



کنترل چند متغیره پیش بین غیر خطی برای ردیابی مسیر یک نوع ربات موازی دلتا

محمود مزارع¹، مصطفی تقی زاده^{2*}، مهدی پورقلی³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

3- استادیار، مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

* تهران، صندوق پستی 1743524155 sbu.ac.ir taghizadeh@mo_

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 آذر 1396

پذیرش: 08 اسفند 1396

ارائه در سایت: 26 اسفند 1396

کلید واژگان:

ربات موازی

مدل سازی دینامیکی

معادلات سیستم مقید

کنترل پیش بین مقاوم

چکیده

در این مقاله، کنترل کننده پیش بین غیرخطی مقاوم بهینه بر مبنای الگوریتم جستجوی هارمونی برای یک نوع ربات موازی سه درجه آزادی انتقالی طراحی شده است. مدل دینامیکی مکانیزم با استفاده از روش لاگرانژ استخراج شده و کنترل کننده پیش بین به همراه تخمین گر عدم قطعیت، طراحی و پایداری آن با استفاده از تئوری لیاپانوف اثبات شده است. عملکرد کنترل کننده طراحی شده در شرایط مختلف از جمله در حضور اغتشاش و تغییر پارامترهای سیستم، شبیه سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، یک مسیر بهینه برای ربات در حضور چهار مانع دایروی طراحی شده و به عنوان مسیر مطلوب به ربات داده شده است. برای تعیین پارامترهای کنترلی بهینه، یک تابع هزینه به صورت ترکیبی از نرخ تغییرات ورودی کنترلی و خطا در نظر گرفته شده و به الگوریتم جستجوی هارمونی جهت کمینه سازی داده شده است. به منظور مقایسه عملکرد کنترل کننده طراحی شده با سایر کنترل کننده های غیرخطی، دو کنترل کننده مدل لغزشی بهینه و خطی سازی پس خورد بهینه نیز طراحی و نتایج آن ها با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج بیانگر عملکرد مطلوب هر سه کنترل کننده در شرایط وجود اغتشاش و عدم قطعیت های مدل می باشند، اگرچه معیارهای خطا برتری کنترل کننده پیش بین غیرخطی مقاوم را نسبت به دو کنترل کننده دیگر نشان می دهند.

Nonlinear Model Predictive Multivariable Control for Trajectory Tracking of a Type of Delta-Parallel Robot

Mahmood Mazare¹, Mostafa Taghizadeh^{2*}, Mahdi Pourgholi¹

1- School of Mechanical engineering, ShahidBeheshti University, Tehran, Iran

2- School of Electrical Engineering, ShahidBeheshtiUniversity, Tehran, Iran

*P.O.B. 1743524155, Tehran, Iran, mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 21 December 2017

Accepted 27 February 2018

Available Online 17 March 2018

Keywords:

Parallel manipulator

dynamic modeling

constrained systems equations

robust model predictive control

ABSTRACT

In this paper, an optimal robust nonlinear model predictive controller based on harmony search algorithm is designed for a type of 3-DOF translational parallel robot. Dynamic model of the mechanism is derived using Lagrange method and the model predictive controller augmented by uncertainty estimator is designed and stability is proved by Lyapunov theorem. Performance of the designed controller is evaluated in different conditions such as presence of disturbance and parameter variation. Furthermore, an optimal trajectory consisting four circular obstacles is designed as the reference trajectory of the robot. In order to obtain the optimum control parameters, an objective function combining control signal rate and error is considered and minimized by harmony search algorithm. In order to compare the performance of the designed controller with other nonlinear controllers, two controllers, an optimal sliding mode and a feedback linearization controller are also designed and their results are compared. Simulation results depict the desirable performance of the three controllers in spite of disturbance and model uncertainty, however, error criteria indicate priority of the robust nonlinear model predictive controller over the two other controllers.

1- مقدمه

دینامیکی و موقعیت مناسب سیستم عملگرها می باشند. از این رو مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته اند [1].

دستیابی به مدل دینامیکی دقیق و منطبق بر واقعیت برای رباتهای موازی نیز از جمله مسائل پیش روی محققان این حوزه بوده است. از آنجایی که دینامیک ربات بسته به نوع کاربرد دارای تغییرات در رفتار خود می باشد، در نتیجه کنترل چنین سیستمی کار نسبتاً پیچیده و دشواری خواهد بود. بنابراین باید سعی در طراحی کنترل کننده ای شود که تا سرحد امکان در مقابل این تغییرات و عدم قطعیتها مقاومت قابل قبولی از خود ارائه

بسیاری از سیستم های غیرخطی به صورت ذاتی چند ورودی-چند خروجی با کوپلینگ دینامیکی بین ورودی ها و خروجی ها می باشند که از این جمله می توان به ربات های موازی اشاره نمود. ربات موازی سه درجه آزادی یک مکانیزم با سه زنجیره سینماتیکی بسته بوده که مجری نهایی دارای سه درجه آزادی انتقالی است. این مکانیزم با توجه به ساختار خود، دارای کاربردهای فراوانی در صنعت و پزشکی می باشد. ربات های موازی دارای ویژگی هایی از قبیل صلبیت بالا، دقت و جهت گیری بهتر، عملکرد پایدارتر، ظرفیت بالای بار

Please cite this article using:

M. Mazare, M. Taghizadeh, M. Pourgholi, Nonlinear Model Predictive Multivariable Control for Trajectory Tracking of a Type of Delta-Parallel Robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 04, pp. 117-125, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Mazare, M. Taghizadeh, M. Pourgholi, Nonlinear Model Predictive Multivariable Control for Trajectory Tracking of a Type of Delta-Parallel Robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 04, pp. 117-125, 2018 (in Persian)

شده بود [20]. همچنین، جعفری و همکاران نیز به تحلیل ژاکوبین و کنترل تطبیقی یک ربات کابلی شش درجه آزادی پرداختند [21]. همچنین یک رهیافت کنترل تطبیقی مقاوم به همراه تخمین‌گر عدم قطعیت در مرجع [22] پیشنهاد شده است که در آن تمامی عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات خارجی در یک ترم فشرده شده سپس بر مبنای تابع لیاپانوف انتخابی، قانون تخمین استخراج و پایداری کنترل‌کننده پیشنهادی نیز نشان داده شده است. طراحی مسیر بخش مهمی از سیستم کنترلی در سیستم‌های رباتیک است. حرکت روی مسیر موردنظر باید تا حد ممکن آرام و پیوسته باشد تا تغییرات ناگهانی در موقعیت، سرعت و شتاب رخ ندهد.

با توجه به ویژگی‌های برجسته روش کنترلی پیش‌بین از قبیل میزان مقاوم بودن به دلیل بخش انتگرالی ذاتی در ساختار کنترل‌کننده و همچنین امکان اعمال قیود روی متغیرهای سیستم در طراحی کنترل‌کننده، در این مقاله به طراحی یک کنترل‌کننده مناسب برای یک نوع ربات موازی دلتا پرداخته شده است. از این‌رو، ابتدا با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ معادلات مدل دینامیکی ربات موازی 3-PUU استخراج شده و به منظور کنترل موقعیت ربات مذکور، با استفاده از روش کنترل پیش‌بین غیرخطی یک کنترل‌کننده چند متغیره نیز طراحی شده است. با استفاده از تکنیک کنترل پیش‌بین بر مبنای حداقل کردن یک تابع هدف، بهینه‌ترین سیگنال کنترلی را در یک افق پیش‌بین معین محاسبه می‌شود سپس به منظور تحلیل پایداری و مقاوم کردن کنترل‌کننده طراحی شده، یک تخمین‌گر عدم قطعیت طراحی شده و ورودی کنترلی نیز اصلاح شده است. کنترل‌کننده پیشنهادی نسبت به سایر کنترل‌کننده‌ها از حجم بالای محاسباتی برخوردار نبوده و از دقت مناسبی برخوردار است. در ادامه، یک مسیر در حضور چهار مانع دایره‌ای طراحی شده و به عنوان مسیر مرجع برای ردیابی به ربات داده شده است. همچنین برای حفظ پیوستگی سرعت و شتاب، در طراحی مسیر ربات از منحنی‌های اسپیرالین استفاده شده است. لازم به ذکر است به منظور مقایسه، دو کنترل‌کننده مد لغزشی و خطی‌سازی فیدبک نیز طراحی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه کنترل‌کننده با هم مقایسه شده‌اند.

ساختار این مقاله بدین ترتیب است: در قسمت 2 مکانیزم طراحی شده معرفی شده است. سپس در قسمت 3 به تحلیل سینماتیک ربات که شامل سینماتیک معکوس است، پرداخته شده و در قسمت 4 مدل‌سازی دینامیکی ربات آورده شده است. در قسمت 5 کنترل پیش‌بین غیرخطی ارائه و طراحی شده است. در قسمت 6 به طراحی مسیر با استفاده از منحنی‌های اسپیرالین اشاره شده و در قسمت‌های 7 و 8 نتایج تکنیک کنترل در دو شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری ذکر شده است.

2- مدل دینامیکی ربات

مطابق "شکل 1"، با نوشتن روابط هندسی طول لینک‌ها و ساده‌سازی ریاضی معادله سینماتیک ربات که در واقع همان معادله قید می‌باشد به صورت رابطه (1) قابل بیان است.

$$f_k = q_k^2 + 2z_p q_k + (x_p + (d-b)\cos\alpha_k)^2 + (y_p + (d-b)\sin\alpha_k)^2 + z_p^2 - l^2 = 0, \quad (k = 1, 2, 3) \quad (1)$$

که q_k موقعیت لغزنده‌ها و x_p, y_p و z_p موقعیت مجری نهایی سیستم را نشان می‌دهند. این سه معادله (f_k)، معادلات قید سیستم را تشکیل می‌دهند. مقادیر پارامترهای فیزیکی مکانیزم که در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته در جدول 1 آمده است.

کند. در نتیجه نیاز به یک استراتژی کنترلی برای مقابله با عدم قطعیت‌های موجود بیش از پیش حس می‌شود. به‌منظور کنترل چنین سیستم‌هایی، محققان بسیاری سعی در طراحی کنترل‌کننده‌های مختلف نموده‌اند. از جمله روش‌های کنترلی به‌کار گرفته شده در این حوزه، می‌توان به روش‌های غیرخطی، مقاوم و تطبیقی، هوشمند و ترکیب این روش‌ها اشاره نمود [2-4].

ربات‌های موازی به دلیل آن‌که دارای دینامیک مقید می‌باشند از این‌رو کنترل آن‌ها را با مشکل مواجه کرده و از مسائل بحث برانگیز در زمینه کنترل ربات‌ها است. در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های زیادی برای طراحی و بهبود کنترل‌کننده برای سیستم‌های دارای عدم قطعیت انجام شده است. ایده استفاده از روش‌های کنترل مقاوم توسط محققین بسیاری برای کنترل مکانیزم‌های موازی ارائه شده است. در این راستا، سی‌هان لی به‌منظور کنترل موقعیت مکانیزم موازی شش درجه آزادی، با تلفیق دینامیک معکوس و کنترل‌کننده H^∞ یک کنترل‌کننده طراحی نمودند. به‌منظور مقابله با خطای ناشی از مدل‌سازی و از بین بردن اثر اغتشاش، از رهیافت کنترل مقاوم H^∞ در حلقه بیرونی دینامیک معکوس استفاده کردند [7]. مرجع [8] کنترل‌کننده مقاوم برای یک سکوی موازی شش درجه آزادی با قابلیت حذف اغتشاش در فضای مفصلی و به‌منظور کنترل ردیابی دقت بالا را پیشنهاد کرده است. همچنین از یک مشتق‌گیر غیرخطی در مسیر پیش‌رو و یک مشاهده‌گر حالت تعمیم یافته در مسیر بازخورد، استفاده شده است.

از دیگر روش‌های مقاوم که در مقابله با عدم قطعیت به‌کار گرفته می‌شوند می‌توان به روش کنترل تطبیقی و کنترل پیش‌بین اشاره کرد. از جمله مزیت‌های روش کنترل پیش‌بین، اعمال قیود سیستم در طراحی و بهینه‌سازی قانون کنترلی استخراجی بر مبنای کمینه کردن یک تابع هزینه می‌باشد که خروجی با استفاده از مدل و یا بسط تیلور خروجی پیش‌بینی می‌شود [9-13]. ربیعی و همکاران [14]، کنترل‌کننده PID پیش‌بین غیرخطی برای کنترل پرواز هماهنگ یک فضایپما ارائه کردند که ورودی با استفاده از الگوریتم پیش‌بین استخراج و تخمین اغتشاشات در قانون کنترل پیش‌بین وارد می‌شود. از جمله کنترل‌کننده‌های پیش‌بین در رباتیک می‌توان به طراحی یک کنترل‌کننده مدل پیش‌بین برای یک نوع ربات متحرک اشاره کرد که در آن با استفاده از توابع لاگر سعی در کاهش خطای ردیابی مسیر مرجع نموده‌اند [15]. کنترل مدل پیش‌بین با پیش‌بینی‌کننده اسمیت در مرجع [16] آمده که به منظور افزایش میزان مقاوم بودن کنترل‌کننده در برابر عدم قطعیت‌ها، از تخمین‌گر اسمیت برای ردیابی مسیر یک نوع ربات متحرک استفاده نموده است. کنترل‌کننده مدل پیش‌بین غیرخطی با شبکه عصبی چندلایه در [17] گزارش شده که از یک شبکه عصبی چند لایه به جای یک تخمین‌گر رگرسیون خطی به منظور افزایش کارایی ربات استفاده کرده است. کنترل تعقیب مسیر یک نوع ربات چرخ‌دار توسط الگوریتم پیش‌بین در مرجع [18] آمده که ربات را به‌صورت مجانبی حول وضعیت‌های مطلوب پایدار کرده است. در بسیاری از روش‌ها قانون کنترل از بهینه‌سازی تابع هزینه به دست می‌آید. یک روش برای به‌دست آوردن قانون کنترل حل تحلیلی آن است. از این‌رو محاسبات کمتر و سرعت پیاده‌سازی آن بیشتر می‌شود [19].

از دیگر کارهای انجام شده در حوزه کنترل ربات‌های موازی، کنترل‌کننده مد لغزشی برای یک ربات موازی صفحه‌ای اشاره کرد که در آن با استفاده از الگوریتم فاخته یک مسیر بهینه به‌عنوان مسیر مرجع به ربات داده

همچنین به منظور جلوگیری از افزایش حجم مطالب، به آن اشاره نشده است.

3- طراحی کنترل کننده

در این بخش به طراحی کنترل کننده های خطی سازی فیدبک، مد لغزشی و پیش بین پرداخته خواهد شد.

1-3- خطی سازی فیدبک

در این بخش با اعمال روش خطی سازی پسخور روی معادلات ربات، معادلات مذکور به حالت خطی در آمده و در ادامه کنترل کننده PD به سیستم اعمال شده است. در ابتدا معادلات دینامیکی به فرم فضای حالت نوشته می شوند.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (5)$$

$$\dot{x}_2 = M^{-1}(-C(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta) + F) \quad (6)$$

اگر ورودی به شکل رابطه (7) انتخاب شود، سیستم به فرم خطی در می آید.

$$F = M[v + M^{-1}(C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta))] \quad (7)$$

با جایگذاری رابطه (7) در رابطه (6) معادله (8) حاصل می شود.

$$\ddot{q} = v \quad (8)$$

برای رسیدن به هدف طراحی، ابتدا بردار خطا به صورت زیر تعریف می شود.

$$e = q - q_d \quad (9)$$

با در نظر گرفتن ورودی معادل به صورت رابطه (10) معادله دیفرانسیل خطا به دست می آید.

$$v = \ddot{x}_{2d} - K_1 \dot{e} - K_2 e \quad (10)$$

اگر ورودی معادل v به شکل فوق در نظر گرفته شود و ضرایب K_1 و K_2 مثبت انتخاب شوند، خروجی حول خروجی مطلوب پایدار شده و خطا به سمت صفر میل می کند.

$$\ddot{e} + K_1 \dot{e} + K_2 e = 0 \quad (11)$$

در نتیجه قانون کنترلی به شکل رابطه (12) بیان می شود.

$$F = M[\ddot{x}_{2d} - K_1 \dot{e} - K_2 e + M^{-1}(C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta))] \quad (12)$$

مدل دینامیکی حاصل بیانگر مدل دقیق سیستم نمی باشد، از این رو سیستم دارای عدم قطعیت پارامتری و غیرساختار یافته است، که این مهم باعث کاهش حاشیه پایداری و حساسیت به اغتشاش خارجی در روش خطی سازی پسخور می شود. البته وجود کنترل کننده PD در ورودی خطی سازی پسخور تا حدودی این عوارض ناخواسته را تعدیل می کند. بنابراین در کل کارایی این روش به میزان خطا در مدل سازی وابسته بوده که در شبیه سازی ها میزان اثر پذیری آن نسبت به پارامترها بررسی شده است.

2-3- کنترل مد لغزشی

در این روش کنترلی، خطا متغیر حالت q را به صورت $e = q - q_d$ در نظر گرفته و یک سطح متغیر با زمان در فضای حالت n بعدی با رابطه (13) تعریف شده است که در آن λ یک ثابت اکیداً مثبت می باشد. هدف از این تعریف، نگاه داشتن شیب سطح لغزش در نزدیکی صفر است.

$$S(q, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e \quad (13)$$

در رابطه (13)، $n = 3$ می باشد. با مشتق گیری نسبت به زمان، رابطه (14) به دست می آید.

$$\dot{S} = (\ddot{q} - \ddot{q}_d) + \lambda(\dot{q} - \dot{q}_d) \quad (14)$$

قانون کنترلی \hat{F} جهت رسیدن به $\dot{S} = 0$ به صورت رابطه (15) بیان شده است.

$$\hat{F} = C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + M(\ddot{q}_d - \lambda(\dot{q} - \dot{q}_d)) \quad (15)$$

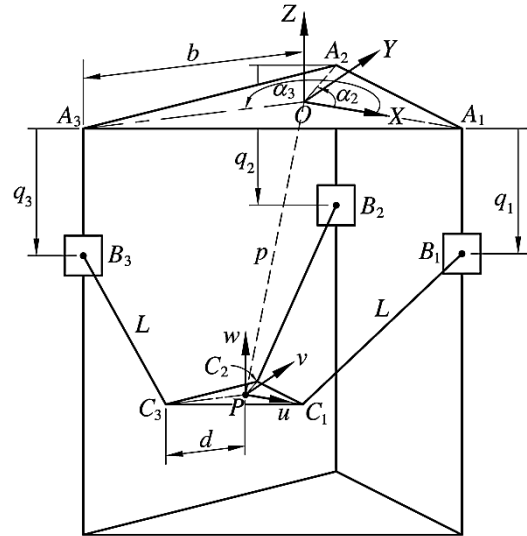


Fig. 1 Kinematic chains of the 3-PUU mechanism

شکل 1 زنجیره های سینماتیکی مکانیزم 3-PUU

جدول 1 ابعاد و زوایای ربات

Table 1 Dimensions and angles of the robot

پارامتر	مقدار	شرح
α_k	$(k-1) \times 120^\circ$	زوایای قرارگیری ریلهای پایه
d	50mm	شعاع مجری نهایی
b	500mm	شعاع پلتفرم ثابت
L	750mm	طول میله های رابط
m_l	0.2kg	جرم میله های رابط
m_s	1kg	جرم لغزنده ها
m_e	0.5kg	جرم مجری نهایی

برای استخراج مدل دینامیکی ربات از روش لاگرانژ استفاده می شود. از آن جایی که سیستم دینامیکی این مکانیزم موازی یک سیستم مقید است، فرمول بندی معادلات لاگرانژ برای سیستم مقید، مطابق رابطه (2) به کار گرفته می شود.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_j} = F_j + \sum_{k=1}^3 \lambda_k \frac{\partial f_k}{\partial \theta_j} \quad (j = 1, 2, \dots, 6) \quad (2)$$

که در آن θ_j ، j امین مختصه تعمیم یافته و F_j نیروی تعمیم یافته نظیر آن می باشند. همچنین λ_k و f_k به ترتیب بیانگر ضرایب لاگرانژ و معادلات قید هستند. مختصات تعمیم یافته برای توصیف سیستم به صورت رابطه (3) می باشد.

$$\theta = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad x_p \quad y_p \quad z_p]^T \quad (3)$$

که متشکل از موقعیت لغزنده ها و مؤلفه های موقعیت مجری نهایی است. در ادامه با تشکیل لاگرانژین و ساده سازی ریاضی، ضرایب لاگرانژ از معادلات مدل دینامیکی حذف و در نهایت، معادلات دینامیکی ربات به صورت شش معادله دیفرانسیل غیرخطی در می آیند [22]. این شش معادله را می توان به فرم ماتریسی (4) نشان داد.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = F \quad (4)$$

که M و C و G به ترتیب ماتریس های جرم، ماتریس اثرات گریز از مرکز و ژيروسکوپ و بردار نیروهای گرانشی می باشند. به منظور اعتبارسنجی مدل استخراجی، مکانیزم در نرم افزار آدامز مدل شده و صحت اعتبار مدل دینامیکی نیز حاصل شده است که با توجه به هدف کنترلی این مقاله و

به‌منظور مقابله با پدیده چترینگ، یک جمله ناپیوسته به \hat{F} اضافه شده است.

$$F = \hat{F} - K \tanh(S) \quad (16)$$

که در آن K یک ثابت مثبت قطری است. با توجه به شرایط پایداری تابع لیاپانوف و با استفاده از معادله سطح لغزش در نظر گرفته شده، با ساده‌سازی ریاضی، قانون کنترل مد لغزشی برای ربات به‌صورت رابطه (17) استخراج شده است.

$$F = C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + M(\ddot{q}_d - \lambda(\dot{q} - \dot{q}_d)) - K \tanh(S) \quad (17)$$

3-3- کنترل پیش‌بین غیرخطی

تکنیک کنترل پیش‌بین بر مبنای حداقل کردن تابع هدف، بهینه‌ترین سیگنال کنترلی را در یک افق پیش‌بین معین محاسبه می‌نماید. تابع هدف برای ربات موازی مورد مطالعه به‌صورت رابطه (18) در نظر گرفته می‌شود

$$J = \frac{1}{2} \int_{T_1}^{T_2} (\theta(t + \tau) - \theta_r(t + \tau))^2 dt = \frac{1}{2} \int_{T_1}^{T_2} e_{\theta}(t + \tau) dt \quad (18)$$

که $e_{\theta}(t + \tau)$ خطای ردیابی مسیر مرجع و τ میزان گام‌های پیش‌بینی شده از مسیر طراحی شده برای ربات است. با استفاده از بسط تیلور مسیر بعدی حرکت را تا τ گام بعدی با استفاده از رابطه (19) محاسبه نمود

$$\theta(t + \tau) = \theta(t) + \tau \dot{\theta}(t) + \frac{\tau^2}{2!} \ddot{\theta}(t) \quad (19)$$

با توجه به مدل دینامیکی استخراج شده در رابطه (17) ماتریس مشتقات مسیر به‌صورت رابطه (20) نوشته می‌شود

$$\Theta(t) = \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \ddot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ -M(\theta)^{-1}(C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta)) \\ 0_{n \times 1} \\ 0_{n \times 1} \\ -M(\theta)^{-1}u(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

از این‌رو مدل پیش‌بینی شده از مسیر آینده به‌صورت رابطه (21) بدست می‌آید.

$$\theta(t + \tau) = H\theta(t) \quad (21)$$

$$H = \begin{bmatrix} I_{6 \times 6} & \tau \times I_{6 \times 6} & \frac{\tau^2}{2!} \times I_{6 \times 6} \end{bmatrix}$$

ماتریس $I_{6 \times 6}$ همانی می‌باشد. محاسبات مربوط به پیش‌بینی مسیر واقعی مطابق رابطه (22) انجام خواهد شد.

$$\theta(t + \tau) = H\theta_r(t) \quad (22)$$

$$\Theta_r(t) = [\theta(t) \quad \dot{\theta}_r(t) \quad \ddot{\theta}_r(t)]^T$$

مطابق روابط (21) و (22) پیش‌بینی خطای مسیر در τ بعد به‌صورت رابطه (23) می‌باشد.

$$e_{\theta}(t + \tau) = \theta(t + \tau) - \theta_r(t + \tau) = H(\theta(t) - \theta_r(t)) \quad (23)$$

مطابق مدل پیش‌بین خطا، تابع هدف مجدداً بازنویسی خواهد شد.

$$J = \frac{1}{2} (\theta(t) - \theta_r(t))^T \bar{H} (\theta(t) - \theta_r(t)) \quad (24)$$

به‌منظور ساده‌سازی تابع \bar{H} به‌صورت رابطه (25) نوشته می‌شود.

$$\bar{H} = \int_{T_1}^{T_2} H H^T d\tau = \begin{bmatrix} T \times I_{6 \times 6} & \left(\frac{T^2}{2}\right) \times I_{6 \times 6} & \left(\frac{T^3}{6}\right) \times I_{6 \times 6} \\ \left(\frac{T^2}{2}\right) \times I_{6 \times 6} & \left(\frac{T^3}{3}\right) \times I_{6 \times 6} & \left(\frac{T^4}{8}\right) \times I_{6 \times 6} \\ \left(\frac{T^3}{6}\right) \times I_{6 \times 6} & \left(\frac{T^4}{8}\right) \times I_{6 \times 6} & \left(\frac{T^5}{20}\right) \times I_{6 \times 6} \end{bmatrix} \quad (25)$$

که $T = T_2 - T_1$ می‌باشد. به منظور مینیمم کردن تابع هدف، از تابع هدف نسبت به سیگنال کنترل مشتق گرفته می‌شود. لذا بردار کنترلی بهینه ربات

به‌صورت رابطه (26) استخراج می‌شود.

$$u(t) = -M(\theta)H(T) \left(N(t) - \Theta_r(t) \right) \quad (26)$$

$$N(t) = \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ -M(\theta)^{-1}(C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta)) \end{bmatrix}$$

$$H(T) = \begin{bmatrix} \left(\frac{10}{3T^2}\right) \times I_{6 \times 6} & \left(\frac{5}{2T}\right) \times I_{6 \times 6} & I_{6 \times 6} \end{bmatrix}$$

با ساده‌سازی رابطه (26)، رابطه (27) حاصل می‌شود.

$$F(t) = -M(\theta) \left\{ \begin{array}{l} K_p(\theta - \theta_r) + K_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) \\ -M(\theta)^{-1}(C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta)) - \ddot{\theta}_r \end{array} \right\}$$

$$K_p = \left(\frac{10}{3T^2}\right) \times I_{6 \times 6}$$

$$K_d = \left(\frac{5}{2T}\right) \times I_{6 \times 6} \quad (27)$$

3-3-1- کنترل پیش‌بین غیرخطی مقاوم

مدل استخراجی ربات موازی مورد مطالعه بیانگر رفتار دقیق ربات نمی‌باشد چرا که یافتن مدل دقیق حرکتی از ربات کار سختی است. از این‌رو مدل ربات دارای عدم قطعیت و نامعینی است. بنابراین باید از روش کنترلی استفاده کرد که در مقابل این عوامل مقاوم باشد. عدم قطعیت‌ها در این پژوهش به‌صورت افزوده به مقادیر واقعی به‌عنوان خطا در مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند.

$$M(\theta) = M_0(\theta) + \Delta M$$

$$C(\theta, \dot{\theta}) = C_0(\theta, \dot{\theta}) + \Delta C$$

$$G(\theta) = G_0(\theta) + \Delta G \quad (28)$$

مدل ربات با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و نامعینی‌ها به‌صورت رابطه (29) در نظر گرفته شده است.

$$(M_0(\theta) + \Delta M)\ddot{\theta} + (C_0(\theta, \dot{\theta}) + \Delta C)\dot{\theta} + G_0(\theta) + \Delta G = F + b(t) \quad (29)$$

با ساده‌سازی ریاضی، رابطه (30) حاصل می‌شود.

$$M_0(\theta)\ddot{\theta} + C_0(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G_0(\theta) = F + \mu(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta, b)$$

$$\mu(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta, b) = -\{\Delta M\ddot{\theta} + \Delta C\dot{\theta} + \Delta G\theta - b\} \quad (30)$$

به‌منظور تضمین مقاوم بودن کنترل‌کننده پیشنهادی و پایداری سیستم، باید عدم قطعیت به بردار کنترل اضافه شود. با توجه به این‌که μ نامشخص است، تخمینی از میزان واقعی آن در نظر گرفته می‌شود که با μ_{est} نمایش داده می‌شود. مجدداً بردار کنترلی به‌صورت رابطه (31) بازنویسی می‌شود.

$$F(t) = -M_0(\theta) \left\{ \begin{array}{l} K_p(\theta - \theta_r) + K_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) \\ -M_0(\theta)^{-1}(C_0(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G_0(\theta)) - \ddot{\theta}_r \end{array} \right\} - \mu_{est} \quad (31)$$

3-3-2- تحلیل پایداری

برای اثبات پایداری بودن کنترل‌کننده پیشنهادی از تابع لیاپانوف استفاده می‌شود. با جای‌گذاری بردار کنترلی رابطه قبل در رابطه (32) دینامیک خطای ردیابی حاصل خواهد شد.

$$\ddot{e}_{\theta}(t) + K_d \dot{e}_{\theta}(t) + K_p e_{\theta}(t) = M_0^{-1}(\theta) e_{\mu}(t)$$

$$e_{\mu}(t) = \mu - \mu_{est} \quad (32)$$

برای نوشتن رابطه (33) به فرم فضای حالت متغیرهای فضای حالت به‌صورت $X = [x_1 \quad x_2]^T = [e \quad \dot{e}]^T$ در نظر گرفته می‌شوند

$$\dot{X} = AX + BD_0^{-1}e_{\mu}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 6} & I_{6 \times 6} \\ -K_p & -K_d \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 6} \\ I_{6 \times 6} \end{bmatrix} \quad (33)$$

با توجه با قانون لیاپانوف، برای هر ماتریس مثبت معین Q ماتریس مثبت معین P وجود دارد که در رابطه (34) صدق کند.

$$A^T P + PA = -Q \quad (34)$$

حال تابع لیاپانوف مطابق رابطه (35) اختیار می‌شود.

$$V = X^T P X + e_{\mu}^T \rho e_{\mu} \quad (35)$$

در رابط (36)، بردارهای X ، Y ، و Z ، مختصات N_p نقطه دقت و T بردار زمان‌های مربوط به این نقاط هستند. برای طراحی مسیر بهینه، نقاط ابتدا و انتهای مسیر و بردار زمان T معلوم فرض شده و نقاط میانی (X_i, Y_i, Z_i) با $i = 2, \dots, N_p - 1$ از طریق بهینه‌سازی تعیین می‌شوند. بهینه‌سازی مسیر براساس دستیابی به کوتاه‌ترین مسیر بین نقاط ابتدا و انتها و عدم برخورد با موانع سر راه و حفظ یک فاصله حاشیه‌ای از آن‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین، تابع هدف در نظر گرفته شده به صورت رابطه (50) می‌باشد.

$$\text{ObjFun} = \alpha S + \beta C \quad (50)$$

که S و C به ترتیب بیانگر طول منحنی و شاخص برخورد با موانع α و β وزن داده شده به هر یک می‌باشند. طول مسیر و شاخص برخورد با موانع با استفاده از روابط (51) محاسبه می‌شوند. در این روابط، مسیر، دو بعدی و موانع، دایره‌ای شکل فرض شده‌اند.

$$x_j = \text{spline}(X, T, t_j), \quad y_j = \text{spline}(Y, T, t_j),$$

$$(j = 1, 2, \dots, n)$$

$$S = \sum_{j=2}^n \sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2}$$

$$\Delta_{j,k} = \sqrt{(x_j - x_{C_k})^2 + (y_j - y_{C_k})^2}, \quad (k = 1, 2, \dots, n_c)$$

$$c_{j,k} = \max\left(1 - \frac{\Delta_{j,k}}{R_k + m}, 0\right), \quad C_k = \text{mean}(c_{j,k})$$

$$C = \sum_{k=1}^{n_c} C_k \quad (51)$$

که، (x_j, y_j) نقاط میانمایی شده، n تعداد نقاط میانمایی، n_c تعداد موانع، (x_{C_k}, y_{C_k}) مختصات مرکز موانع، $\Delta_{j,k}$ فاصله نقطه j -ام از مرکز مانع k -ام، R_k شعاع موانع، m حاشیه در نظر گرفته شده اطراف موانع، $c_{j,k}$ شاخص قرار داشتن نقطه j -ام در محدوده مانع k -ام، و C_k شاخص برخورد مسیر با مانع k -ام می‌باشند. روابط (51) به سادگی برای مسیرهای سه بعدی و موانع کروی قابل توسعه می‌باشند. شاخص برخورد به‌گونه‌ای تعریف شده که در صورت عدم برخورد مسیر با موانع، مقدار صفر به خود می‌گیرد و با برخورد و عبور بیشتر از داخل موانع، مقدار آن بیشتر می‌شود. در نتیجه مقدار این کمیت نیز همانند طول منحنی باید مینیمم شود. برای حل مسأله بهینه‌سازی، یعنی یافتن نقاط دقت میانی (X_i, Y_i, Z_i) که تابع هدف (50) را کمینه کنند، از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده شده است [23]. مسیر بهینه استخراجی و همگرایی تابع هزینه توسط الگوریتم جستجوی هارمونی در حضور موانع دایره‌ای در "شکل 2" نشان داده شده است.

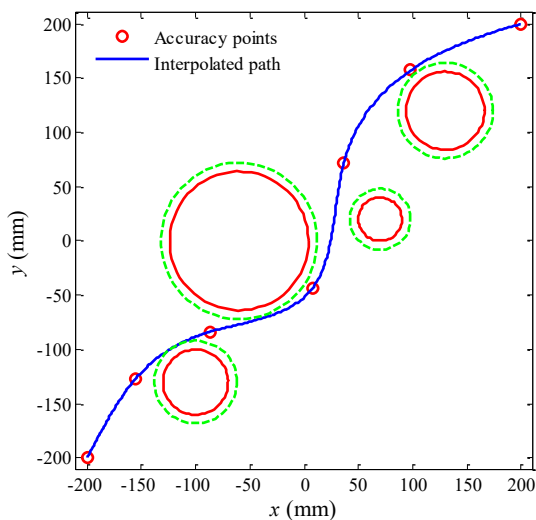


Fig.2 Optimized trajectory generated by HSA

شکل 2 مسیر بهینه تولید شده با الگوریتم جستجوی هارمونی

با مشتق‌گیری از طرفین تابع لیاپانوف و همچنین رابطه (33) :

$$\dot{V} = -X^T Q X + 2e_\mu^T \{(M_0^{-1})^T B^T P X + \rho \dot{e}_\mu\} \quad (36)$$

با فرض

$$\dot{e}_\mu = -\rho^{-1} (M_0^{-1})^T B^T P X \quad (37)$$

مشتق تابع لیاپانوف همواره منفی خواهد شد.

$$\dot{V} = -X^T Q X \quad (38)$$

مطابق نظریه لیاپانوف، e_μ و X همواره کراندار و محدود خواهند بود. با توجه به این‌که اطلاعات قبلی از مشتق و تغییرات نامعینی‌ها موجود نیست، فرض می‌شود که $\dot{\mu} = 0$ و در نتیجه:

$$\dot{e}_\mu = \dot{\mu} - \dot{\mu}_{\text{est}} = 0 - \dot{\mu}_{\text{est}} = -\dot{\mu}_{\text{est}} \quad (39)$$

با استفاده از رابطه (37):

$$\dot{\mu}_{\text{est}} = -\dot{e}_\mu = \rho^{-1} (M_0^{-1})^T B^T P X \quad (40)$$

با توجه به محدود بودن e_μ و این‌که $\dot{\mu} = 0$ می‌توان نتیجه گرفت که $\dot{\mu}_{\text{est}}$ همواره محدود خواهد بود. باتوجه به رویتگر غیرخطی معرفی شده در مرجع [17]:

$$\dot{\mu}_{\text{est}} = \bar{L}(\theta, \dot{\theta}) \eta - \bar{L}(\theta, \dot{\theta}) \mu_{\text{est}} = \bar{L}(\theta, \dot{\theta}) e_\mu \quad (41)$$

که \bar{L} بهره رویتگر بوده و با ساده‌سازی رابطه قبل

$$\dot{e}_\mu + \bar{L}(\theta, \dot{\theta}) e_\mu = 0 \quad (42)$$

ماتریس \bar{L} به گونه در نظر گرفته می‌شود که همواره مثبت معین بوده و در نتیجه e_μ به صفر همگرا شود. با توجه به مثبت معین بودن ماتریس D_0 میزان بهره رویتگر به صورت رابطه (43) فرض می‌شود.

$$\bar{L}(\theta, \dot{\theta}) = L M_0^{-1}(\theta) \quad (43)$$

که $L = l \times I_{n \times n}$ و $l > 0$ در نتیجه $L > 0$ خواهد بود. از این‌رو رابطه (41) به صورت رابطه (44) در خواهد آمد.

$$\dot{\mu}_{\text{est}} = L M_0^{-1}(\theta) (\mu - \mu_{\text{est}}) \quad (44)$$

با توجه به رابطه (43) معادله دینامیک خطا به صورت رابطه (45) بازنویسی می‌شود.

$$\dot{e}_\mu + L M_0^{-1} e_\mu = 0 \quad (45)$$

رابطه (44) به صورت رابطه (46) بازنویسی می‌شود.

$$\dot{\mu}_{\text{est}} = L M_0^{-1}(\theta) \mu_{\text{est}} + L \left[\dot{\theta} + M_0^{-1}(\theta) (C_0(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + G_0(\theta) - u(t)) \right] \quad (46)$$

با توجه به روابط (46) و (45) و (31)، معادله دینامیک تخمین عدم قطعیت‌ها استخراج می‌شود.

$$\dot{\mu}_{\text{est}} = L \left(\dot{e}_q(t) + K_d e_q(t) + K_p e_q(t) \right) \quad (47)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه (47) و جایگذاری در رابطه (31) مجدداً قانون کنترل به صورت رابطه (48) بازنویسی می‌شود.

$$u(t) = -M_0(\theta) \{ K_d \dot{e}_\theta(t) + K_p e_\theta(t) - M_0^{-1}(\theta) (C_0(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + G_0(\theta) - \ddot{\theta}_r) \} - L \left[\dot{e}_\theta(t) + K_d e_\theta(t) + K_p \int e_\theta(t) dt \right] \quad (48)$$

4- طراحی مسیر

به‌منظور استفاده از ربات در فعالیت‌های صنعتی، طراحی مسیر از اهمیت خاصی برخوردار است. طراحی مسیر ربات به‌وسیله تعدادی نقطه دقت که نشان‌دهنده موقعیت مجری نهایی در چند لحظه از زمان می‌باشند، صورت گرفته است. نقاط انتخابی باید درون فضای کاری قابل دسترس و همچنین به دور از نقاط تکین ربات باشند. از توابع درون‌یابی درجه سوم برای تولید مسیر از میان نقاط دقت، به این منظور استفاده شده است که پیوستگی سرعت و شتاب حفظ شود. مسیر مطلوب مجری نهایی توسط سه تابع (49) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} x_d(t) &= \text{spline}(X, T, t) \\ y_d(t) &= \text{spline}(Y, T, t) \\ z_d(t) &= \text{spline}(Z, T, t) \end{aligned} \quad (49)$$

5- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت ابتدا به نحوه استخراج پارامترهای کنترلی و سپس تشریح نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرداخته خواهد شد.

1-5- تعیین ضرایب کنترل‌کننده‌ها

به‌منظور مقایسه کنترل‌کننده طراحی شده با کنترل‌کننده‌های خطی‌سازی پسخور و مد لغزشی، ضرایب کنترل‌کننده‌های طراحی شده بصورت بهینه استخراج خواهند شد. لذا یک تابع هزینه مطابق رابطه (52) پیشنهاد شده است.

$$Obj = \alpha(ITAE) + \beta(|\dot{u}|)$$

$$ITAE = \int |e(t)| t dt \quad (52)$$

که $e(t)$ بیانگر خطا و $|\dot{u}|$ نرخ تعیین سیگنال کنترلی، α و β وزن‌های اعمالی می‌باشند. به‌منظور تأثیر برابر در بهینه‌سازی، مقدار هر یک از وزن‌های فوق برابر یک در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه به‌منظور تعیین ضرایب بهینه، تابع هزینه پیشنهادی با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی مینیمم شده و نتایج در جدول 2 نشان داده شده است.

2-5- شبیه‌سازی اول

در شبیه‌سازی اول تکنیک کنترلی طراحی شده در تعقیب مسیر موردنظر، سه نیروی اغتشاشی سینوسی با دامنه‌های 2، 3 و 4 نیوتن و فرکانس‌های 70، 45 و 15 رادیان بر ثانیه روی لغزنده‌ها در نظر گرفته شده‌اند. همچنین تا 15% تغییرات در پارامترهای جرم مکانیزم به‌عنوان عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. مسیرهای مطلوب و کنترل شده مجری نهایی در "شکل 3" نشان داده شده‌اند. رفتار کیفی حاصل، نشان‌دهنده عملکرد مطلوب کنترل پیشنهادی در حضور اغتشاش خارجی و عدم قطعیت می‌باشد.

تعقیب مسیر مطلوب در منحنی‌های نمودار زمانی حرکت مجری نهایی و لغزنده‌ها در "شکل‌های 4 و 5" به‌طور واضح‌تر دیده می‌شود. مولفه‌های خطای تعقیب مسیر در "شکل 6" نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است سیگنال خطای حاصل از کنترل‌کننده طراحی شده علاوه بر داشتن مقادیر کوچک، نوسان‌های کمی نیز دارد.

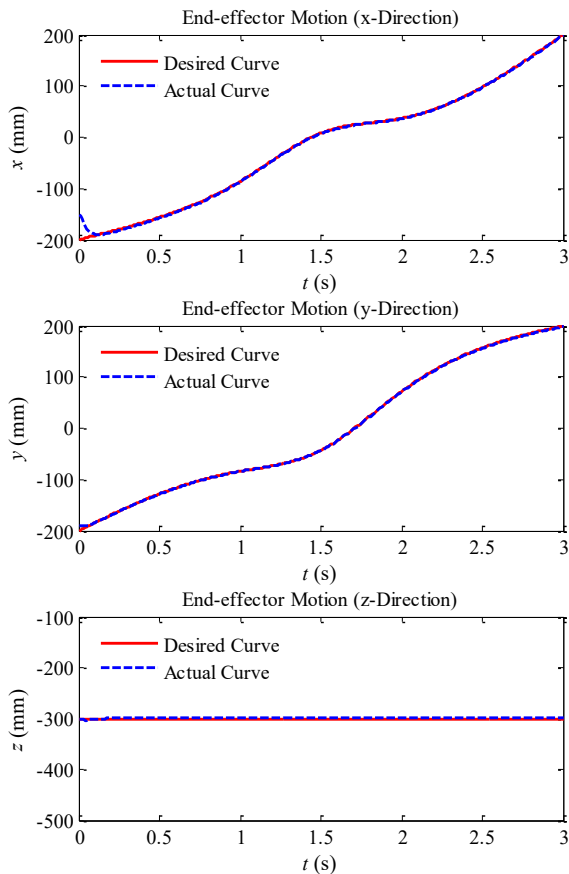


Fig. 4 End-effector motion plots

شکل 4 نمودار زمانی حرکت مجری نهایی

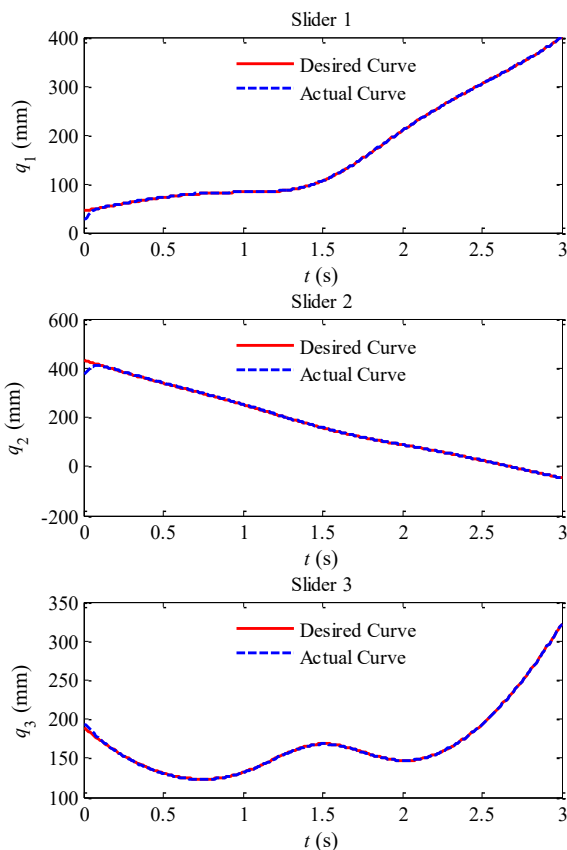


Fig. 5 Actuator motion plots

شکل 5 نمودار زمانی حرکت عملگرها

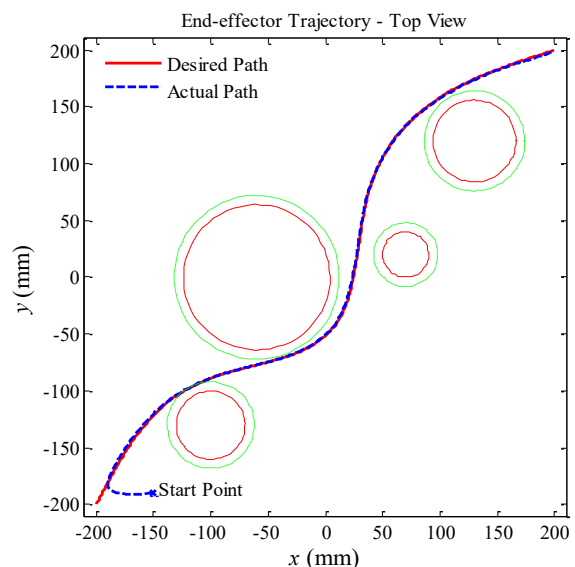


Fig. 3 Desired trajectory for tracking

شکل 3 مسیر مطلوب برای ردیابی

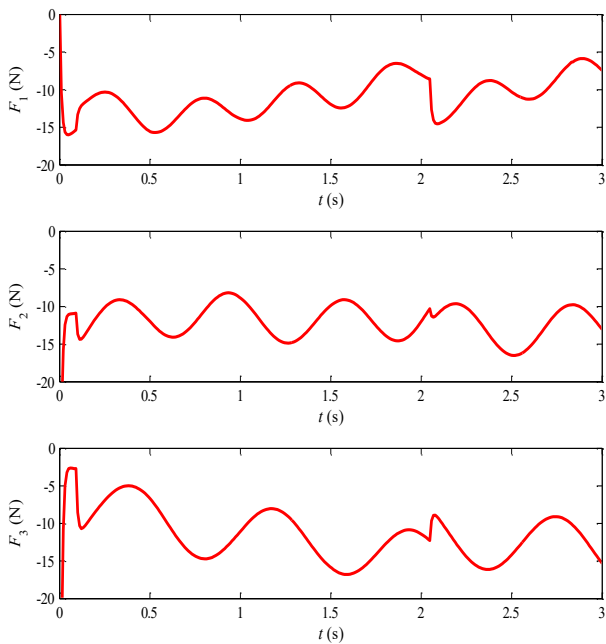


Fig. 7 Control signal of actuators

شکل 7 سیگنال کنترلی عملگرها

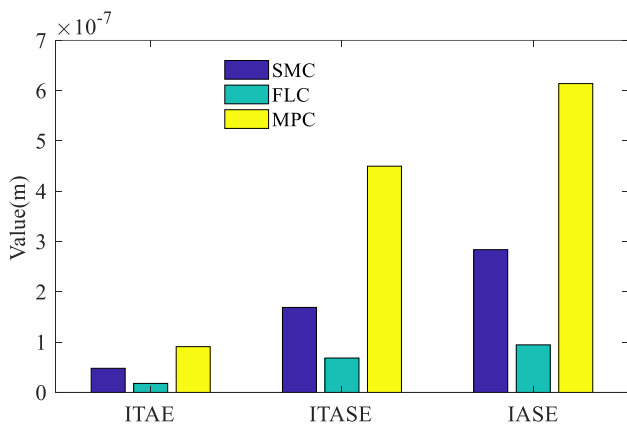


Fig. 8 Error Criteria

شکل 8 معیارهای خطا

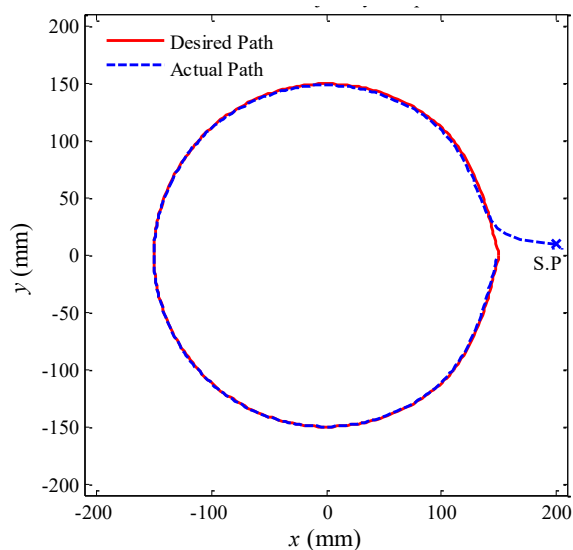


Fig. 9 Desired trajectory for tracking

شکل 9 مسیر مطلوب برای ردیابی

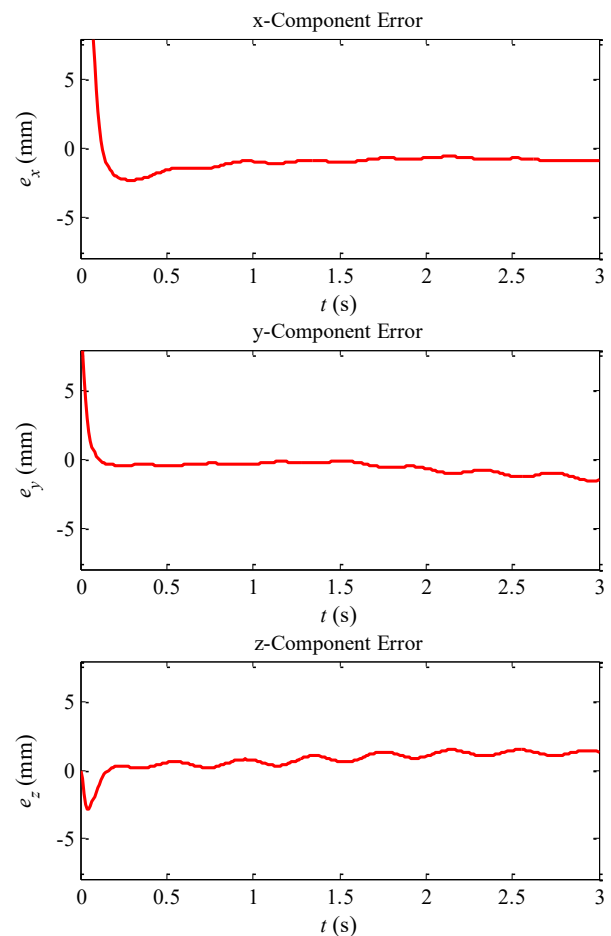


Fig. 6 tracking error components

شکل 6 مولفه های خطای تعقیب مسیر

همچنین، به منظور ارزیابی کنترل کننده پیشنهادی، نقطه شروع خارج از مسیر مطلوب طراحی شده در نظر گرفته شده است. به واضح قابل مشاهده است که کنترل کننده پیش بین توانسته در مدت زمان خیلی کم، در حضور عدم قطعیت ها و اغتشاشات اعمالی، به مسیر مطلوب همگرا شود که بیانگر برتری آن است.

سیگنال های کنترلی عملگرها برای کنترل ربات در مسیر مطلوب در "شکل 7" نشان داده شده اند. چنان که دیده می شود سیگنال های کنترلی نسبتاً هموار بوده و به محدوده اشباع خود نرسیده اند. به منظور مقایسه کنترل کننده مدل پیش بین مقاوم، ابتدا دو کنترل کننده غیرخطی مدلغزشی و خطی سازی فیدبک برای ربات مورد مطالعه طراحی و شبیه سازی شده است. سپس به منظور مقایسه کنترل کننده های طراحی شده، معیارهای انتگرالی خطا نیز محاسبه و نمودار میله ای مربوط به این معیارها در "شکل 8" نشان داده شده است. همان طور که از این نمودار پیداست هر سه معیار خطا برای کنترل کننده مدل پیش بین مقاوم پیشنهادی نسبت به دو کنترل کننده دیگر مقادیر کمتری داشته که بیانگر برتری این کنترل کننده می باشد.

3-5- شبیه سازی دوم

در شبیه سازی دوم مجدداً همان اغتشاشات و عدم قطعیت اعمالی در شبیه سازی قبلی در نظر گرفته شده اند. مسیرهای مطلوب و کنترل شده مجری نهایی برای مانور دایروی در "شکل 9 و 10" نشان داده شده اند.

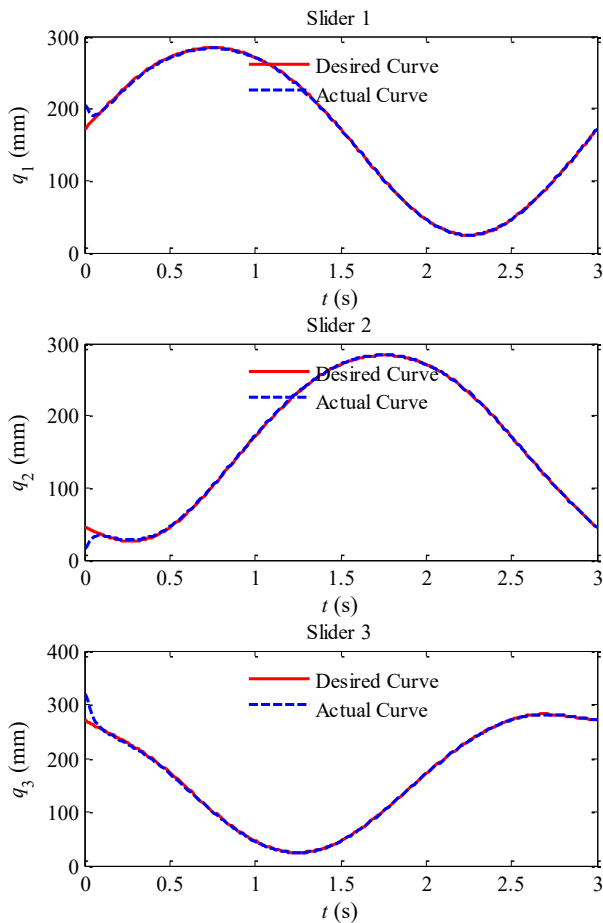


Fig. 11 Actuator motion plots

شکل 11 نمودار زمانی حرکت عملگرها

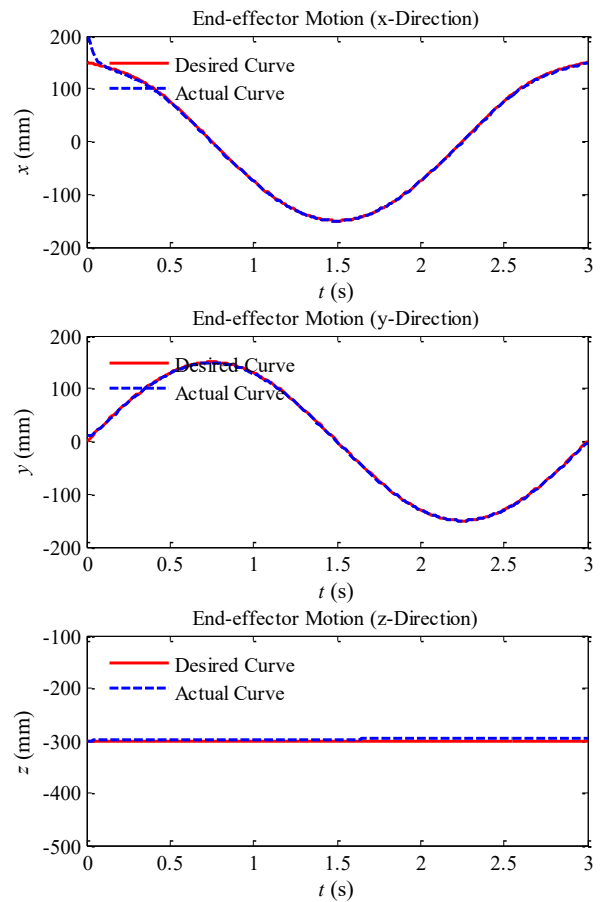


Fig. 10 End-effector motion plots

شکل 10 نمودار زمانی حرکت مجری نهایی

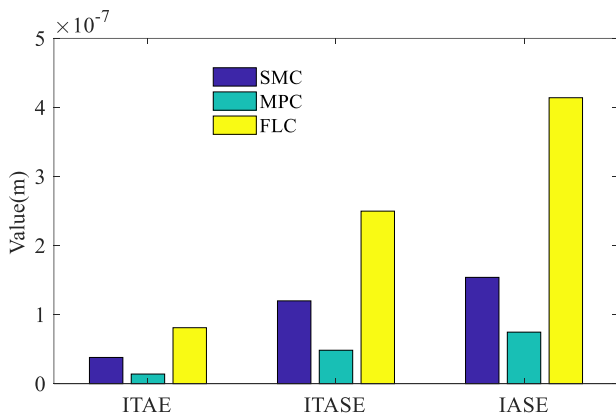


Fig. 12 Error Criteria

شکل 12 معیارهای خطا

سرعت و شتاب، طراحی مسیر با استفاده از درون‌یابی اسپلاین صورت گرفت. با توجه به این که مدل دینامیکی ربات مورد مطالعه دارای عدم قطعیت می‌باشد، به منظور کنترل ربات، دو مانور متفاوت طراحی و کنترل کننده مدل پیش‌بین مقاوم پیاده‌سازی شد. کنترل پیش‌بین غیرخطی با در نظر گرفتن نامعینی‌های سیستم شامل دقت محاسباتی، اصطکاک و غیره، تخمین مناسبی به دست آورد. نتایج حاصل از کنترل کننده طراحی شده با نتایج روش‌های خطی سازی فیدبک و مد لغزشی مقایسه شد و مشاهده گردید که این روش‌ها نسبت به روش کنترل پیش‌بین غیرخطی عملکرد ضعیف‌تری

همچنین ردیابی مسیر مطلوب مربوط به حرکت لغزنده‌ها نیز در "شکل 11" نشان داده شده است. رفتار کیفی حاصل، نشان دهنده عملکرد مطلوب کنترل پیشنهادی در حضور اغتشاش خارجی و عدم قطعیت می‌باشد. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، کنترل کننده پیشنهادی توانسته از یک نقطه خارج مسیر مطلوب حرکت کرده و در مدت زمان خیلی کم خود را به این مسیر رسانده و شروع به ردیابی کرده است که این مهم توانایی کنترل کننده پیش‌بین مقاوم را در حضور عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات اعمالی به سیستم نشان می‌دهد.

به منظور جلوگیری از افزایش تعداد شکل‌ها و صفحات مقاله، نمودارهای خطا و سیگنال کنترلی برای مسیر دایروی ذکر نشده است. در ادامه به منظور مقایسه و نشان دادن برتری روش کنترلی پیشنهادی، دو کنترل کننده غیرخطی مد لغزشی و خطی سازی فیدبک برای سیستم مورد مطالعه طراحی شده و سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای هر سه روش کنترلی در "شکل 12" آورده شده است.

6- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا با استفاده از هندسه ربات معادلات سینماتیک معکوس یک ربات موازی استخراج شده و به کمک این معادلات، معادلات قید حاکم بر مکانیزم به دست آمد و به منظور کنترل ربات، معادلات دینامیکی ربات با استفاده از روش لاگرانژ استخراج شد. در مدل سازی دینامیکی ربات، با توجه به مقید بودن سیستم از ضرایب لاگرانژ استفاده شد. به منظور حفظ پیوستگی

دارند. همچنین میزان تلاش کنترلی روش پیشنهادی از سایر روش‌ها نیز کمتر می‌باشد.

7- مراجع

- [1] J. P. Merlet, *Parallel Robots*, Second edition, pp. 116-124, London, Kluwer Academic Publishers, 2006.
- [2] Z. Peng, S. Yang, G. Wen, A. Rahmani, Y. Yu, Adaptive distributed formation control for multiple nonholonomic wheeled mobile robots, *Neurocomputing*, Vol. 173, No. 3, pp. 1485-1494, 2016.
- [3] M. Rahmani, A. Ghanbari, M. M. Etefagh, Robust adaptive control of a bioinspired robot manipulator using bat algorithm, *Expert Systems with Applications*, Vol. 56, No. 10, pp. 164-176, 2016.
- [4] A. Keymasi Khalaji, S. A. A. Moosavian, Adaptive sliding mode control of a wheeled mobile robot towing a trailer, *Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 229, No. 2, pp. 169-183, 2014.
- [5] M. Rahmani, A. Ghanbari, M. M. Etefagh, Hybrid neural network fraction integral terminal sliding mode control of an Inchworm robot manipulator, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 80, pp. 117-136, 2016.
- [6] M. Rahmani, A. Ghanbari, M. M. Etefagh, A novel adaptive neural network integral sliding-mode control of a biped robot using bat algorithm, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 10, No. 11, pp. 743-754, 2016.
- [7] 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.
- [8] 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 control systems technology*, Vol. 12, No. 3, pp. 364-374, 2004.
- [9] N. Wada, K. Saito, M. Saeki, Model predictive control for linear parameter varying systems using parameter dependent lyapunov function, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 53, No. 12, pp. 1446-1450, 2006.
- [10] Z. Wan, M. V. Kothare, An efficient off-line formulation of robust model predictive control using linear matrix inequalities, *Automatica*, Vol. 39, No. 5, pp. 837-846, 2003.
- [11] A. M. Khiavi, M. Mirzaei, S. Hajimohammadi, A new optimal control for the semi-active suspension system considering the nonlinear magnetorheological damper model, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 20, No. 14, pp. 2221-2233, 2014.
- [12] A. Malekshahi, M. Mirzaei, Designing a non-linear tracking controller for vehicle active suspension systems using an optimization process, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 13, No. 2, pp. 263-271, 2012.
- [13] A. Malekshahi, M. Mirzaei, S. Aghasizade, Non-linear predictive control of multi-input multi-output vehicle suspension system, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Vol. 34, No. 1, pp. 87-106, 2015.
- [14] A. Rabiei, M. Malekzadeh, M. Abnili, A nonlinear predictive PID controller design for spacecraft formation flying control, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 313-321, 2015. (In Persian فارسی)
- [15] M. Shahbazzadeh, S. J. Sadati Rostami, S. Minagar, Designing model predictive control for trajectory tracking of a wheeled mobile robot using laguerre functions and exponential data weighting, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 101-112, 2017. (in Persian فارسی)
- [16] J. E. N. Rico, J. G. Ortega, E. F. Camacho, A Smith-predictor-based generalised predictive controller for mobile robot path-tracking, *Control Engineering Practice*, Vol. 7, No. 6, pp. 729-740, 1999.
- [17] D. Gu, H. Hu, Neural predictive control for a car-like mobile robot, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 39, No. 2, pp. 73-86, 2002.
- [18] M. Zamanian, A. Keymasi Khalaji, Trajectory tracking and stabilization of a tractor-trailer wheeled robot using model predictive control, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 167-175, 2018. (in Persian فارسی)
- [19] G. Klančar, I. Škrjanc, Tracking-error model-based predictive control for mobile robots in real time, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 55, No. 6, pp. 460-469, 2007.
- [20] S. A. Moezi, M. Rafeeyan, S. Ebrahimi, Sliding mode control of 3-RPR parallel robot on the optimal path using cuckoo optimization algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 147-158, 2015. (In Persian فارسی)
- [21] G. Jafari Chogan, M. H. Ghasemi, M. Dardel, Jacobian analysis, dynamic modeling and adaptive control of cable robot with six degrees of freedom and six cables, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 391-400, 2015. (In Persian فارسی)
- [22] M. Mazare, M. Taghizadeh, Adaptive sliding mode control with uncertainty estimator for a 3-[P-2(US)] translational parallel robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 181-190, 2016. (in Persian فارسی)
- [23] M. Mazare, M. R. Najafi, Adaptive control of 3-PUU parallel robot on optimized trajectories generated by harmony search algorithm *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 187-198, 2016. (in Persian فارسی)