



کنترل تطبیقی ربات موازی 3-PUU روی مسیرهای بهینه تولید شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی

محمود مزارع¹، محمدرسول نجفی^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

2- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه قم، قم

* قم، صندوق پستی 3716146611، mr.najafi@qom.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 مرداد 1395

پذیرش: 06 مهر 1395

ارائه در سایت: 09 آبان 1395

کلید واژگان:

ربات موازی 3-PUU

مدل سازی دینامیکی سیستم مقید

کنترل تطبیقی

طراحی مسیر

الگوریتم جستجوی هارمونی

چکیده

در این مقاله به طراحی کنترل کننده تطبیقی به صورت تلفیقی از روش خطی سازی بازخوردی و تئوری پایداری لیاپانوف، برای یک ربات موازی پرداخته شده است. با در نظر گرفتن یک مکانیزم موازی سه درجه آزادی برای ربات که سبب حرکت انتقالی خالص در مجری نهایی می شود، ابتدا معادلات حاکم بر سینماتیک و معادلات قید به دست آمده و سپس به منظور کنترل ربات، مدل دینامیکی سیستم مقید با استفاده از روش لاگرانژ استخراج شده است. پس از استخراج مدل دینامیکی ربات مورد مطالعه، با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی، دو مسیر بهینه برای مجری نهایی در حضور موانع، برای ردیابی توسط ربات طراحی شده است. یک تابع هدف بر اساس دستیابی به کوتاه ترین مسیر و عدم برخورد با موانع با حفظ فاصله حاشیه ای از آنها تعریف شده است. مسیر اول، یک مسیر دو بعدی در حضور چهار مانع دایره ای و مسیر دوم، یک مسیر سه بعدی در حضور سه مانع کروی می باشد. عملکرد کنترل کننده طراحی شده در شرایط مختلف از جمله در حضور اغتشاش خارجی و تغییر پارامترهای سیستم، شبیه سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهند که کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی با وجود اغتشاش خارجی و عدم قطعیت و تغییر در پارامترهای مدل، قادر به کنترل حرکت مجری نهایی روی مسیرهای طراحی شده با عملکرد مطلوب می باشد.

Adaptive control of a 3-PUU parallel robot on optimized trajectories generated by harmony search algorithm

Mahmood Mazare¹, Mohammad Rasool Najafi^{2*}

1- School of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Qom, Qom, Iran

* P.O.B. 3716146611 Qom, Iran, mr.najafi@qom.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 11 August 2016

Accepted 27 September 2016

Available Online 30 October 2016

Keywords:

3-PUU parallel manipulator
dynamic modeling of constrained systems
adaptive control
path planning
harmony search algorithm

ABSTRACT

In this paper, design of an adaptive controller, as a combination of feedback linearization technique and Lyapunov stability theory, is presented for a parallel robot. Considering a three degree-of-freedom parallel mechanism of the robot, which serves pure translational motion for its end-effector, kinematic and constraint equations are derived. Then the dynamic model of the constrained system is extracted via Lagrange's method to be used in the robot control. Two optimized trajectories are designed for the end-effector in the presence of some obstacles using harmony search algorithm to be tracked by the robot. An objective function is defined based on achieving the shortest path and also avoiding collisions with the obstacles keeping a marginal distance from each obstacle. The first trajectory is a 2D path with four circular obstacles and the second is a 3D path with three spherical obstacles. Performance of the designed controller is simulated and studied in conditions including external disturbances and varying system parameters. The results show that the proposed adaptive controller has a suitable performance in control of the end-effector to track the designed trajectories in spite of external disturbances and also uncertainty and variation of the model parameters.

1- مقدمه

بالایی هستند عملگرها معمولاً در نزدیکی پایه نصب شده و کنترل می شوند. به علت مزایای ذکر شده در بالا، موضوع ربات های موازی زمینی است که تحقیقات گسترده ای از قبیل: تحلیل سینماتیک، تحلیل فضای کاری، مدل سازی دینامیکی، و غیره روی آن در حال انجام است [2,3]. از دیدگاه درجه آزادی، ربات های موازی شش درجه آزادی دارای مزایای ذکر شده در بالا و همچنین کاملترین نوع حرکت در فضا می باشند، اما این ربات ها همیشه

ربات موازی یک مکانیزم با زنجیره سینماتیکی بسته بوده که دارای کاربردهای فراوانی در صنعت و پزشکی می باشد. در مقایسه با ربات های سریال، ربات های موازی دارای ویژگی های خاصی از قبیل: صلبیت بالا، دقت و جهت گیری بهتر، عملکرد پایدارتر، ظرفیت بالای بار دینامیکی و موقعیت مناسب سیستم عملگرها هستند [1]. از آنجا که این مکانیزم ها دارای صلبیت

Please cite this article using:

M. Mazare, M. R. Najafi, Adaptive control of a 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Mazare, M. R. Najafi, Adaptive control of a 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)

باشد. تقی‌راد [21] و همکاران نیز یک کنترل کننده مود لغزشی مقاوم تطبیقی برای کنترل موقعیت ربات موازی کابلی ارائه کردند که پایداری آن را با استفاده از روش دوم لیانوف اثبات نمودند. معزی و همکاران یک کنترل کننده مود لغزشی برای یک ربات موازی صفحه ای طراحی کردند که با استفاده از الگوریتم فاخته یک مسیر بهینه به عنوان مسیر مرجع به ربات داده شده بود [22].

طراحی مسیر بخش مهمی از فرایند کنترل در سیستم‌های رباتیک است. هدف اصلی از طراحی مسیر بهینه برای ربات موازی، یافتن مسیری است که از یک نقطه ابتدایی شروع و به یک نقطه انتهایی برسد به شرطی که دارای کمترین طول باشد و به موانع احتمالی موجود برخورد نکند. همچنین، حرکت روی مسیر مورد نظر باید تا حد ممکن آرام و پیوسته باشد تا تغییرات ناگهانی در موقعیت، سرعت و شتاب رخ ندهد. توابع ریاضی متعددی از قبیل منحنی‌های چندجمله‌ای، منحنی‌های اسپیلاین و غیره برای طراحی مسیر وجود دارد.

در این مقاله 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 تطبیقی، یک کنترل کننده طراحی شده است. دو مسیر بهینه متفاوت در یک محیط دارای موانع دایره‌ای یا کروی با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی طراحی شده و به عنوان مسیر مرجع برای ردیابی به ربات داده شده است. به منظور تطابق بیشتر کار با واقعیت و عدم برخورد با موانع، یک حاشیه اطمینان اطراف موانع در نظر گرفته شده است. همچنین برای حفظ پیوستگی سرعت و شتاب، در طراحی مسیر ربات از منحنی‌های اسپیلاین استفاده شده است. نوآوری این مقاله عبارتست از: 1) طراحی کنترل کننده ترکیبی خطی‌سازی بازخوردی و تطبیقی برای مکانیزم موازی 3-PUU. 2) طراحی مسیر بهینه با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی در حضور موانع برای این مکانیزم.

ساختار این مقاله بدین ترتیب است: در قسمت 2 مکانیزم مورد مطالعه توصیف 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 روش کنترل تطبیقی بیان شده است. در قسمت 6 به طراحی مسیر با استفاده از منحنی‌های اسپیلاین اشاره شده و در قسمت 7 به شرح الگوریتم جستجوی هارمونی پرداخته شده است. در قسمت‌های 8 و 9 نتایج اعمال تکنیک کنترل در دو شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری ذکر شده است.

2- توصیف مکانیزم

در شکل 1 شماتیک ربات موازی 3-PUU مورد مطالعه در این مقاله نشان داده شده است. مکانیزم مورد نظر از یک صفحه پایینی متحرک به نام مجری نهایی، صفحه بالایی (پلتفرم ثابت) که موتورها روی آن قرار می‌گیرند، سه ریل پایه، سه لغزنده، و سه بازو تشکیل شده است. هر لغزنده به وسیله یک مفصل کشویی به ریل پایه متصل است. هر بازو توسط دو مفصل یونیورسال از یک طرف به یک لغزنده و از طرف دیگر به مجری نهایی متصل شده است. از این رو این ربات 3-PUU نامگذاری شده است. طراحی مفصل این ربات بر این مبنا بوده که فقط سه حرکت انتقالی برای مجری نهایی امکان پذیر باشد.

برای اینکه مجری نهایی دوران نداشته باشد، آرایشی توسط مفصل یونیورسال تشکیل شده تا از دوران مجری نهایی جلوگیری کند. عملگرهای

در کاربردهای رایج قابل استفاده نیستند [4,5]. از طرفی در سال‌های اخیر ربات‌های موازی با درجه آزادی کمتر از شش، که هم شامل مزایای مکانیزم-های موازی و هم مزایای دیگری از قبیل کاهش هزینه تمام شده در طراحی و ساخت می‌باشند، توجه محققین زیادی را به خود جلب کرده‌اند [6]. ربات‌های سه درجه آزادی بسیاری برای کاربردهای مختلف، طراحی و مونتاژ شده‌اند [7,8]، که از جمله آنها می‌توان به ربات دلتا با سه درجه آزادی انتقالی، ربات موازی کروی با سه درجه آزادی چرخشی، و ربات‌های موازی با درجات آزادی ترکیبی نیز اشاره کرد [9]. از میان این ساختارها، ربات‌های موازی انتقالی [10] دارای پتانسیل زیادی در کاربردهایی از قبیل شبیه سازهای حرکت، ابزارهای موقعیت یاب و غیره که نیازمند حرکت انتقالی خالص اند، می‌باشند.

در رباتیک همانند بسیاری از کاربرد های مهندسی، به دلیل وجود انعطاف پذیری زیاد، اصطکاک کولمب، تنوع مقدار بار، اغتشاشات ناشناخته، کوپل دینامیکی قوی بین لینک‌های مختلف و پارامترهای متغیر با زمان مثل اصطکاک، به دست آوردن یک مدل دینامیکی دقیق برای ربات غیر ممکن یا بسیار سخت است. به همین دلیل مدل ریاضی یک ربات در بهترین حالت می‌تواند تقریبی از مدل واقعی باشد، در نتیجه خطای مدل کردن وجود خواهد داشت. وقتی که از یک مدل خطی با پارامترهای ثابت با زمان استفاده شود، این خطا بیشتر هم خواهد بود. در نتیجه نیاز به یک استراتژی کنترلی برای مقابله با عدم قطعیت‌های موجود بیش از پیش حس می‌شود [11,12].

ربات‌های موازی به دلیل آن‌که در ساختار خود دارای زنجیره سینماتیکی حلقه بسته می‌باشند، دارای دینامیک پیچیده‌ای هستند که همین مسأله نیز کنترل آنها را با مشکل مواجه کرده است. ارتباط معمول سینماتیک و دینامیک بازوها باید در طول فرایند حرکت موقعیت‌یابی شود. کنترل چنین سیستم‌هایی هنوز یکی از مسائل بحث برانگیز در زمینه کنترل روبات‌ها است. در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های زیادی برای طراحی و بهبود کنترل کننده برای سیستم‌های دارای عدم قطعیت انجام شده است. اساس عمده روش‌های کنترل مقاوم و غیرخطی شناخته شده، کنترل تطبیقی، کنترل مود لغزشی، ترکیب کنترل تطبیقی و مود لغزشی، کنترل مقاوم مبتنی برلیانوف هستند. در روش‌های تطبیقی غیرخطی مرسوم، کنترلر سعی می‌کند تا پارامترهای متغیر دینامیک‌های ساختاریافته ویژه‌ای را بدست آورد و می‌تواند به ردیابی خوبی برسد و عدم قطعیت‌های ساختاریافته و اغتشاشات محدود را جبران کند. در نتیجه این فاکتورها در مواردی که مدل دینامیکی ربات زیاد شناخته شده نیست یا زمانی که کنترل سریع زمان واقعی نیاز است، بر روی کنترل کننده‌های تطبیقی غیرخطی تاثیر می‌گذارند [13-15]. الگوریتم‌های کنترل حرکت بر مبنای تکنیک‌های طراحی کنترل کننده می‌توانند طبقه‌بندی شوند. از میان این طبقه‌بندی‌ها می‌توان به کنترل کننده PID کلاسیک اشاره نمود. تحقیقات بسیاری در زمینه کنترل این دسته از ربات‌ها صورت گرفته است. کنترل کننده‌های غیرخطی از قبیل روش‌های مبتنی بر لیانوف [16,17]، کنترل دینامیک معکوس (گشتاور محاسبه شده) [18,19] نیز استفاده شده‌اند که در بهبود پاسخ سیستم کنترلی و ردیابی سیگنال مرجع، عملکرد خیلی خوبی داشته‌اند. کردجری و اکبرزاده [20] با استفاده از کنترل کننده مبتنی بر دینامیک معکوس، به کنترل موقعیت یک نوع ربات موازی پرداخته‌اند که کنترل کننده طراحی شده را به ازای ورودی‌های مختلف تست نموده‌اند. از آنجا که دینامیک ربات‌های موازی دارای عوامل عدم قطعیت می‌باشند، کنترل کننده طراحی شده باید تا حد امکان مقاوم

$$p = \overrightarrow{OP} = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix}, \overrightarrow{PC_k} = \begin{pmatrix} d \cos \alpha_k \\ d \sin \alpha_k \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (k = 1, 2, 3) \quad (4)$$

با تفاضل رابطه (2) از (1) رابطه (5) بدست می‌آید:

$$\overrightarrow{B_k C_k} = \overrightarrow{OC_k} - \overrightarrow{OB_k} = \overrightarrow{OP} + \overrightarrow{PC_k} - \overrightarrow{OA_k} - \overrightarrow{A_k B_k} \quad (5)$$

بنابراین می‌توان رابطه (6) را نوشت:

$$\overrightarrow{B_k C_k} = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d \cos \alpha_k \\ d \sin \alpha_k \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} b \cos \alpha_k \\ b \sin \alpha_k \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ q_k \end{pmatrix} \quad (6)$$

و در نهایت رابطه (7) بدست می‌آید:

$$\overrightarrow{B_k C_k} = \begin{pmatrix} x_p + d \cos \alpha_k - b \cos \alpha_k \\ y_p + d \sin \alpha_k - b \sin \alpha_k \\ z_p + q_k \end{pmatrix}, \quad (k = 1, 2, 3) \quad (7)$$

اکنون فاصله دو نقطه B_k و C_k ، به دلیل قرار داشتن بر روی بازوی صلب توسط اندازه آن به صورت رابطه (8) و (9) مقید می‌گردد.

$$|\overrightarrow{B_k C_k}| = L \quad (8)$$

$$[x_p + (d - b) \cos \alpha_k]^2 + [y_p + (d - b) \sin \alpha_k]^2 + [z_p + q_k]^2 = L^2, \quad (k = 1, 2, 3) \quad (9)$$

با ساده‌سازی رابطه (9) برای کمیت q_k معادلات سینماتیک معکوس استخراج می‌شوند.

$$f_k = q_k^2 + 2 z_p q_k + (x_p + (d - b) \cos \alpha_k)^2 + (y_p + (d - b) \sin \alpha_k)^2 + z_p^2 - L^2 = 0, \quad (k = 1, 2, 3) \quad (10)$$

این سه معادله، معادلات قید سیستم را تشکیل می‌دهند. با تعریف کمیت F_i می‌توان رابطه (11) را نوشت:

$$F_k = (x_p + (d - b) \cos \alpha_k)^2 + (y_p + (d - b) \sin \alpha_k)^2 + z_p^2 - L^2 \quad (11)$$

و با جایگذاری رابطه (11) در رابطه (10)، معادلات سینماتیک معکوس مکانیزم مورد نظر برای هر کدام از پایه‌ها به دست می‌آید.

$$q_k = -z_p \pm \sqrt{z_p^2 - F_k}, \quad (k = 1, 2, 3) \quad (12)$$

در رابطه (12) دو جواب برای سینماتیک معکوس بدست می‌آید که با توجه به پیکربندی در نظر گرفته شده برای ربات، جواب منفی در این مکانیزم قابل قبول است.

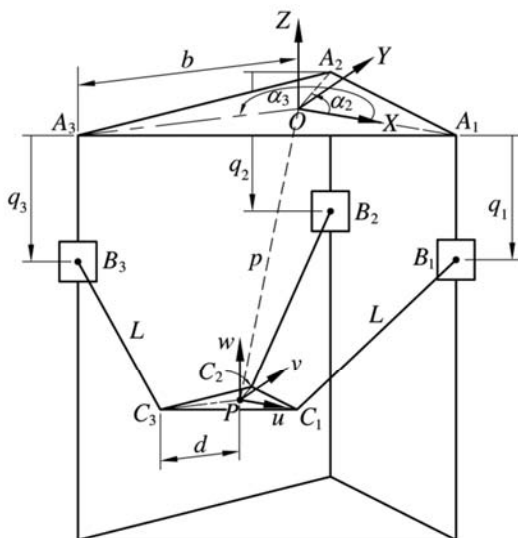


Fig. 2 Kinematic chains of the 3-PUU mechanism

شکل 2 زنجیره‌های سینماتیکی مکانیزم 3-PUU

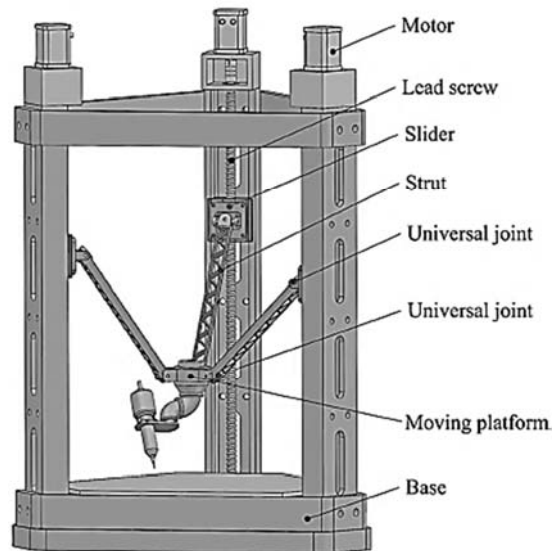


Fig. 1 Schematic structure of the 3-PUU parallel manipulator

شکل 1 ساختار شماتیک ربات موازی 3-PUU

این ربات از نوع موتور الکتریکی بوده که در واقع حرکت دورانی موتور توسط بال-اسکروها به حرکت انتقالی برای مجری نهایی تبدیل می‌شود. ریل‌های پایه ربات در زوایای 120 درجه نسبت به هم قرار گرفته‌اند، به گونه‌ای که تقارن مکانیزم حفظ شود. با توجه به نحوه قرار گیری عملگرها و مفاصل کشویی، مکانیزم دارای سفتی بالا جهت کاربرد در فرایندهای ماشین‌کاری و همچنین فرایندهای نیازمند دقت بالا می‌باشد. مجری نهایی در این ربات به دو صورت می‌تواند قرار بگیرد، در حالت اول مجری نهایی در بالای پایه ثابت یا رو به بالا قرار می‌گیرد و از آن می‌توان به عنوان شبیه‌ساز حرکت در کاربردهای مختلف استفاده کرد. حالت دوم، پیکربندی نشان داده شده در شکل است که مجری نهایی در پایین قرار می‌گیرد. از این حالت می‌توان در کاربردهای مختلف از جمله عملیات ماشین‌کاری و مونتاژ استفاده کرد.

3- تحلیل سینماتیک

برای تحلیل فضای کاری، تحلیل تکینگی، و همچنین استخراج معادلات دینامیکی حاکم بر مکانیزم، به معادلات سینماتیکی نیاز می‌باشد که در اینجا به سینماتیک معکوس مکانیزم پرداخته شده است.

در تحلیل سینماتیک معکوس، با داشتن موقعیت و جهت‌گیری مجری نهایی باید موقعیت عملگرها را تعیین کرد. در این قسمت با توجه به شکل 2 به استخراج معادلات سینماتیک معکوس با استفاده از روش تحلیلی پرداخته شده است. مطابق شکل 2 چارچوب مختصات مرجع XYZ در مرکز پلتفرم ثابت و مختصات دکارتی محلی uvw در مرکز پلتفرم متحرک (مجری نهایی) در نظر گرفته شده است. لینک رابط به طول L بین مجری نهایی و لغزنده در نظر گرفته شده است. بردار مکان نقاط ابتدا و انتهای لینک رابط i ام به صورت روابط (1) و (2) نوشته می‌شود:

$$\overrightarrow{OB_k} = \overrightarrow{OA_k} + \overrightarrow{A_k B_k} \quad (k = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$\overrightarrow{OC_k} = \overrightarrow{OP} + \overrightarrow{PC_k} \quad (k = 1, 2, 3) \quad (2)$$

که در آن:

$$\overrightarrow{OA_k} = \begin{pmatrix} b \cos \alpha_k \\ b \sin \alpha_k \\ 0 \end{pmatrix}, \overrightarrow{A_k B_k} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -q_k \end{pmatrix}, \quad (k = 1, 2, 3) \quad (3)$$

برای حل شش معادله دیفرانسیل حاصل که شامل 9 مجهول هستند، نیاز به سه معادله دیگر می‌باشد، که با دو بار مشتق‌گیری از معادلات قید (10) به صورت رابطه (23) به دست می‌آیند.

$$(q_k + z_p)\ddot{q}_k + (x_p - (d - b)\sin\alpha_k)\ddot{x}_p + (y_p - (d - b)\cos\alpha_k)\ddot{y}_p + (z_p + q_k)\ddot{z}_p + \dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2 + \dot{z}_p^2 + 2\dot{q}_k\dot{z}_p = 0 \quad (k = 1, 2, 3) \quad (23)$$

با محاسبه ضرایب لاگرانژ از معادلات (20) تا (22) و قرار دادن در معادلات (19) ضرایب لاگرانژ حذف شده و در نهایت، معادلات دینامیکی ربات به صورت شش معادله دیفرانسیل غیرخطی متشکل از سه معادله (19) و سه معادله (23) در می‌آیند. این شش معادله را می‌توان به فرم ماتریسی (24) نشان داد.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = F \quad (24)$$

که M و C و G به ترتیب ماتریس‌های جرم، ماتریس اثرات گریز از مرکز و ژبروسکوپی و بردار نیروهای گرانشی می‌باشند.

5- کنترل تطبیقی ربات سه درجه آزادی انتقالی

با توجه به اینکه مدل دینامیکی استخراج شده در بخش قبل بیانگر مدل دقیقی از رفتار سیستم نمی‌باشد و همچنین با توجه به وجود عدم قطعیت در پارامترهای سیستم از جمله جرم و ممان اینرسی، در این قسمت با استفاده از تئوری کنترل تطبیقی به طراحی کنترل کننده برای ربات موازی مورد مطالعه پرداخته خواهد شد. بدین منظور، ابتدا با استفاده از تئوری خطی‌سازی بازخوردی، قانون کنترل استخراج شده و در ادامه با استفاده از تئوری پایداری لیاپانوف، قانون تطبیق نیز استخراج می‌شود.

در تئوری کنترل تطبیقی به علت عدم وجود آگاهی از پارامترهای سیستم، تخمین، یکی از گام‌های اساسی می‌باشد. در روش خطی‌سازی بازخوردی، بزرگترین مرتبه مشتق به عنوان سیگنال کنترلی جدید در نظر گرفته می‌شود.

$$\ddot{q} = u \quad (25)$$

حال، مدل دینامیکی ربات که در رابطه (24) نشان داده شده به صورت رابطه (26) بازنویسی می‌شود.

$$\tilde{M}(\theta)u + \tilde{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \tilde{G}(\theta) = F \quad (26)$$

در رابطه (26) ماتریس‌های \tilde{M} ، \tilde{C} و \tilde{G} تخمین ماتریس‌های مدل می‌باشند. قانون کنترلی برای تعیین ورودی کنترلی u در سیستم مورد نظر به صورت رابطه (27) در نظر گرفته می‌شود.

$$u = \ddot{\theta}_d - K_d\dot{e} - K_p e \quad (27)$$

که K_p و K_d ماتریس‌های قطری بهره در روش خطی‌سازی بازخوردی و $e = \theta - \theta_d$ می‌باشد. با استفاده از روابط (26) و (27) ورودی کنترلی به صورت رابطه (28) استخراج می‌شود.

$$F = \tilde{M}(\theta)(\ddot{\theta}_d - K_d\dot{e} - K_p e) + \tilde{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \tilde{G}(\theta) \quad (28)$$

با جایگذاری ورودی کنترلی در رابطه (24) و ساده سازی، معادله دینامیک حلقه بسته با وجود عدم قطعیت پارامتری در سیستم به صورت رابطه (29) درخواهد آمد.

$$\tilde{M}(\theta)(\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e) = \tilde{M}(\theta)\ddot{\theta} + \tilde{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \tilde{G}(\theta) \quad (29)$$

که \tilde{M} ، \tilde{C} و \tilde{G} در واقع خطای تخمین در پارامترهای مدل دینامیکی ربات می‌باشند و به صورت رابطه (30) تعریف می‌شوند.

$$\tilde{M} = \tilde{M} - M, \quad \tilde{C} = \tilde{C} - C, \quad \tilde{G} = \tilde{G} - G \quad (30)$$

عبارت $\tilde{M}(\theta)\ddot{\theta} + \tilde{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \tilde{G}(\theta)$ در رابطه (29) به نوعی تضمین

مقادیر پارامترهای فیزیکی مکانیزم که در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته در جدول 1 آمده است.

4- مدل سازی دینامیکی

در این بخش، مدل دینامیکی ربات بر مبنای مدل سینماتیکی ارائه شده در بخش سوم استخراج می‌شود. برای استخراج مدل دینامیکی ربات از روش لاگرانژ استفاده می‌شود. از آنجایی که سیستم دینامیکی این مکانیزم موازی یک سیستم مقید است، فرمول‌بندی معادلات لاگرانژ برای سیستم مقید، مطابق رابطه (13) به کار گرفته می‌شود.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_j}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_j} = F_j + \sum_{k=1}^3 \lambda_k \frac{\partial f_k}{\partial \theta_j} \quad (j = 1, 2, \dots, 6) \quad (13)$$

که در آن θ_j ، F_j و λ_k به ترتیب بیانگر ضرایب لاگرانژ و معادلات قید هستند. مختصات تعمیم یافته برای توصیف سیستم به صورت رابطه (14) می‌باشد.

$$\theta = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad x_p \quad y_p \quad z_p]^T \quad (14)$$

که متشکل از موقعیت لغزنده‌ها و مؤلفه‌های موقعیت مجری نهایی است. تابع لاگرانژین به صورت رابطه (15) نوشته می‌شود.

$$L(\theta, \dot{\theta}) = K(\theta, \dot{\theta}) - U(\theta) \quad (15)$$

که $K(\theta, \dot{\theta})$ و $U(\theta)$ به ترتیب انرژی جنبشی و پتانسیل ربات می‌باشند. انرژی جنبشی ربات به صورت رابطه (16) بیان می‌شود.

$$K = \frac{1}{2}m_1(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2) + \frac{1}{2}m_2(\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2 + \dot{z}_p^2) , m_1 = m_s + \frac{m_l}{2} , m_2 = m_e + 3\left(\frac{m_l}{2}\right) \quad (16)$$

که در آن m_s ، m_l و m_e به ترتیب بیانگر جرم مجری نهایی، جرم میله‌های رابط و جرم لغزنده‌های ربات هستند. جرم شش میله رابط، مساوی با هم و هریک متمرکز در دو انتها فرض شده است. همچنین می‌توان انرژی پتانسیل مکانیزم را به صورت رابطه (17) نوشت.

$$U = m_1 g(q_1 + q_2 + q_3) + m_2 g z_p \quad (17)$$

با جایگذاری روابط (16) و (17) در رابطه (15)، لاگرانژین به صورت رابطه (18) بازنویسی می‌شود.

$$L = \frac{1}{2}m_1(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2) + \frac{1}{2}m_2(\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2 + \dot{z}_p^2) - [m_1 g(q_1 + q_2 + q_3) + m_2 g z_p] \quad (18)$$

با جایگذاری لاگرانژین در معادلات (13)، شش معادله لاگرانژ به صورت روابط (19-22) در خواهند آمد:

$$m_1 \ddot{q}_j - 2\lambda_j(z_p + q_j) - m_1 g = F_j \quad (j = 1, 2, 3) \quad (19)$$

$$m_2 \ddot{x}_p - \sum_{j=1}^3 2\lambda_j \{x_p + (d - b)\cos\alpha_j\} = 0 \quad (20)$$

$$m_2 \ddot{y}_p - \sum_{j=1}^3 2\lambda_j \{y_p + (d - b)\sin\alpha_j\} = 0 \quad (21)$$

$$m_2 \ddot{z}_p + m_2 g - \sum_{j=1}^3 2\lambda_j \{z_p + q_j\} = 0 \quad (22)$$

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 میله‌های رابط
m_l	0.2kg	جرم میله‌های رابط
m_s	1kg	جرم لغزنده‌ها
m_e	0.5kg	جرم مجری نهایی

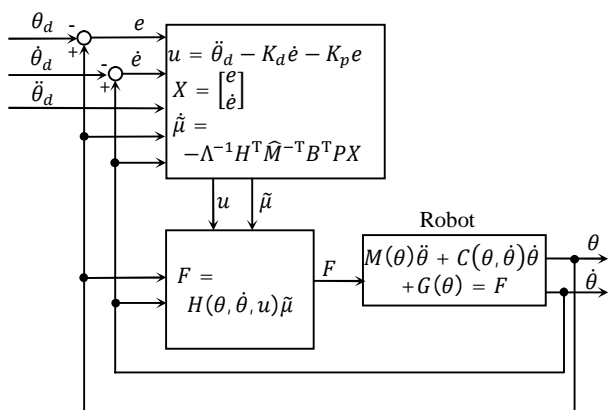


Fig. 3 Block diagram of the control system

شکل 3 نمودار بلوکی سیستم کنترلی

6- طراحی مسیر

به منظور استفاده از ربات در فعالیتهای صنعتی، طراحی مسیر از اهمیت خاصی برخوردار است. طراحی مسیر ربات به وسیله تعدادی نقطه دقت که نشان دهنده 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 (40) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} x_d(t) &= \text{spline}(X, T, t) \\ y_d(t) &= \text{spline}(Y, T, t) \\ z_d(t) &= \text{spline}(Z, T, t) \end{aligned} \quad (40)$$

در روابط (40)، بردارهای X, Y, 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 بر اساس 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. بنا بر این، تابع هدف در نظر گرفته شده به صورت رابطه (41) می‌باشد.

$$\text{ObjFun} = \alpha S + \beta C \quad (41)$$

که S و C به ترتیب بیانگر طول منحنی و شاخص برخورد با موانع و α و β وزن داده شده به هر یک می‌باشند. طول مسیر و شاخص برخورد با موانع با استفاده از روابط (42) محاسبه می‌شوند. در این روابط، مسیر، دو بعدی و موانع، دایره‌ای شکل فرض شده‌اند.

$$\begin{aligned} x_j &= \text{spline}(X, T, t_j), \quad y_j = \text{spline}(Y, T, t_j), \\ & \quad (j = 1, 2, \dots, n) \\ S &= \sum_{j=2}^n \sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2} \\ \Delta_{j,k} &= \sqrt{(x_j - x_{C_k})^2 + (y_j - y_{C_k})^2}, \quad (k = 1, 2, \dots, n_c) \\ c_{j,k} &= \max\left(1 - \frac{\Delta_{j,k}}{R_k + m}, 0\right), \quad C_k = \text{mean}(c_{j,k}) \\ C &= \sum_{k=1}^{n_c} C_k \end{aligned} \quad (42)$$

در این روابط، (x_j, y_j) نقاط میانبایی شده، n تعداد نقاط میانبایی، 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

کننده همگرایی و پایداری سیستم می‌باشد. لذا به منظور تخمین درست پارامترها در سیستم کنترلی، قانون تطبیق باید استخراج شود.

رابطه (24) که بیانگر مدل دینامیکی ربات است، نسبت به پارامترهای سیستم یک رابطه خطی می‌باشد. با جایگذاری ورودی کنترلی در رابطه (24) فرم کلی معادله سیستم به صورت رابطه (31) تعریف می‌شود.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = H(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})\mu \quad (31)$$

که μ بردار پارامترهای دارای عدم قطعیت و H یک ماتریس است که درایه‌های آن به صورت سیمبولیک بر اساس رابطه (31) به وسیله نرم افزار ماثکد¹ تعیین شده است. مجدداً معادله خطای دینامیک حلقه بسته به صورت رابطه (32) بازنویسی می‌شود.

$$\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e = \hat{M}^{-1}H(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})\tilde{\mu} \quad (32)$$

در رابطه (32)، $\tilde{\mu} = \hat{\mu} - \mu$ مقدار خطای تخمینی برای پارامترهای دارای عدم قطعیت می‌باشد. به منظور بازنویسی رابطه (32) در فرم فضای حالت، با در نظر گرفتن متغیرهای حالت به صورت $X = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}$ ، رابطه (32) به صورت رابطه (33) در خواهد آمد.

$$\dot{X} = AX + B\hat{M}^{-1}H\tilde{\mu} \quad (33)$$

که در آن،

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_p & -K_d \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad (34)$$

حال به منظور استخراج قانون تطبیق، تابع لیاپانوف به صورت رابطه (35) در نظر گرفته می‌شود.

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

در رابطه (35)، Λ یک ماتریس متقارن و P نیز از حل معادله لیاپانوف نشان داده شده در رابطه (36) برای ماتریس مثبت معین و متقارن Q بدست خواهد آمد.

$$A^T P + P A = -Q \quad (36)$$

برای اثبات پایداری روش کنترلی پیشنهادی و همچنین استخراج قانون تطبیق، با مشتق‌گیری از طرفین تابع لیاپانوف نشان داده شده در رابطه (36) می‌توان رابطه (37) را نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{X}^T P X + X^T P \dot{X} + \dot{\tilde{\mu}}^T \Lambda \tilde{\mu} + \tilde{\mu}^T \Lambda \dot{\tilde{\mu}} \\ &= \dot{X}^T P X + X^T P \dot{X} + 2\tilde{\mu}^T \Lambda \dot{\tilde{\mu}} \end{aligned} \quad (37)$$

با جایگذاری ترم \dot{X} از رابطه (33) و همچنین ساده‌سازی ریاضی رابطه (38) بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (AX + B\hat{M}^{-1}H\tilde{\mu})^T P X + X^T P (AX + B\hat{M}^{-1}H\tilde{\mu}) + 2\tilde{\mu}^T \Lambda \dot{\tilde{\mu}} \\ &= X^T A^T P X + (B\hat{M}^{-1}H\tilde{\mu})^T P X + X^T P A X \\ &\quad + X^T P B \hat{M}^{-1} H \tilde{\mu} + 2\tilde{\mu}^T \Lambda \dot{\tilde{\mu}} \\ &= X^T (A^T P + P A) X + 2(B\hat{M}^{-1}H\tilde{\mu})^T P X + 2\tilde{\mu}^T \Lambda \dot{\tilde{\mu}} \\ &= -X^T Q X + 2\tilde{\mu}^T H^T (\hat{M}^{-1})^T B^T P X + 2\tilde{\mu}^T \Lambda \dot{\tilde{\mu}} \end{aligned} \quad (38)$$

با توجه به رابطه (38)، به منظور حفظ پایداری کنترل کننده پیشنهادی، باید مشتق تابع لیاپانوف انتخابی منفی معین باشد، که با استفاده از این مفهوم قانون تطبیق برای کنترل کننده پیشنهادی به صورت رابطه (39) استخراج خواهد شد.

$$\dot{\tilde{\mu}} = -\Lambda^{-1} H^T (\hat{M}^{-1})^T B^T P X \quad (39)$$

با انتخاب قانون تطبیق نشان داده شده در رابطه (39)، پایداری مجانبی دینامیک حلقه بسته نیز تضمین می‌شود. نمودار بلوکی سیستم کنترلی در شکل 3 نمایش داده شده است.

¹ Mathcad

می‌شوند.

2-7- تعیین اولیه حافظه هارمونی با بردارهای حل تصادفی

در این مرحله ماتریس HM با تعداد بسیار زیادی بردار جواب تولید شده به صورت تصادفی و با توجه به HMS مطابق رابطه (44) پر می‌گردد.

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \quad (44)$$

3-7- بداهه نوازی یا تولید یک بردار هارمونی جدید

یک بردار هارمونی جدید $X' = \{x'_1, x'_2, \dots, x'_N\}$ بر مبنای سه قانون تولید می‌گردد که به آن بداهه‌نوازی می‌گویند و عبارت‌اند از: 1- ملاحظات حافظه، 2- تنظیم صدادهی، 3- انتخاب تصادفی. در ملاحظات حافظه، مقادیر بردار هارمونی جدید به طور تصادفی از بردارهای موجود در HM با احتمال $HMCR$ انتخاب می‌شوند به عبارت دیگر مقدار اولین متغیر تصمیم‌گیری بین x_1^1 و x_1^{HMS} انتخاب می‌گردد. مقادیر دیگر متغیرها نیز به روش مشابه مطابق رابطه (45) انتخاب می‌گردند، $HMCR$ که مقداری بین 0 تا 1 و متغیر است، نرخ انتخاب یک مقدار از مقادیر محاسبه‌شده قبلی است، که در HM ذخیره شده است و $(1-HMCR)$ نرخ گزینش تصادفی یک مقدار از محدوده ممکن مقادیر است.

$$x'_i = \begin{cases} x'_i \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\}; & \text{با احتمال } ([HMCR]) \\ x'_i \in X_i; & \text{با احتمال } ([1 - HMCR]) \end{cases} \quad (45)$$

هر جز به دست آمده توسط ملاحظات حافظه برای تعیین اینکه تنظیم صدادهی مناسب‌تر است یا خیر امتحان می‌شود. این عمل با استفاده از پارامتر PAR انجام می‌گیرد که با استفاده از رابطه (46) تعریف می‌شود.

$$x'_i = \begin{cases} x'_i + \text{rand} \times BW; & \text{با احتمال } (PAR) \\ x'_i; & \text{با احتمال } ([1 - PAR]) \end{cases} \quad (46)$$

مقدار $[1 - PAR]$ نرخ انجام هیچ عمل را مشخص می‌کند. اگر تصمیم برای تنظیم صدادهی مثبت باشد X_i^{new} با توجه به رابطه (47) جایگزین می‌شود.

$$X_i^{\text{new}} = X_i^{\text{old}} \pm BW \times \varepsilon \quad (47)$$

که X_i^{new} صدادهی جدید بعد از تنظیم صدادهی، X_i^{old} صدادهی موجود انتخاب شده از HM و ε یک عدد تصادفی در محدوده $(-1, 1)$ می‌باشند. در مرحله بداهه‌نوازی یا تولید یک بردار هارمونی جدید، ملاحظات حافظه، تنظیم صدادهی و انتخاب تصادفی بر روی هر متغیر بردار هارمونی جدید اعمال می‌گردد.

4-7- به روز نمودن حافظه هارمونی

در صورتی که بردار هارمونی جدید از بدترین بردار هارمونی در HM (X_{worst}) بر مبنای تابع هدف انتخابی بهتر باشد، بردار هارمونی جدید داخل HM قرار گرفته و بدترین هارمونی موجود از مجموعه HM کنار گذاشته می‌شود. روند این فرایند توسط رابطه (48) بیان می‌شود.

$$X_{\text{worst}} = X_{\text{new}} \quad \text{اگر } f(X_{\text{new}}) < f(X_{\text{worst}}) \quad (48)$$

5-7- بررسی معیار و ناحیه توقف الگوریتم

اگر ناحیه توقف الگوریتم (حداکثر تعداد بداهه‌نوازی) برآورده شود، محاسبات

برخورد مسیر با مانع k -ام می‌باشند. روابط (42) به سادگی برای مسیرهای سه بعدی و موانع کروی قابل توسعه می‌باشند. شاخص برخورد به گونه‌ای 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 (41) را کمینه کنند، از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده شده است.

7- الگوریتم جستجوی هارمونی

الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA)، از پدیده‌های موسیقی الهام گرفته شده است و اولین بار توسط گیم و همکاران ارائه شد [23]. الگوریتم HS بر اساس فرایند بداهه‌نوازی موسیقی استوار است که در آن نوازندگان موسیقی مرحله به مرحله برای به دست آوردن هارمونی بیشتر و صدادهی بهتر سازهای خود را به صدا درمی‌آورند. فرایند فوق مشابه یک فرایند بهینه‌سازی است که در آن جواب بهینه می‌تواند توسط ارزیابی تابع هدف جستجو شود. در این الگوریتم بردار حل "هارمونی" نامیده می‌شود. به عبارت دیگر، هر هارمونی یک بردار است که اجزای آن مقادیر اختصاص داده شده به متغیرهای تصمیم‌گیری یک مسأله می‌باشند. در صورتی که مسأله بهینه‌سازی دارای N متغیر باشد، بردار هارمونی نیز دارای N جزء خواهد بود [23-25]. از جمله مزایای این الگوریتم می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- آسان برای درک، آسان برای پیاده‌سازی و بی‌نیاز از مسائل و فرمول‌های سخت ریاضی.
- از آنجا که این الگوریتم از اعداد تصادفی استفاده می‌کند نیاز به هیچ اطلاعات اضافی نیست.
- برخلاف دیگر الگوریتم‌ها که حداکثر از دو بردار برای تولید نسل جدید استفاده می‌کنند، این الگوریتم از تمام بردارها برای تولید نسل جدید استفاده می‌کند.
- مراحل اصلی این الگوریتم شامل 5 مرحله به شرح زیر است. 1) تعیین اولیه مسأله و پارامترهای الگوریتم. 2) تعیین اولیه حافظه هارمونی با بردارهای حل تصادفی. 3) بداهه‌نوازی یا تولید یک بردار هارمونی جدید. 4) به روز نمودن حافظه هارمونی. 5) بررسی معیار توقف الگوریتم و تکرار مراحل 3 و 4. در ادامه به توضیح مراحل الگوریتم پرداخته می‌شود.

1-7- تعیین اولیه مسأله و پارامترهای الگوریتم

در مرحله اول، مسأله بهینه‌سازی به صورت رابطه (43) مشخص می‌گردد:

$$\text{Min: } \{f(x) | x \in X\} \quad (43)$$

مشروط به $g(x) \geq 0$ و $h(x) = 0$

که $f(x)$ تابع هدف، $h(x)$ تابع قیود مساوی و $g(x)$ تابع قیود غیر تساوی، x بردار متغیرهای تصمیم‌گیری x_i و X_i مجموعه محدوده ممکن مقادیر هر متغیر تصمیم‌گیری، که $X_{iL} \leq x_i \leq X_{iU}$ و X_{iL} و X_{iU} به ترتیب حدود پایینی و بالایی برای هر متغیر تصمیم‌گیری می‌باشند. پارامترهای الگوریتم نیز در این مرحله مشخص می‌شوند که شامل اندازه حافظه هارمونی (HMS) (تعداد بردارهای جواب در حافظه هارمونی)، نرخ ملاحظه حافظه هارمونی ($HMCR$)، نرخ تنظیم صدادهی (PAR)، تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری (N)، تعداد بداهه‌نوازی (NI) (معیار توقف الگوریتم) و فاصله پهنای باند (BW) می‌باشند. حافظه هارمونی (HM) یک محل حافظه است که تمام بردارهای جواب (دسته متغیرهای تصمیم‌گیری) در آن ذخیره

استفاده می‌شود. به این صورت که هر بار، به هریک از ده متغیر تصمیم (پنج متغیر مربوط به مختصه X نقاط میانی و پنج متغیر مربوط به مختصه Y نقاط) در بازه مناسب تغییرات داده می‌شود و سایر متغیرها ثابت نگه داشته می‌شوند. تابع هدف، به ازای تغییرات در هریک از متغیرها باید کمترین مقدار خود را در مقدار به دست آمده از الگوریتم جستجوی هارمونی، نشان دهد. در این تحقیق، تغییرات تابع هدف، به ازای ده متغیر تصمیم، در شکل‌های 7 و 8 نشان داده شده است و کمینه شدن تابع هدف در مقادیر بهینه به دست آمده از طریق الگوریتم HS صحت‌گذاری شده است.

8-2- شبیه‌سازی در مسیر اول

در شبیه‌سازی اول، تکنیک کنترلی تطبیقی به کمک خطی‌سازی فیدبک در

جدول 2 مشخصات موانع دایره‌ای در مسیر اول

Table 2 Specifications of circular obstacles in the first trajectory

مانع	مرکز (mm)	شعاع (mm)	حاشیه (mm)
1	(-100, -130, -250)	30.0	8.00
2	(-60.0, 0.00, -250)	64.0	8.00
3	(70.0, 20.0, -250)	20.0	8.00
4	(130, 120, -250)	36.0	8.00

جدول 3 پارامترهای مورد استفاده الگوریتم جستجوی هارمونی

Table 3 HSA parameters

پارامتر	مقدار
N	10
HMS	10
$HMCR$	0.8
PAR	0.3
BW	0.01
NI	1200

جدول 4 نتایج بهینه‌سازی برای نقاط دقت

Table 4 Optimization results for accuracy points

T (s)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
0.0	-200	-200	-250
0.5	-156	-128	-250
1.0	-86.1	-83.6	-250
1.5	8.02	-43.4	-250
2.0	36.8	72.4	-250
2.5	98.1	157	-250
3.0	200	200	-250

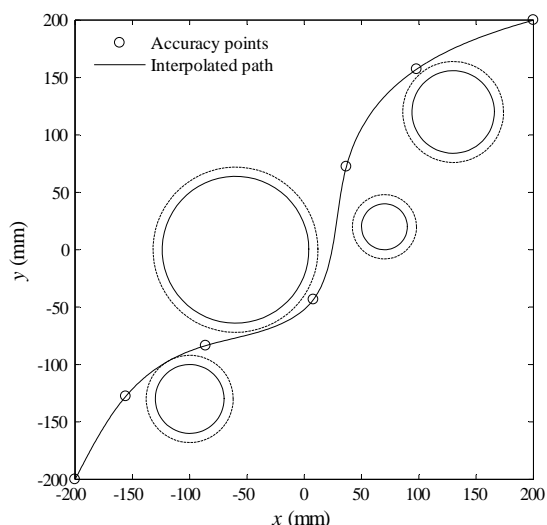


Fig. 5 Optimized trajectory generated by HSA

شکل 5 مسیر بهینه تولید شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی

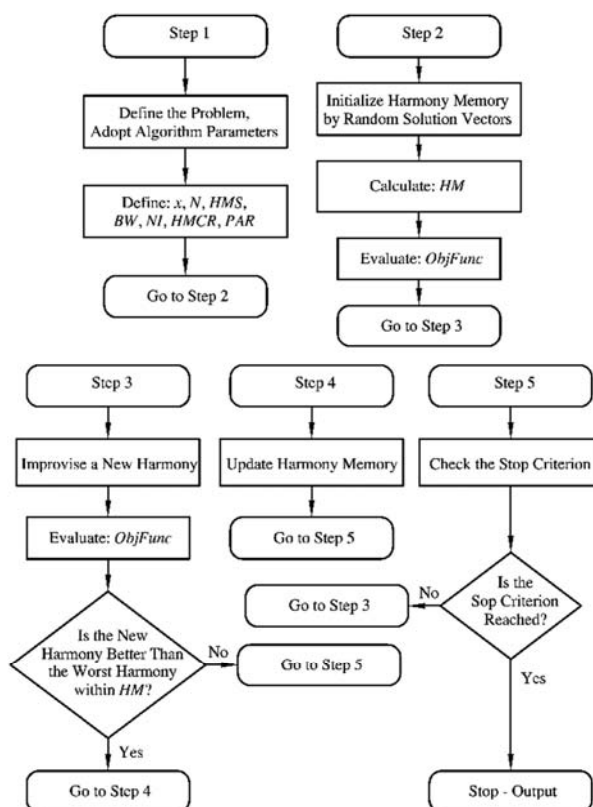


Fig. 4 Flowchart of harmony search algorithm

شکل 4 فلوچارت الگوریتم جستجوی هارمونی

پایان یافته و در غیر این صورت مراحل 3 و 4 تکرار می‌گردند. شکل 4 نمایش دهنده فلوچارت اجرای الگوریتم جستجوی هارمونی می‌باشد.

8- نتایج

در این قسمت به ارائه نتایج حاصل از بهینه‌سازی و طراحی مسیرهای بهینه به کمک الگوریتم جستجوی هارمونی، و همچنین شبیه‌سازی حرکت مکانیزم تحت کنترل روی مسیرهای بهینه پرداخته می‌شود. به منظور شبیه‌سازی و اعمال تکنیک کنترلی دو مسیر برای حرکت ربات طراحی شده و نتایج پیاده سازی سیستم حلقه بسته برای کنترل ربات در دو شبیه‌سازی در قسمت‌های بعد آورده می‌شود.

8-1- مسیر اول

در طراحی مسیر اول، هدف دستیابی به یک مسیر دوبعدی بهینه در ارتفاع ثابت 250mm از نقطه شروع (-200,-200)mm تا نقطه انتهایی (200,200)mm می‌باشد. بین مسیر، چهار مانع دایره‌ای شکل با مشخصات داده شده در جدول 2 در نظر گرفته شده‌اند. در بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی هارمونی، پس از آزمون و خطا از وزن‌های $\alpha = 1$ و $\beta = 10$ استفاده شده است. پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم در جدول 3 لیست شده‌اند و نقاط دقت میانی به دست آمده از الگوریتم جستجوی هارمونی پس از 1200 تکرار در جدول 4 نمایش داده شده‌اند.

منحنی مسیر حاصل از بهینه‌سازی و سپس میانبایی اسپلاین در شکل 5 نمایش داده شده است. همچنین همگرایی الگوریتم، به صورت نمایش مقدار میانگین تابع هدف در هر تکرار در شکل 6 نشان داده شده است.

برای اعتبارسنجی نتایج الگوریتم بهینه‌سازی، از روشی مشابه [22]

نظر گرفته شده، نشان داده نشده است.

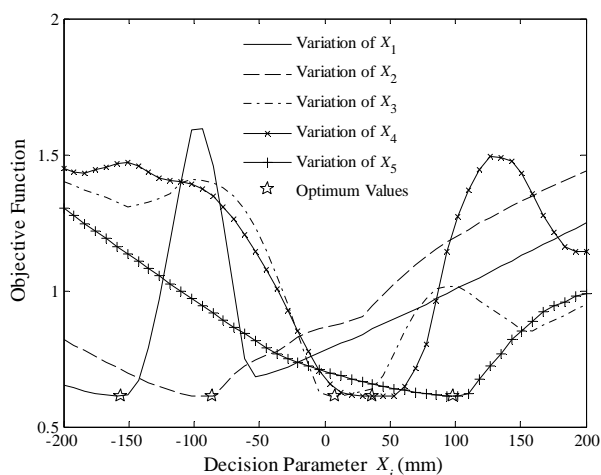


Fig. 7 Objective function variation with respect to decision parameters (X coordinates)

شکل 7 تغییرات تابع هدف به ازای تغییرات در هر یک از پارامترها (مختصات X)

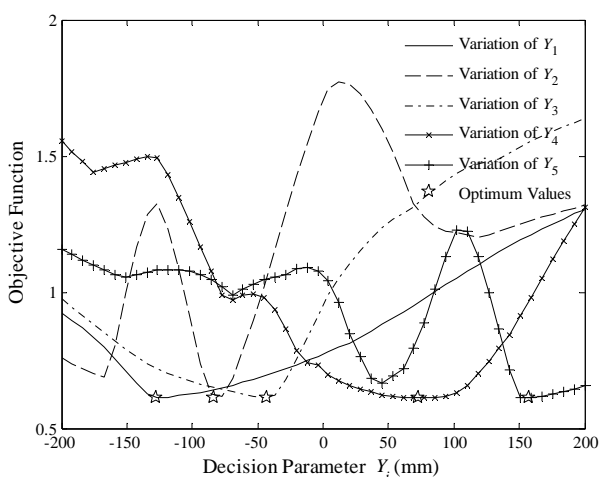


Fig. 8 Objective function variation with respect to decision parameters (Y coordinates)

شکل 8 تغییرات تابع هدف به ازای تغییرات در هر یک از پارامترها (مختصات Y)

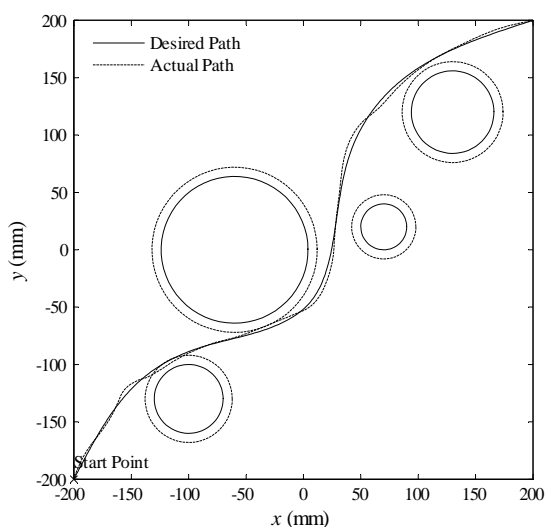


Fig. 9 Desired and actual paths of the end-effector

شکل 9 مسیره‌های واقعی و مطلوب مجری نهایی

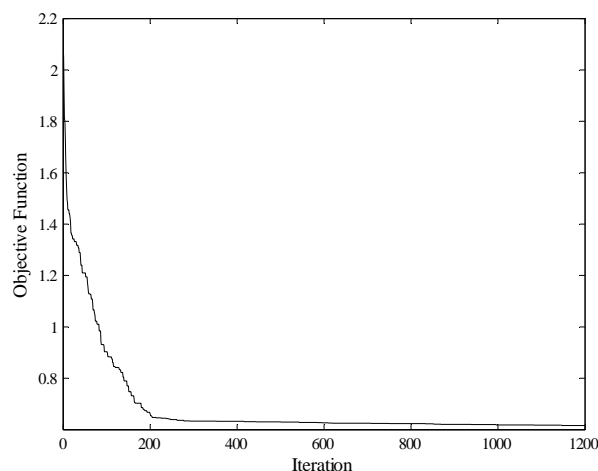


Fig. 6 HSA Convergence

شکل 6 همگرایی الگوریتم جستجوی هارمونی

تعقیب مسیر مورد نظر پیاده‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی، 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 به عنوان عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. مسیره‌های مطلوب و کنترل شده مجری نهایی در شکل 9 نشان داده شده‌اند. رفتار کیفی حاصل، نشان دهنده 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 10 و 11 به طور واضح تر دیده می‌شود. مؤلفه‌های خطای تعقیب مسیر در شکل 12 نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است سیگنال خطای حاصل از تکنیک تطبیقی علاوه بر داشتن مقادیر کوچک، نوسان‌های کمی نیز دارد. سیگنال‌های کنترلی عملگرها برای کنترل ربات در مسیر مطلوب در شکل 13 نشان نشان داده شده‌اند. چنانکه دیده می‌شود سیگنال‌های کنترلی نسبتاً هموار بوده و به محدوده اشباع خود نرسیده‌اند.

3-8- مسیر دوم

در مسیر دوم، هدف، دستیابی به یک مسیر سه بعدی بهینه از نقطه شروع (-200, -200, -600) تا نقطه انتهایی (200, 200, -200) می‌باشد. بین مسیر، سه مانع کروی با مشخصات داده شده در جدول 5 در نظر گرفته شده‌اند. در بهینه‌سازی، از وزنه‌های $\alpha = 1$ و $\beta = 10$ برای تابع هدف استفاده شده است. پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم، همان پارامترهای جدول 3 هستند به غیر از تعداد متغیرهای تصمیم که برابر با $N=15$ می‌باشد. نقاط دقت میانی به دست آمده از الگوریتم جستجوی هارمونی پس از 1200 تکرار در جدول 6 نمایش داده شده‌اند.

منحنی مسیر حاصل از بهینه‌سازی در شکل 14 و همگرایی الگوریتم نیز در شکل 15 نمایش داده شده است. در این شکل 14، فاصله حاشیه‌ای در

جدول 5 مشخصات موانع کروی در مسیر دوم

Table 5 Specifications of spherical obstacles in the second trajectory

مانع	مرکز (mm)	شعاع (mm)	حاشیه (mm)
1	(-70.0, -70.0, -500)	60.0	8.00
2	(-20.0, 20.0, -400)	70.0	8.00
3	(80.0, 80.0, -300)	40.0	8.00

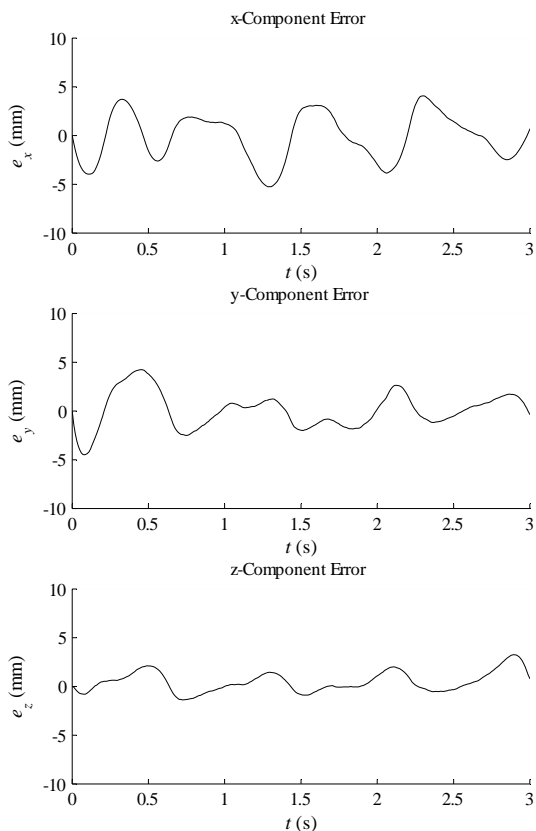


Fig. 12 Tracking-error components

شکل 12 مؤلفه‌های خطای تعقیب مسیر

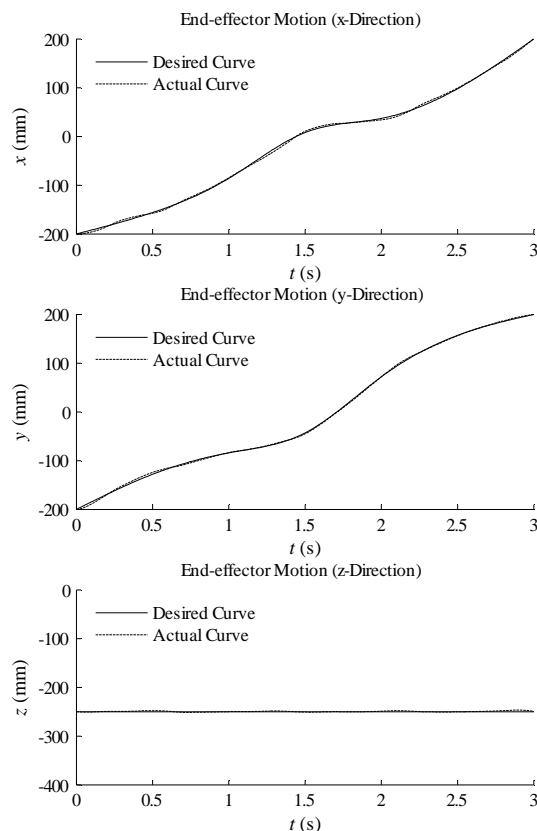


Fig. 10 End-effector motion plots

شکل 10 نمودار زمانی حرکت مجری نهایی

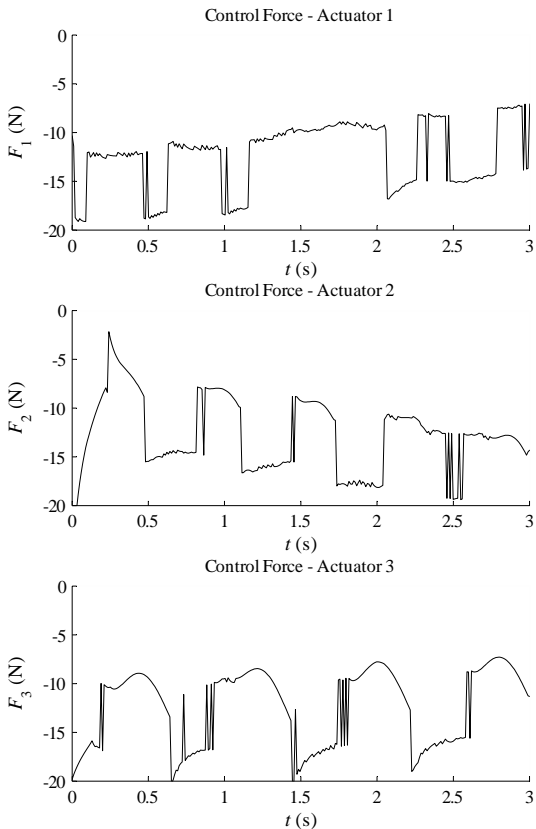


Fig. 13 Control signals

شکل 13 سیگنال‌های کنترلی

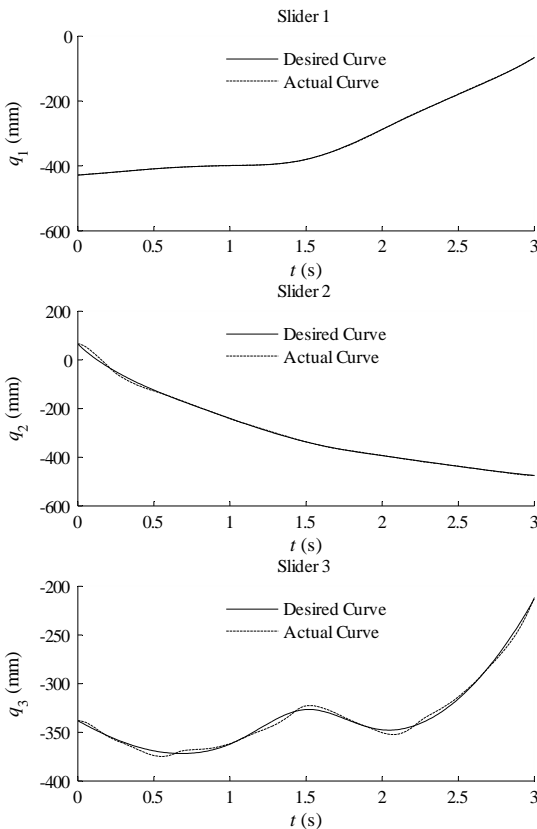


Fig. 11 Sliders motion plots

شکل 11 نمودار زمانی حرکت لغزنده‌ها

نشان داده شده‌اند. چنان‌که دیده می‌شود سیگنال‌های کنترلی نسبتاً

جدول 6 نتایج بهینه‌سازی برای نقاط دقت

Table 6 Optimization results for accuracy points

T (s)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
0.0	-200	-200	-600
0.5	-144	-94.6	-475
1.0	-102	-83.8	-435
1.5	31.9	-29.2	-379
2.0	42.8	104	-306
2.5	105	154	-292
3.0	200	200	-200

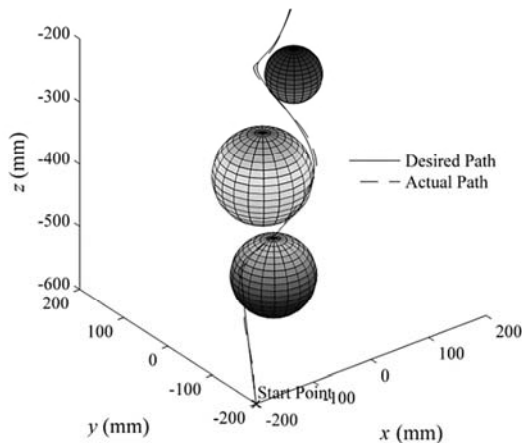


Fig. 16 End-effector trajectory – 3D view

شکل 16 مسیر مجری نهایی - نمای سه بعدی

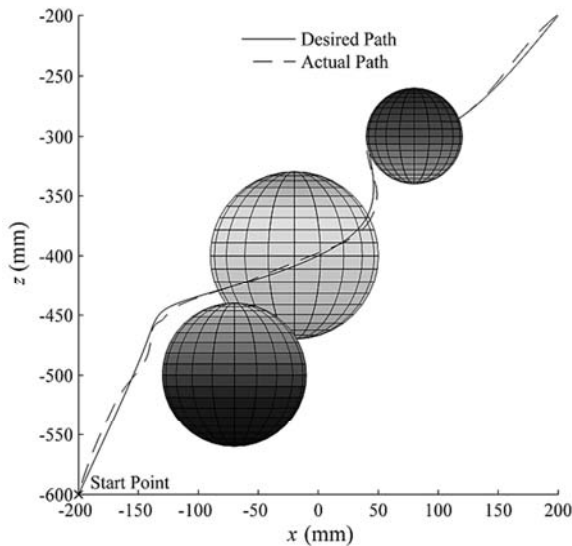


Fig. 17 End-effector trajectory – Front view

شکل 17 مسیر مجری نهایی - نمای جلو

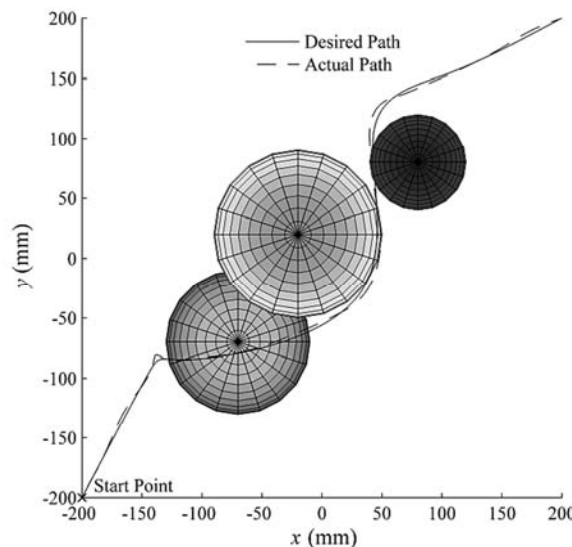


Fig. 18 End-effector trajectory – Top view

شکل 18 مسیر مجری نهایی - نمای بالا

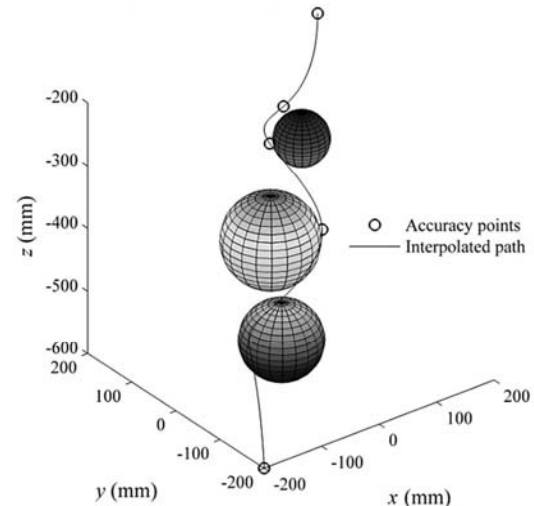


Fig. 14 Optimized trajectory generated by HSA

شکل 14 مسیر بهینه تولید شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی

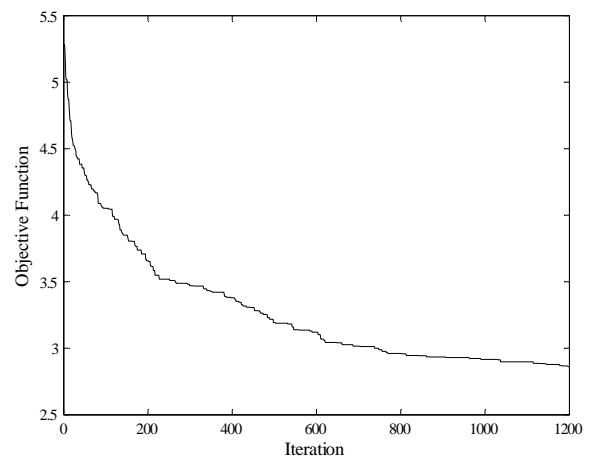


Fig. 15 HSA Convergence

شکل 15 همگرایی الگوریتم جستجوی هارمونی

4-8- شبیه‌سازی در مسیر دوم

در شبیه‌سازی دوم، مسیر بهینه سه بعدی طراحی شده در حضور موانع کروی به عنوان مسیر مرجع به ربات داده شده است. نیروهای اغتشاشی و عدم قطعیت مربوط به شبیه‌سازی اول، در این شبیه‌سازی نیز در نظر گرفته شده‌اند و نتایج پیاده‌سازی تکنیک کنترلی ربات آورده شده است. مسیرهای مطلوب و کنترل شده مجری نهایی در شکل‌های 16 تا 18 نشان داده شده‌اند. تعقیب مسیر مطلوب در منحنی‌های نمودار زمانی حرکت مجری نهایی و لغزنده‌ها در شکل‌های 19 و 20 دیده می‌شوند.

مؤلفه‌های خطای تعقیب مسیر در شکل 21 نمایش داده شده است. سیگنال‌های کنترلی عملگرها برای کنترل ربات در مسیر مطلوب در شکل 22

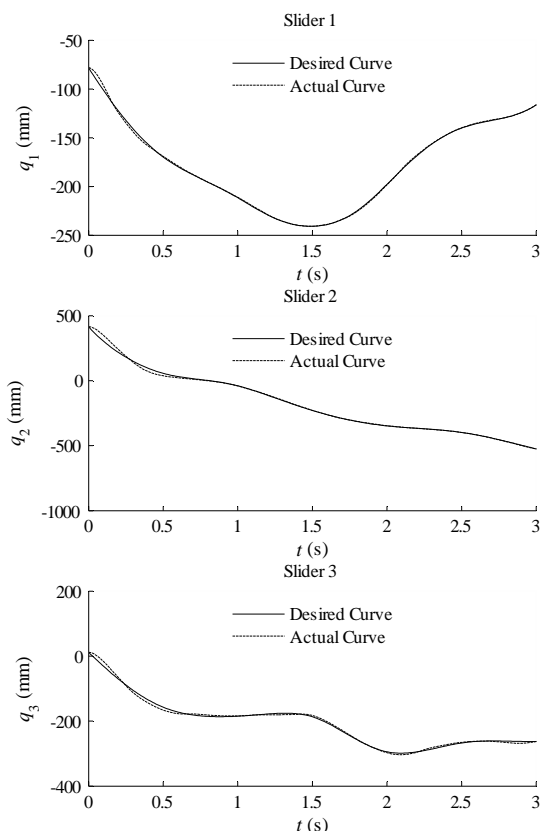


Fig. 20 Sliders motion plots

شکل 20 نمودار زمانی حرکت لغزنده‌ها

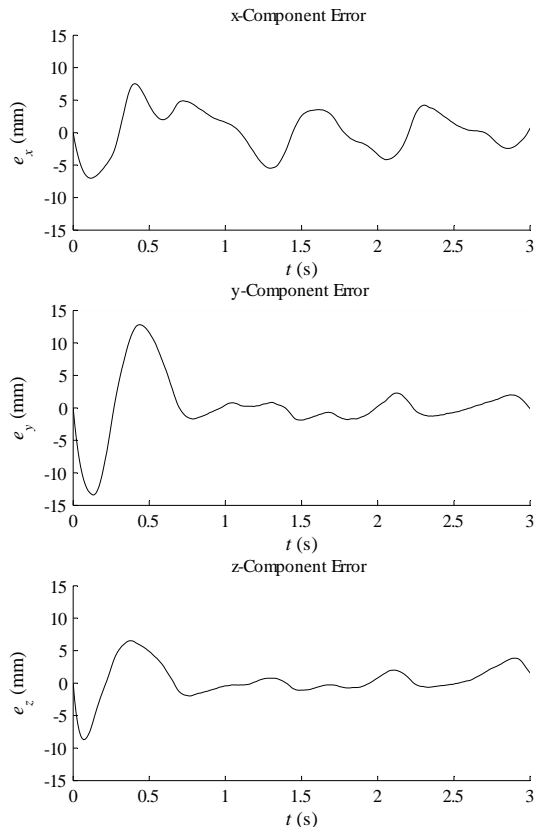


Fig. 21 Error components

شکل 21 مؤلفه‌های خطا

هموار بوده و به محدوده اشباع خود نرسیده‌اند و همچنین نوسانات سیگنال‌های کنترلی در محدوده عملکرد در نظر گرفته شده برای عملگرها قابل قبول می‌باشند.

با توجه به نمودارها مقاوم بودن روش کنترلی پیشنهادی در مقابل عدم قطعیت موجود در مدل، و همچنین نیروهای اغتشاشی در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی، قابل مشاهده است.

9-نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مکانیزم موازی با ساختار 3-PUU که بتواند حرکت انتقالی خالص را در مجری نهایی ایجاد کند، مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از هندسه ربات، معادلات سینماتیک معکوس ربات موازی، استخراج شده و به کمک این معادلات، معادلات قید حاکم بر مکانیزم بدست آمد. به منظور کنترل ربات، معادلات دینامیکی سیستم با استفاده از فرمولاسیون لاگرانژ استخراج شد. در مدل‌سازی دینامیکی ربات، با توجه به مقید بودن سیستم از ضرایب لاگرانژ استفاده شد.

در ادامه با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی، دو مسیر بهینه جهت حرکت مجری نهایی برای پیمودن کوتاه‌ترین مسیر بین دو نقطه و اجتناب از برخورد با موانع با حفظ یک حاشیه اطمینان از آنها، طراحی شد. به منظور حفظ پیوستگی سرعت و شتاب در مسیر، از توابع درون‌یابی اسپلاین استفاده شد.

با توجه به این که مدل دینامیکی ربات مورد مطالعه، دارای پارامترهایی توأم با عدم قطعیت می‌باشد، به منظور کنترل ربات روی مسیره‌های بهینه طراحی شده، یک کنترل کننده تطبیقی طراحی شده است. طراحی کنترل

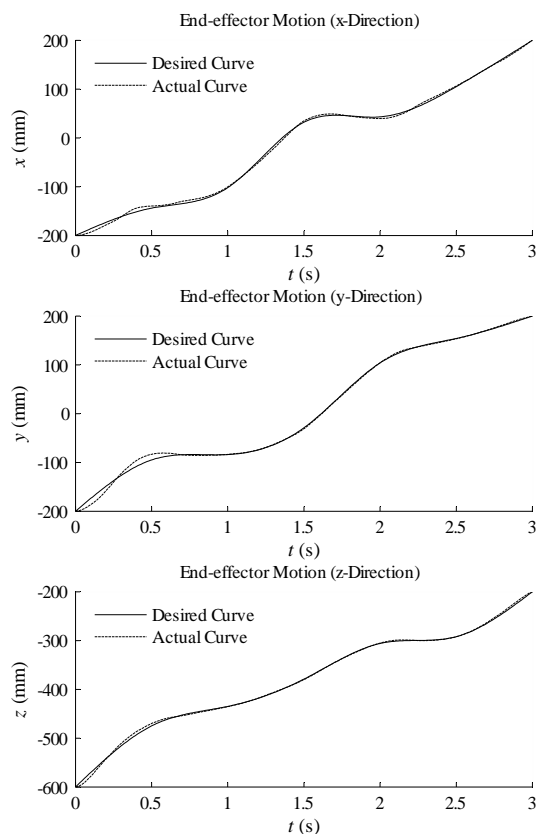


Fig. 19 End-effector motion plots

شکل 19 نمودار زمانی حرکت مجری نهایی

constrained mechanical systems, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 4, pp. 574-587, 2002.

[5] K. Homma, O. Fukuda, J. Sugawara, Y. Nagata, M. Usuba, A wire-driven leg rehabilitation system: Development of a 4-DOF experimental system, *International Conferences on Advanced Intelligent Mechatronics Sweden*, pp. 908-913, 2003.

[6] M. Ceccarelli, E. Ottaviano, A workspace evaluation of an eclipse robot, *Robotica*, Vol. 20, No. 3, pp. 299-313, 2002.

[7] Z. Wang, S. Ji, Y. Li, Y. Wan, A unified algorithm to determine the reachable and dexterous workspace of parallel manipulators. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 26, No. 5, pp. 454-460, 2010.

[8] C. Gosselin, J. Angeles, Singularity analysis of closed-loop kinematic chains. *Robotics and Automation, IEEE Transactions*, Vol. 6, No. 3, pp. 281- 290, 1990.

[9] H.B. Choi, A. Konno, M. Uchiyama, Analytic singularity analysis of a 4-DOF parallel robot based on Jacobian deficiencies. *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 8, No. 2, pp. 378-384, 2010.

[10] [X. Kong, C. M. Gosselin, Type synthesis of 3-DOF translational parallel manipulators based on screw theory, *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 126, No. 1, pp. 83-92, 2004.

[11] K. Zhou, C.J. Doyle, K. Glover, *Robust Optimal Control*, Prentice-Hall, *International Journal of Control*, Vol. 76, No. 14, pp. 63-72, 1996.

[12] L. Sciacivico, B. Siciliano, *Modeling and Control of Robot Manipulators*, second edition, pp. 359-367, London, Springer-Verlag, 2000.

[13] Y. Landau, *Adaptive Control: The Model Reference Approach*, first edition, pp. 274-296, Berlin, Marcel Decker, 1979.

[14] K. J. Astrom, B. Wittenmark, *Adaptive Control*, pp. 364-415, New York, Addison-Wesley, 1995.

[15] J.J. Craig, P. Hsu, S.S. Sastry, Adaptive control of mechanical manipulators, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 16-28, 1987.

[16] M. Oh, So. Ryeok, Sunil K. Agrawal, Generation of feasible set points and control of a cable robot, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No. 3, pp. 551-558, 2006.

[17] M. Khosravi, H. Taghirad, Dynamic analysis and control of fully-constrained cable robots with elastic cables: Variable stiffness formulation In *Cable-Driven Parallel Robots*, Springer International Publishing, Vol. 124, No.7, pp. 161-177, 2015.

[18] M. Oh, So-Ryeok, Sunil K. Agrawal, Cable suspended planar robots with redundant cables: Controllers with positive tensions. , *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 3, pp. 457-465, 2005.

[19] K. Williams, L. Robert, J. Vadia, Planar translational cable-direct-driven robots, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 20, No. 3, pp. 107-120, 2003.

[20] H. Kordjazi, A. Akbarzadeh, Control of 3-PRR parallel robots using computed torque method, *Tenth Conference on Manufacturing Engineering*, Babol, Iran, 2010. (in Persian)

[21] H. Taghirad, R. Babaghasabha, M. Khosravi, Adaptive robust control of fully-constrained cable driven parallel robots, *Mechatronics*, Vol. 25, No. 2, pp. 27-36, 2015.

[22] 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).

[23] Geem, Z. W., J. H. Kim, G. V. Loganathan. Harmony search optimization: application to pipe network design, *International Journal of Modelling & Simulation*, Vol. 22, No. 2, pp. 125-133, 2002.

[24] D. Swagatam, Exploratory power of the harmony search algorithm: analysis and improvements for global numerical optimization. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, *IEEE Transactions on Mechatronics*, Vol. 41, No. 1, pp. 89-106, 2011.

[25] M. Mahdavi, M. Fesanghary, E. Damangir, An improved harmony search algorithm for solving optimization problems, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 188, No. 2, pp. 1567-1579, 2007.

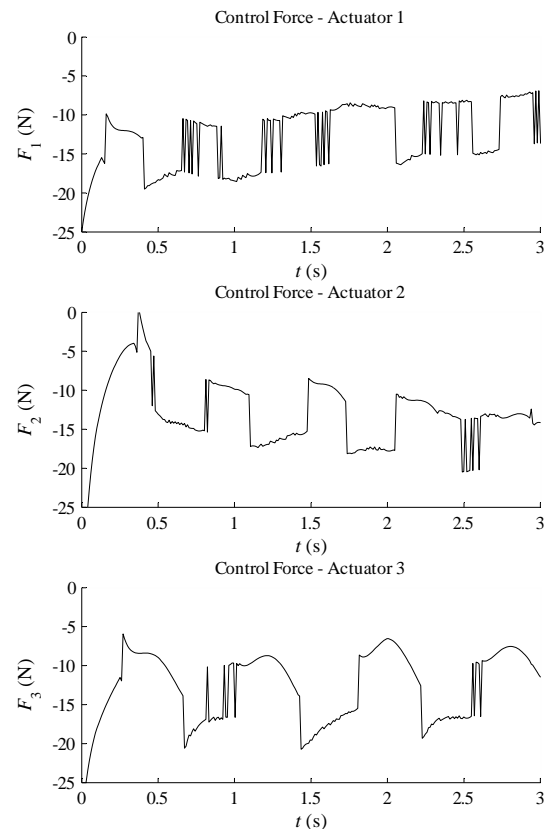


Fig. 22 Control signals

شکل 22 سیگنال‌های کنترلی

کننده با استفاده از روش خطی‌سازی بازخوردی و تئوری پایداری لیاپانوف صورت گرفت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که کنترل کننده پیشنهادی در مقابل اغتشاش خارجی و همچنین تغییرات در پارامترهای مدل، عملکرد مطلوبی داشته است.

10-مراجع

[1] J. P. Merlet, *Parallel Robots*, Second edition, pp. 116-124, London, Kluwer Academic Publishers, 2006.

[2] A. Codourey, E. Burdet, A body-oriented method for finding a linear form of the dynamic equation of fully parallel robots, *International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, Vol. 2, pp. 1612-1618, 1997.

[3] B. Monsarrat, C. Gosselin, Workspace analysis and optimal design of a 3-leg 6-DOF parallel platform mechanism, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 6, pp. 954-966, 2003.

[4] G. Liu, Z. Li, A unified geometric approach to modeling and control of