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}$$
(50)

$$c_{l,\omega} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 & s_5 & s_6 \\ q_1 \times s_1 & q_2 \times s_2 & q_3 \times s_3 & q_4 \times s_4 & q_5 \times s_5 & q_6 \times s_6 \end{bmatrix}$$
(51)

$$J_{l,q} = J_{l,\omega} J_{\omega,q} \tag{52}$$

که در رابطه (52)
$$J_{\omega,q}$$
 به صورت (53) خواهد بود.
 $J_{\omega,q} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Re_{\omega} \end{bmatrix}$ (53)

$$K_{a} = \begin{bmatrix} K_{a} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & K_{a} \end{bmatrix}; K_{a} = \frac{2\pi\eta}{p^{2}}$$
(54)

$$D_{\rm a} = \begin{bmatrix} D_{\rm a} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & D_{\rm a} \end{bmatrix}; D_{\rm a} = \frac{J_{\rm t} \mathbf{4} \pi^2 \eta}{p^2}$$
(55)

$$B_{a} = \begin{vmatrix} B_{a} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & B \end{vmatrix} ; B_{a} = \frac{B_{t} \mathbf{4} \pi^{2} \eta}{p^{2}}$$
(56)

 B_{a} که در رابطهی (54) تا p (56) و η ضرایب بال اسکرو بوده و $J_{
m t}$ و $B_{
m t}$ مقادیر اینرسی و اصطکاک بین روتور و بالاسکرو میباشد.

[1] D. Stewart, A platform with six degrees of freedom, *Proceedings* of the institution of mechanical engineers, Vol. 180, No. 1, pp. 371-386, 1965.

8-مراجع

- [2] S.-H. Lee, J.-B. Song, W.-C. Choi, D. Hong, Position control of a Stewart platform using inverse dynamics control with approximate dynamics, Mechatronics, Vol. 13, No. 6, pp. 605–619, 2003.
- [3] M. Becerra-Vargas E. Morgado Belo, Application of H^{∞} ; theory to

ماتریس به کار برده شده در معادله دینامیک عبارتند از: $M_{\rm p} = \begin{bmatrix} MI & -M\tilde{R}\Re_{\omega} \\ M\tilde{R} & (I_{\rm p} - M\tilde{R}\tilde{R})\Re_{\omega} \end{bmatrix}$ (42) $M_{a} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{6} Q_{i} & -\sum_{i=1}^{6} Q_{i} (\tilde{q}_{p})_{i} \Re_{\omega} \\ \sum_{i=1}^{6} (\tilde{q}_{p}) Q_{i} & -\sum_{i=1}^{6} (\tilde{q}_{p})_{i} Q_{i} (\tilde{q}_{p})_{i} \Re_{\omega} \end{bmatrix}$ (43)

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

مجتبى قربانى و سيدكمال حسينى ثانى

- [13] W. Meng, Z. De Zhou, Q. Liu, Q.S.Ai, A Practical Fuzzy Adaptive Control Strategy for Multi-dof Parallel Robot, *Applied Mechanics* and Materials, Vol. 347, No. 1, pp. 661–665, 2013
- [14] D. Wu, H. Gu, and P. Li, Adaptive Fuzzy Control of Stewart Platform under Actuator Saturation, *World Academy of Science*, *Engineering and Technology*, Vol. 60, No.1, pp. 680–684, 2009.
- [15] L. Lin , M. Tsay, Modeling and control of micropositioning systems using Stewart platforms, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 17, No. 1, pp. 17–52, 2000.
- [16] Y. Pi ,X. Wang, Trajectory tracking control of a 6-DOF hydraulic parallel robot manipulator with uncertain load disturbances, *Control Engineering Practice*, Vol. 19, No. 2, pp. 185–193, 2011.
- [17] R. Roovers, S.-H. Chen, L.-C. Fu, Output feedback sliding mode control for a Stewart platform with a nonlinear observer-based forward kinematics solution, *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, Vol. 21, No. 1, pp. 176–185, 2013.
- [18]C. C. Nguyen, S. S. Antrazi, Z. Zhou, C. E. Campbell, Adaptive control of a stewart platform based manipulator, *Journal of Robotic* systems, Vol. 10, No. 5, pp. 657–687, 1993.
- [19] W. Feng, J. O'Reilly, D. J. Ballance, MIMO nonlinear PID predictive controller, *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, Vol. 149, No. 3, pp. 203–208, 2002.
- [20] A. Merabet, J. Gu, Robust nonlinear predictive control based on state estimation for robot manipulator, *International Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 5, No. 1, pp. 48–64, 2008.
- [21] K.D. Nguyen, H. Dankowicz, Adaptive control of underactuated robots with unmodeled dynamics, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 64, No.1, pp. 84–99, 2015.
- [22] N. Smith , J. Wendlandt, Creating a Stewart Platform Model Using SimMechanics, *Matlab Digest*, Vol. 10, No. 5, pp.11-21, 2002.

a 6 DOF flight simulator motion base, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 34, No. 2, pp. 193–204, 2012.

- [4] Y. X. Su, B. Y. Duan, C. H. Zheng, Y. F. Zhang, G. D. Chen, J. W. Mi, Disturbance-rejection high-precision motion control of a Stewart platform, *Control Systems Technology, IEEE Transactions* on., Vol. 12, No. 3, pp. 364–374, 2004.
- [5] G. Lebret, K. Liu, F. L. Lewis, Dynamic analysis and control of a stewart platform manipulator, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, No. 5, pp. 629–655, 1993.
- [6] C. C. Nguyen, S. S. Antrazi, Z.-L. Zhou, C. E. Campbell, Adaptive control of a Stewart platform-based manipulator, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, No. 5, pp. 657–687, 1993.
- [7] X. Zhu, G. Tao, B. Yao, J. Cao, Adaptive robust posture control of a parallel manipulator driven by pneumatic muscles, *Automatica*, Vol. 44, No. 9, pp. 2248–2257, 2008.
- [8] S. Iqbal, A. I. Bhatti, Robust sliding-mode controller design for a Stewart platform, *Proceedings of International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, IBCAST*, No.12, pp. 155–160, 2007.
- [9] M. R. Sirouspour ,S. E. Salcudean, Nonlinear control of hydraulic robots, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 2, pp. 173–182, 2001.
- [10] K. S. Grewal, R. Dixon, J. Pearson, LQG controller design applied to a pneumatic stewart-gough platform, *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 9, No. 1, pp. 45–53, 2012.
- [11] W. Dongsu G. Hongbin, Adaptive sliding control of six-DOF flight simulator motion platform, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 20, No. 5, pp. 425–433, 2007.
- [12] Y. Bo, P. Zhongcai, T. Zhiyong, Fuzzy PID control of Stewart platform, *Proceedings of 2011 International Conference on Fluid Power and Mechatronics*, No. 1, pp. 763–768, 2011.

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1