



کنترل ربات موازی 3-RPR با استفاده از روش مود لغزشی بر روی مسیر بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

سید علیرضا معزی¹، منصور رفیعیان^{2*}، سعید ابراهیمی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

* یزد، صندوق پستی ۸۹۱۹۵-۷۴۱ rafeeyan@yazd.ac.ir

** یزد، صندوق پستی ۸۹۱۹۵-۷۴۱ rafeeyan@yazd.ac.ir

چکیده

در این تحقیق روشی جهت کنترل ربات موازی 3-RPR بر روی مسیری با وجود موانع متعدد در فضای کاری ارائه می‌گردد. برای این منظور، مسیری هموار و با کمترین طول که برخورده با موانع موجود در فضای کاری ربات نداشته باشد با استفاده از روش منحنی‌های اسلامی و الگوریتم بهینه‌سازی فاخته ایجاد شده و به عنوان مسیر مرجع تعقیب ربات مورد استفاده قرار می‌گیرد برای بررسی سرعت و دقت همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی فوق، فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم زنتیک نیز تکرار شده و روند همگرایی مقایسه می‌شود. در ادامه از روش کنترل مقاوم مود لغزشی برای کنترل این ربات در تعقیب مسیر مرجع استفاده می‌شود. انتخاب این کنترل کننده بر اساس نامعین بودن تعدادی از پارامترهای دینامیکی این ربات صورت می‌گیرد. نتایج حاصل از قسمت طراحی مسیر بهینه با توجه به سرعت و دقت بالای همگرایی، عملکرد مناسب الگوریتم بهینه‌سازی فاخته را به خوبی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل مشاهده شد که مسیر طراحی شده با استفاده از روش منحنی اسلامی بدون برخورد با موانع تعریف شده تا حد امکان کوتاه شده است.علاوه بر این، نتیجه می‌شود که روش کنترل مود لغزشی با وجود نامعینی‌های در نظر گرفته شده، قادر به کنترل ربات در تعقیب مسیر مرجع ایجاد شده با دقت بسیار خوبی است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 مهر 1393

پذیرش: 20 آذر 1393

ارائه در سایت: 06 دی 1393

کلید واژگان:

ربات موازی سه درجه آزادی

تعقیب مسیر

الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

الگوریتم بهینه‌سازی زنتیک

کنترل مود لغزشی

منحنی اسلامی

Sliding mode control of 3-RPR parallel robot on the optimal path using cuckoo optimization algorithm

Seyed Alireza Moezi, Mansour Rafeeyan*, Saeed Ebrahimi

Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
*P.O.B. 89195-741 Yazd, Iran, rafeeyan@yazd.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 October 2014
Accepted 11 December 2014
Available Online 27 December 2014

Keywords:

Three degrees of freedom robot path generator
Cuckoo Optimization Algorithm
Genetic Optimization Algorithm
Sliding Mode Control
Spline Curve

ABSTRACT

The present study aims to implement an approach for trajectory control of a 3-RPR parallel manipulator over a path with obstacles in the workspace. For this purpose, using the spline curves approach and based on the cuckoo optimization algorithm, a smooth reference trajectory with minimum length is generated in the workspace to avoid robot collision with obstacles. The performance and accuracy of the cuckoo optimization algorithm in converging to the optimal solution is then compared with the Genetic algorithm. In the next step, the robust sliding mode control technique is adopted for trajectory control of the robot in the presence of some uncertainties. These uncertainties usually include the lengths and mass of the robot's links. The obtained results confirm the demanded level of performance and accuracy of the cuckoo optimization algorithm. It is also observed that the optimal trajectory with minimum length is generated using the spline curves approach. In addition, it is concluded that based on the sliding mode control technique, the robot can follow the desired trajectory very precisely in spite of the presence of the uncertainties in length and mass of the robot's links.

سرعت و دقت بالا (ربات‌های موازی) دادند.

یک ربات موازی را می‌توان این گونه تعریف کرد: مکانیزمی حلقه بسته که در آن مجری نهایی به وسیله‌ی حداقل دو حلقه‌ی سینماتیکی بسته به پایه متصصل شده است [1]. با این وجود مروء مقالات نشان می‌دهد که هرگاه مکانیزمی به منظور جابجا کردن مواد، قطعات، ابزار یا وسائل خاص از طریق حرکات برنامه‌بیزی شده متغیر برای انجام گستره وسیعی از کارها و وظایف

امروزه تولید انبوه در صنعت نیاز به سرعت و دقت بالا دارد. به همین منظور بحث رباتیک و مسائل پیرامون آن به یک موضوع جذاب برای محققان تبدیل شده است. در گذشته ربات‌های سری بخش‌های گسترده‌ای از صنایع را تشکیل می‌دادند. این ربات‌ها به دلیل سرعت نسبتاً پایین در انجام کارها و خطای ایجاد شده در تک‌تک اعضا به مرور جای خود را به ربات‌هایی با

- مقدمه

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

طراحی، ساخت و کنترل ربات موازی با سه حلقه سینماتیکی RPR پرداخت. او در تحقیق خود به بررسی سینماتیک معکوس، مستقیم و فضای کاری ربات موازی فوق پرداخت. او از سه بازوی پنوماتیکی پیشان در طرح خود استفاده کرد و برای هر بازو یک حلقه‌ی بسته کنترلی فیدبک‌دار در نظر گرفت. در این طرح از حسگر جابجایی⁵ برای اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی بازوها و از سه شیر برقی⁶ برای تنظیم فشار اعمالی روی بازوها استفاده شده است. برای کنترل میزان جابجایی بازوهای ربات از یک کنترل کننده PID⁷ که ورودی آن تفاضل خروجی حسگر جابه‌جایی و مطلوب مورد نظر است و خروجی آن ولتاژ اعمالی به شیرهای برقی است، استفاده شده است.

یکی از مسائل مهمی که هر ربات موازی باید در گذر مسیر خود از نقطه شروع به نقطه هدف از آن بهره‌مند باشد جلوگیری از برخورد با موانع و همچنین ایجاد مسیری کوتاه تا هدف است. در این تحقیق این موضوع به عنوان هدف تولید مسیر در نظر گرفته شده است، از جمله روش‌هایی که برای تولید مسیر استفاده می‌شود:

1- تبدیل منحنی به خط‌های به هم پیوسته

2- تبدیل منحنی به یک معادله ریاضی پارامتریک و تعیین ضرایب آن توسط روش‌های بهینه‌سازی (پند جمله‌ای‌ها)

3- استفاده از شبکه‌های عصبی و منطق فازی در تولید مسیر بر همین اساس از جمله تحقیقاتی که در زمینه طراحی مسیر ربات‌های موازی صفحه‌ای صورت پذیرفته است، پارسا و همکارانش [10] به طرح ریزی مسیر برای یک ربات سه درجه آزادی 3-RRR با استفاده از شبکه عصبی با حضور مانع در مسیر پرداختند. دانش و ابذری [11] مسیری برای ربات موازی 3-RRR با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی کردند. مسیر تولیدی توانایی عبور از موانع را داشت. ناسا و باندیوهایی [12] مسیری برای عبور از نقاط تکین ربات موازی 3-RRR طراحی کردند. لاھور و همکارانش [13] برای ربات موازی 3-RRR مسیری بهینه طراحی کردند. آن‌ها در این تحقیق نقاط تکین ربات موازی را به عنوان مانع در نظر گرفتند.

در این تحقیق از منحنی اسپلاین⁸ [14] که می‌توان گفت ترکیبی از موارد اشاره شده 1 و 2 است برای تولید مسیر استفاده شده است. یکی از مزیت‌های خوب این منحنی در این تحقیق، امکان ایجاد مسیرهایی با اشکال متفاوت در صفحه است. به طوری که می‌توان با تغییر تعداد و مقدار نقاط کنترل منحنی اسپلاین، مسیرهای متنوعی ایجاد کرد و بیشتر مسیرهای موجود بین نقاط ابتدا و انتهای را پوشش داد. در این روش مکان نقاط کنترل منحنی که تعداد آن متناسب با طول و هموار بودن منحنی برگریده می‌شود توسط الگوریتم بهینه‌سازی فاخته⁹ که توسط رجبیون [15] ارائه شد، طوری تعیین می‌گردد که مسیر دارای کوتاهترین فاصله باشد و ربات موازی فوق به موانع موجود در مسیر برخورد نکند. در این تحقیقتابع هدف به صورت ترکیبی از طول مسیر و قیدهای برخورد با موانع ایجاد شده است. همچنین برای انتخاب نقاط از مشبندی فضای دو بعدی که سبب ایجاد خطای می‌گردد استفاده نشده و نقاط به صورت پیوسته در محیط انتخاب می‌شوند. در ادامه برای مقایسه سرعت و دقت همگرایی الگوریتم فوق، نتایج همگرایی این الگوریتم با الگوریتم مشهور ژنتیک مقایسه می‌گردد. همچنین نتایج همگرایی این الگوریتم توسط روشی صحه‌گذاری خواهد شد. سپس مسیر فوق با

طراحی شود، عبارت ربات برای آن استفاده می‌شود. در این نوع ربات‌ها به دلیل شباهت اکثر اعضای ربات به هم، هزینه تولید ابوجه و تعویض قطعه معیوب کاهش می‌یابد و همچنین مشکلات ربات‌های سری از جمله خطای اباسته مفاصل و اعضا و سرعت پایین را ندارند.

در سال 1813 میلادی، اولین مکانیزم موازی که هشت‌وجهی¹ نامیده می‌شد توسط کاچچی مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن در سال 1947 مک‌کاف مکانیزمی مشابه هشت‌وجهی ساخت و برای آزمایش تایراها در موقعیت‌های گوناگون از آن استفاده شد. این مکانیزم در سال 1965 میلادی توسط استورات برای شبیه‌سازی پرواز توسعه داده شد. یک دسته از ربات‌های موازی، ربات‌های موازی صفحه‌ای هستند که امروزه در صنایع کاربرد فراوانی دارند و می‌توان از انواع آن‌ها به 3-RPR، 3-RRR و 3-PRR اشاره کرد که هر کدام از سه حلقه سینماتیکی بسته موازی تشکیل شده‌اند. امروزه محققان زیادی بر روی این دسته از ربات‌ها تحقیق و پژوهش انجام داده‌اند و از جمله کارهایی که در زمینه دینامیک و کنترل ربات‌های سه درجه آزادی موازی صورت پذیرفته است می‌توان از رن و همکارانش [2] که یک الگوریتم تطبیقی برای کنترل مسیر حرکت یک ربات موازی 3-PRR پیشنهاد دادند، نام برد. کردجزی و اکبرزاده [3] به کنترل ربات موازی 3-PRR با استفاده از روش گشتاور محاسبه شده پرداختند. این روش یک حالت خاص از روش خطی‌سازی با فیدبک سیستم‌های غیرخطی محسوب می‌شود. آن‌ها در این تحقیق کنترل کننده‌ی طراحی شده را به ازای ورودی‌های شیب و پله موردنی آزمایش قرار دادند. نبی و همکارانش [4] روشی برای حل معادلات دینامیکی ربات 3-PRR ارائه دادند. آن‌ها ابتدا معادلات سینماتیکی و دینامیکی ربات فوق را استخراج کردند. در این روش معادلات مقید بدست آمده از روش لاغرانژ طی فرایندی حذف شدند که این خود باعث ساده‌تر شدن معادلات دینامیکی این ربات می‌شد. در نهایت یک کنترل کننده PD² برای ربات مورد بحث طراحی کردند. زانگ و همکارانش [5] به بررسی و کنترل ارتعاشات فعل ربات 3-PRR پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود سه بازوی میانی ربات فوق را انعطاف‌پذیر در نظر گرفته و سپس به استخراج مودهای ارتعاشی بازوها به وسیله یک مبدل³ پرداختند. آن‌ها همچنین [6] سه بازوی میانی ربات فوق را انعطاف‌پذیر در نظر گرفتند و سپس با استفاده از روش تقریبی مودهای فرضی، مودهای ارتعاشی را استخراج و با معادلات دینامیکی حاصل از روش لاغرانژ ترکیب کردند. در این تحقیق از روش FFT⁴ برای آنالیز مودهای ارتعاشی استفاده شده است. سپس نتایج حاصل از تحقیق تئوری با نتایج حاصل از آزمون مودال نمونه عملی مقایسه گردید. اکبرزاده و همکارانش [7] کنترل کننده‌ای مقاوم به ناعمی و اغتشاشات سیستم طراحی کردند. در این روش نیازی به استخراج دقیق معادلات سیستم ربات موازی 3-RPR و همکارانش [8] به بررسی معادلات دینامیکی ربات موازی 3-PRR پرداختند که در این تحقیق سه بازوی میانی ربات موازی فوق را انعطاف‌پذیر فرض کرد و با استفاده از تئوری تیر اویلر-برنولی و روش لاغرانژ معادلات دینامیکی ربات موازی مذبور را استخراج کردند. آن‌ها همچنین به تأثیر انعطاف‌پذیری در مسیر حرکت مجری نهایی پرداختند.

اما به طور خاص در مورد کنترل ربات RPR با سه زنجیره سینماتیکی یعنی 3-RPR که موضوع این تحقیق است تحقیقات زیادی صورت نگرفته است. تنها مورد قابل اشاره کار ویلیام در سال 1999 [9] است. ویلیام به

5- LVDT Sensor

6- Solenoid Valve

7- Proportional-Integral-Derivative Controller

8- Spline

9- Cuckoo Optimization Algorithm (COA)

1- Octahedral

2- Proportional-Derivative Controller

3- Transducer

4- Fast Fourier Transform

$$r = PC_i = \frac{2}{3}b\cos(30) = \frac{\sqrt{3}}{3}b \quad (10)$$

همچنین از هندسه مثلث متساوی الاضلاع، زوایای ϕ به شرح رابطه (11) است:

$$\phi_1 = -\frac{\pi}{6}; \phi_2 = \frac{\pi}{2}; \phi_3 = \frac{7\pi}{6} \quad (11)$$

با جایگذاری معادلات (8) و (9) در (6) و (7) و ساده سازی آنها به معادلات (12) و (13) می‌رسیم:

$$\Gamma_{(2i-1)} \equiv x_{ai} + (\rho_i + l)\cos(\theta_i) - x_p - r\cos(\phi_i - \phi_p) = 0 \quad (12)$$

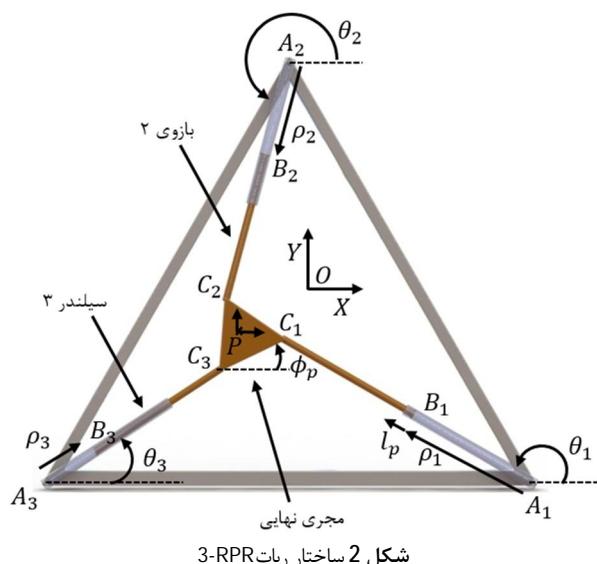
$$\Gamma_{(2i)} \equiv y_{ai} + (\rho_i + l)\sin(\theta_i) - y_p - r\sin(\phi_i - \phi_p) = 0 \quad (13)$$

رابطه (12) شامل سه معادله‌ی قید در راستای x و رابطه (13) شامل سه معادله‌ی قید در راستای y است. این شش معادله‌ی یک دستگاه معادلات جبری را تشکیل می‌دهند که بایستی با هم حل شوند. در صورت حل دستگاه فوق بر حسب پارامترهای x_p, y_p, ϕ_p به معادلات (14) و (15) خواهیم رسید:

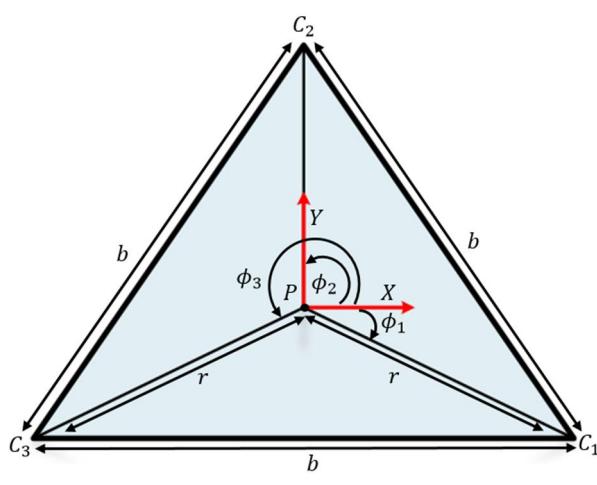
$$\theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{y_p(t) + r\sin(\phi_i + \phi_p(t)) - y_{ai}}{x_p(t) + r\cos(\phi_i + \phi_p(t)) - x_{ai}}\right) \quad (14)$$

$$\rho_i = \frac{x_p(t) + r\cos(\phi_i + \phi_p(t)) - x_{ai}}{\cos(\theta_i(t))} - l \quad (15)$$

در تمام معادلات سینماتیکی ربات $i = 1, 2, 3$ است.



شکل 2 ساختار ربات 3-RPR



شکل 3 مجری نهایی ربات

استفاده از روشی که در ادامه تحقیق بیان شده است به عنوان موقعيت مرجع به ربات موازی مورد نظر داده خواهد شد. در ادامه برای اینکه ربات موازی صفحه‌ای بتواند موقعیت مرجع را رهگیری نماید کنترل کنندۀ از نوع مود لغزشی که به نامعینی‌های پارامتری مقاوم است طراحی می‌گردد. در شکل 1 شماتیک از مراحل انجام آورده شده است.

2- سینماتیک ربات سه درجه آزادی

با توجه به هندسه‌ی شکل 2 برای هر زنجیره سینماتیکی می‌توان رابطه برداری (1) را نوشت:

$$A_i B_i + B_i C_i = A_i P + P C_i \quad (1)$$

مختصات نقطه C_i با استفاده از زنجیره‌ی $A_i B_i C_i$ می‌تواند به صورت روابط (2) و (3) نوشتۀ شود:

$$x_{ci} = x_{ai} + (\rho_i + l)\cos(\theta_i) \quad (2)$$

$$y_{ci} = y_{ai} + (\rho_i + l)\sin(\theta_i) \quad (3)$$

که x_{ci} و y_{ci} مختصات نقطه C_i ، و x_{ai} و y_{ai} مختصات ثابت نقطه A_i هستند. طول بازوی همانی صلب، $B_i C_i$ است.

مختصات نقطه C_i با استفاده از مختصات سکوی متحرک نیز می‌تواند به صورت روابط (4) و (5) نوشتۀ شود:

$$x_{ci} = x_p + x_{ci}^0 \cos(\phi_p) - y_{ci}^0 \sin(\phi_p) \quad (4)$$

$$y_{ci} = y_p + x_{ci}^0 \sin(\phi_p) - y_{ci}^0 \cos(\phi_p) \quad (5)$$

که x_p و y_p مختصات مرکز جرم سکوی متحرک، نقطه P ، نسبت به دستگاه ثابت و ϕ_p زوایه‌ی سکوی متحرک نسبت به محور x است. x_{ci}^0 و y_{ci}^0 مختصات ثابت نقطه C_i هستند، که از مرکز جرم سکوی متحرک P وقتی $\phi_p = 0$ است اندازه‌گیری می‌شوند.

با جایگذاری معادلات (2) در (4) و (3) در (5) و مرتب کردن آنها معادلات قید بدست می‌آیند:

$$\Gamma_{2i-1} \equiv x_{ai} + (\rho_i + l)\cos(\theta_i) - x_p - x_{ci}^0 \cos(\phi_p) + y_{ci}^0 \sin(\phi_p) = 0 \quad (6)$$

$$\Gamma_{2i} \equiv y_{ai} + (\rho_i + l)\sin(\theta_i) - y_p - x_{ci}^0 \sin(\phi_p) + y_{ci}^0 \cos(\phi_p) = 0 \quad (7)$$

معادلات قید در راستای x و Γ_{2i-1} معادلات قید در راستای y هستند. با توجه به اینکه x_{ci}^0 و y_{ci}^0 مقادیر ثابتاند و به حرکت مجری نهایی وابسته نیستند می‌توان این دو را، با توجه به شکل 3 که مجری نهایی را نشان می‌دهد، به صورت روابط (8) و (9) مرتب کرد:

$$x_{ci}^0 = r\cos(\phi_i) \quad (8)$$

$$y_{ci}^0 = r\sin(\phi_i) \quad (9)$$

همانطورکه در شکل 3 مشخص است، r برابر طول پاره خط PC_i است که مرکز سطح مجری نهایی، نقطه‌ی P ، را به مفاصل C_i و ϕ_i می‌کند و زوایه‌ی r با محور x است. با توجه به اینکه مجری نهایی یک مثلث متساوی‌اضلاع است می‌توان r را بحسب طول ضلع مثلث، نقطه‌ی b ، به دست آورد:



شکل 1 شماتیک روند ایجاد مسیر بهینه و تبدیل آن به سیگنال مطلوب

که σ_1 تا σ_6 صورت روابط (27) تا (32) نوشته می‌شوند:

$$\sigma_1 = x_p - x a_i + r \cos(\phi_i + \phi_p) \quad (27)$$

$$\sigma_2 = ((x a_i - x_p)^2 + (y a_i - y_p)^2 - 2r(\cos(\phi_i + \phi_p)(x a_i - x_p) + \sin(\phi_i + \phi_p)(y a_i - y_p)) + r^2)^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

$$\sigma_3 = y_p - y a_i + r \sin(\phi_i + \phi_p) \quad (29)$$

$$\sigma_4 = ((x a_i - x_p)^2 + (y a_i - y_p)^2 - 2r(\cos(\phi_i + \phi_p)(x a_i - x_p) + \sin(\phi_i + \phi_p)(y a_i - y_p)) + r^2)^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

$$\sigma_5 = -r(\cos(\phi_i + \phi_p)(y a_i - y_p) - \sin(\phi_i + \phi_p)(x a_i - x_p)) \quad (31)$$

$$\sigma_6 = ((x a_i - x_p)^2 + (y a_i - y_p)^2 - 2r(\cos(\phi_i + \phi_p)(x a_i - x_p) + \sin(\phi_i + \phi_p)(y a_i - y_p)) + r^2)^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

که در روابط (21) تا (23) به ترتیب نیروهای وارد شده به سه عملگر کشیوی ربات و F_4, F_5, F_6 نیروها و گشتاور خارجی وارد شده به مجری نهایی در جهت مختصه‌های تمیمی یافته یعنی x_p, y_p, ϕ_p هستند.

متغیرهای حالت سیستم بصورت رابطه (33) تعریف می‌شوند:

$$q = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ \phi_p \end{bmatrix} \quad (33)$$

معادلات (21) تا (23) را می‌توان به فرم (34) نوشت:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) = H(q)U + F_{ex} \quad (34)$$

که M ماتریس اینرسی، C بردار کوریولیس، $H(q)$ ماتریس آرایش ورودی‌ها و بردارهای F_{ex} و U برایندند:

$$U = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}; F_{ex} = \begin{bmatrix} F_4 \\ F_5 \\ M_1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

اگر رابطه (34) را به فرم فضای حالت بنویسیم خواهیم داشت:

$$\ddot{q} = M^{-1}(H(q)U + F_{ex} - C(q, \dot{q})) \quad (36)$$

$$x_1 = x_p, x_2 = \dot{x}_p, x_3 = y_p, x_4 = \dot{y}_p, x_5 = \phi_p, x_6 = \dot{\phi}_p \quad (37)$$

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = \ddot{x}_p, \dot{x}_3 = x_4, \dot{x}_4 = \ddot{y}_p, \dot{x}_5 = x_6, \dot{x}_6 = \ddot{\phi}_p \quad (38)$$

4- طراحی کنترل کننده مود لغزشی

عدم دقت در مدل ممکن است ناشی از عدم دقت در تعیین پارامترهای یک سیستم دینامیکی یا نمایش ساده شده‌ی هدف دار یک مدل دینامیکی باشد. در علم کنترل به دسته‌ی اول نامعینی‌های پارامتری و به دسته‌ی دوم نامعینی‌های دینامیکی گویند. یک روش کارمد برای کنترل مقاوم این گونه سیستم‌ها روش کنترل مود لغزشی می‌باشد. عدم دقت در مدل‌سازی می‌تواند اثرات نامطلوب شدیدی بر سیستم‌های غیر خطی بگذارد. بنابراین در هر طرحی باید اثرات ناشی از عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته شود.

با توجه به مراجع [16-17] برای یک سیستم دینامیکی تک ورودی می‌توان نوشت:

$$x^{(n)} = f(x) + b(x)u \quad (39)$$

که در آن اسکالر u ورودی کنترل، $x^{(n)}$ مشتق n ام، x عبارات $f(x), b(x)$ همراه با نامعینی و $x = [x \ \dot{x} \dots x^{n-1}]^T$ بردار حالت است. مساله کنترلی فوق بدین صورت است که حالت x را چنان بیابیم که یک حالت متغیر با زمان

3- استخراج معادلات حرکت

ربات موازی سه درجه آزادی فوق از سه حلقه سینماتیکی بسته RPR تشکیل شده است. در این ربات تمام بازوهای حلقه‌های سینماتیکی ربات صلب بوده و چون ربات در صفحه حرکت می‌کند از انرژی پتانسیل آن صرفنظر شده است. همچنین از جرم پیستون‌های متصل به بازوها به علت اینکه در برابر جرم بازوها ناچیز است صرفنظر می‌شود.

برای استخراج معادلات دینامیکی ربات موازی فوق از روش لاغرانژ استفاده می‌شود. بنابراین معادلات انرژی جنبشی ربات موازی صفحه‌ای فوق برای جایگذاری در معادلات لاغرانژ به شرح روابط (16) تا (19) استخراج می‌شوند:

$$T_C = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} (I_C + I_p) \dot{\theta}_i^2 \quad (16)$$

$$T_L = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} m_a [\dot{\rho}_i^2 + ((l_p + \rho_i) \dot{\theta}_i)^2] \quad (17)$$

$$T_P = \frac{1}{2} m_p (\dot{x}_p + \dot{y}_p)^2 + \frac{1}{2} I_e \dot{\phi}_p^2 \quad (18)$$

$$T = T_C + T_L + T_P \quad (19)$$

به ترتیب انرژی‌های جنبشی سیلندرها، بازوها میانی و سکوی متخرک هستند. در روابط بالا I ممان اینرسی جرمی هر کدام از سه بازوی میانی حول محور عمود بر صفحه‌ی ربات موازی I_C ممان اینرسی جرمی هر کدام از سه سیلندر حول محور عمود بر صفحه‌ی ربات موازی در نقطه A_i و $\dot{\theta}_i$ سرعت زاویه‌ای سیلندر i ، m_a جرم هر بازوی میانی، l_p فاصله بین مرکز جرم پیستون و بازوی میانی، ρ_i فاصله‌ی مرکز جرم پیستون از مفصل B_i ، $\dot{\rho}_i$ سرعت خطی پیستون در راستای محور بازوی میانی i ، m_p جرم سکوی متخرک، I_e ممان اینرسی جرمی سکو حول محور عمود بر صفحه‌ی سکو در مرکز جرم P ، \dot{x}_p, \dot{y}_p به ترتیب سرعت خطی مرکز جرم P در راستای محورهای x و y ، و $\dot{\phi}_p$ سرعت زاویه‌ای مجری نهایی حول نقطه P است.

در این تحقیق ربات موازی صفحه‌ای فوق با استفاده از سه مختصه‌ی x_p, y_p, ϕ_p مدل‌سازی شده است، بدین منظور در روابط انرژی جنبشی به جای مختصه‌های $\rho_i, \dot{\theta}_i, i = 1, 2, 3$ ، $\rho = [\rho_1 \rho_2 \rho_3]$ ، $\theta = [\theta_1 \theta_2 \theta_3]$ از مختصه‌های مذکور با استفاده از روابط سینماتیک (14) و (15) و مشتقات آن‌ها استفاده شده است.

بنابراین روابط بالا تابع لاغرانژین به صورت رابطه (20) است:

$$L = T \quad (20)$$

با استفاده از فرمول اوبلر لاغرانژ معادلات دینامیکی سیستم به صورت روابط (21) تا (23) استخراج می‌گردد:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial x_p} \right) - \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_p} = b_1 F_1 + b_2 F_2 + b_3 F_3 + F_4 \quad (21)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial y_p} \right) - \frac{\partial L}{\partial \dot{y}_p} = b_4 F_1 + b_5 F_2 + b_6 F_3 + F_5 \quad (22)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \phi_p} \right) - \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}_p} = b_7 F_1 + b_8 F_2 + b_9 F_3 + M_1 \quad (23)$$

که $b_i, i = 1, 2, \dots, 9$ ضرایب نیروهای وارد شده به مختصه‌های نهایی از طرف عملگرهای کشویی به شرح روابط (24) تا (26) است:

$$b_i = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad i = 1, 2, 3 \quad (24)$$

$$b_i = \frac{\sigma_3}{\sigma_4} \quad i = 4, 5, 6 \quad (25)$$

$$b_i = \frac{\sigma_5}{\sigma_6} \quad i = 7, 8, 9 \quad (26)$$

که تابع سوئیچینگ $\text{sgn}(s)$ برابر است با:

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & s > 0 \\ -1 & s < 0 \\ 0 & s = 0 \end{cases} \quad (54)$$

و $K(x, t)$ یک ثابت مثبت است. با توجه به معادله (46) می‌توان به معادله‌ای به فرم (55) رسید:

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2(x, t) = \dot{s} \cdot s = [f - \hat{f} - K \text{sgn}(s)] \cdot S = (f - \hat{f}) \cdot S - K|S| \quad (55)$$

با جایگذاری معادله (50) در (49) داریم:

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^2 \left(\int_0^t \tilde{x} dt \right) = (\dot{x} - \dot{x}_d) + 2\lambda(\dot{x} - \dot{x}_d) - \lambda^2(x - x_d) \quad (56)$$

بنابراین U به صورت رابطه (57) تقریب زده می‌شود:

$$\hat{U} = -\hat{f} + \ddot{x}_d - 2\lambda(\dot{x} - \dot{x}_d) + \lambda^2(x - x_d) \quad (57)$$

بدین ترتیب قانون کنترل مود لغزشی را برای یک ربات چند درجه آزادی

موازی می‌توان بصورت روابط (58) تا (61) تعمیم داد و استخراج کرد:

$$H(q)\tau = \tau_{eq} + \tau_{dis} \quad (58)$$

τ_{eq} به صورت رابطه (59) محاسبه می‌گردد:

$$\tau_{eq} = [C(q, \dot{q}) + M \cdot \dot{S} - F_{ex}] \quad (59)$$

و τ_{dis} برابر است با:

$$\tau_{dis} = M \cdot K \cdot \text{sgn}(s) \quad (60)$$

با جایگذاری فرمول‌های (59) و (60) در (58) خروجی کنترل کننده به

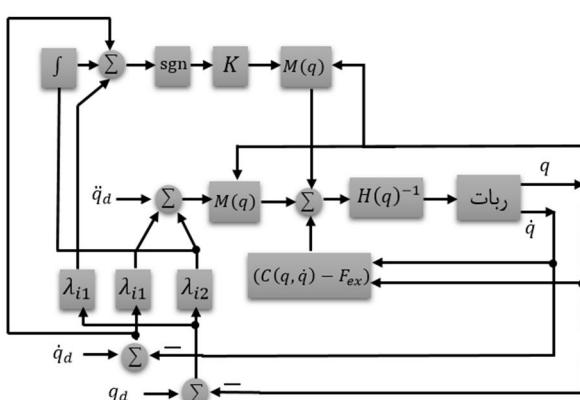
صورت (61) محاسبه می‌گردد:

$$\tau = H(q)^{-1} [M \cdot \dot{S} + C(q, \dot{q}) - F_{ex} + M \cdot K \cdot \text{sgn}(s)] \quad (61)$$

همچنین روند طراحی کنترل کننده در شکل 4 رسم شده است.

5- پیشنهاد سازی و ایجاد مسیر کوتاه بدون برخورد

برای حرکت بدون برخورد از نقطه شروع f_{in} به نقطه هدف f_{end} در مسیر دو بعدی، انتخاب کوتاه ترین مسیر، همواره یکی از چالش‌های تولید مسیر بوده است. در این تحقیق تعدادی نقطه در فضای دو بعدی برگزیده شده و به کمک روش ایجاد منحنی اسپلاین، مسیری از این نقاط و نقاط شروع و پایان می‌گذرد. مکان نقاط به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که مسیری کوتاه و بدون برخورد را حاصل شود. بدین صورت که هر نقطه از محیطی پیرامون ربات موازی که متعلق به مانع باشد بسته به مقدار فاصله تا مرز مانع و محیط پیرامون مانع مقدار عددی به خود می‌گیرد که در بهینه سازی از این مقدار جهت جلوگیری از برخورد با مانع استفاده می‌شود. بنابراین تابع هدف به



شکل 4 روند طراحی کنترل کننده مود لغزشی

مشخص $b(x) = [x_d \ x_d^2 \ \dots \ x_d^{n-1}]^T$ را با وجود نامعینی در $f(x)$ و $b(x)$ تعقیب کند. خطای تعقیب مسیر در متغیر حالت x را به صورت $x - x_d = \tilde{x}$ تعریف کرده و فرض می‌کنیم:

$$\tilde{x} = x - x_d = [\tilde{x}, \dot{\tilde{x}}, \dots, \tilde{x}^{(n-1)}]^T = [x - x_d, \dot{x} - \dot{x}_d, \ddot{x} - \ddot{x}_d, \dots, x^{(n-1)} - x_d^{(n-1)}]^T \quad (40)$$

حال اگر یک سطح متغیر با زمان (t) در فضای حالت R^n با معادله اسکalar $s(x, t)$ تعریف کنیم:

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \tilde{x} = 0 \quad (41)$$

که λ یک ثابت اکیدا مثبت است. برای کم کردن خطای حاصل از تعقیب مسیر می‌توان عبارت انتگرالی را به معادله (41) به صورت رابطه (42) اضافه کرد:

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \left(\int_0^t \tilde{x} dt \right) = 0 \quad (42)$$

هدف اصلی از این گونه ارائه، نگه داشتن شب سطح لغزش $s(x, t)$ نزدیک به صفر است. بنابراین یکی از روش‌های معمول، پیدا کردن ورودی U خارج از سطح لغزش $s(x, t)$ است.

$$\frac{1}{2} \left(\frac{d}{dt} \right) s^2(x, t) \leq -\zeta |s(x, t)| \quad (43)$$

که ζ یک ثابت مثبت می‌باشد.

$$\text{اگر } S(0) > 0 \rightarrow \frac{d}{dt} S(t) \leq -\zeta \quad (44)$$

برای حذف ترم مشتقی، از یک ترم انتگرالی از $t = t_{reach}$ تا $t = t_{reach}$ استفاده شده است.

$$\int_{t=0}^{t=t_{reach}} \frac{d}{dt} S(t) dt \leq - \int_{t=0}^{t=t_{reach}} \zeta dt \rightarrow S(t_{reach}) - S(0) \leq -\zeta(t_{reach} - 0) \quad (45)$$

جایی که t_{reach} برابر است با زمانی که منحنی به سطح لغزش s می‌رسد فرض می‌شود ($s(t_{reach}) = 0$) بصورت روابط (46) و (47) تعریف شده است:

$$0 - s(0) \leq -\zeta(t_{reach}) \rightarrow t_{reach} \leq \frac{s(0)}{\zeta} \quad (46)$$

و

$$s(0) < 0 \rightarrow 0 - s(0) \leq -\zeta(t_{reach}) \rightarrow s(0) \leq -\zeta(t_{reach}) \rightarrow t_{reach} \leq \frac{|s(0)|}{\zeta} \quad (47)$$

معادله (47) تضمین می‌کند مدت زمانی که به سطح لغزش s می‌رسد کمتر از $\frac{|s(0)|}{\zeta}$ از جایی که منحنی خارج از s است:

$$s_{t_{reach}} = s(0) \rightarrow \text{error}(x - x_d) = 0 \quad (48)$$

فرض می‌شود s به فرم (49) تعریف شود:

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) \tilde{x} = (\dot{x} - \dot{x}_d) + \lambda(x - x_d) \quad (49)$$

مشتق s که \dot{s} می‌باشد به صورت رابطه (50) تعریف می‌گردد:

$$\dot{s} = (\ddot{x} - \ddot{x}_d) + \lambda(\dot{x} - \dot{x}_d) \quad (50)$$

حال اگر فرض شود که سیستم مرتبه 2 به صورت رابطه (51) باشد:

$$\ddot{x} = f + u \rightarrow \dot{s} = f + U - \dot{x}_d + \lambda(\dot{x} - \dot{x}_d) \quad (51)$$

که f نامعینی دینامیکی است. همچنین \dot{s} برابر صفر می‌باشد. بنابراین \hat{U} بصورت رابطه (52) تعریف می‌شود:

$$\hat{U} = -\hat{f} + \ddot{x}_d - \lambda(\dot{x} - \dot{x}_d) \quad (52)$$

یک راحل ساده برای تعیین شرایط سطح لغزش، زمانی که پارامترهای سیستم نامعین هستند، قانون کنترل سوئیچینگ است:

$$U_{dis} = \hat{U} - K(x, t) \cdot \text{sgn}(s) \quad (53)$$

در این تحقیق تابع هدف به صورت رابطه (69) در نظر گرفته شده است:

$$\text{Cost Value} = L(1 + \beta \cdot OB) + \alpha \cdot OB \quad (69)$$

که L, β, α, OB به ترتیب طول مسیر، یک ثابت مثبت، یک ثابت مثبت، و تابع برخورد است که در این تحقیق ضرایب $\alpha = 1000$ ، $\beta = 100$ ، $L = 1000$ است. در این تحقیق برخورد مسأله هستند با چند بار حل مسأله بهینه‌سازی به نحوی انتخاب شدند که تابع هزینه که مشکل از طول مسیر و قیدهای برخورد با موانع دایره‌ای و مستطیلی است به شکل مطلوبی عمل کند و به سمت یکی از جمله‌های تشکیل دهنده تابع هزینه نظری قیدها یا طول مسیر منحرف نگردد.

در این مسأله قید برخورد از سه قید به شرح رابطه (70) تشکیل شده است:

$$OB = OB_1 + OB_2 + OB_3 \quad (70)$$

که OB_1, OB_2, OB_3 به ترتیب قید موانع دایره‌ای شکل و OB تابع قید مانع

مستطیلی است که به صورت روابط (71) تا (78) تعریف می‌شوند:

$$d_{c1} = \sqrt{(f_x(t_i) - x_{c1})^2 + (f_y(t_i) - y_{c1})^2} \quad (71)$$

$$D_{c1} = \max\left(1 - \frac{d_{c1}}{r_{c1}}, 0\right) \quad (72)$$

$$OB_{c1} = \text{mean}(D_{c1}) \quad (73)$$

$$d_{c2} = \sqrt{(f_x(t_i) - x_{c2})^2 + (f_y(t_i) - y_{c2})^2} \quad (74)$$

$$D_{c2} = \max\left(1 - \frac{d_{c2}}{r_{c2}}, 0\right) \quad (75)$$

$$OB_{c2} = \text{mean}(D_{c2}) \quad (76)$$

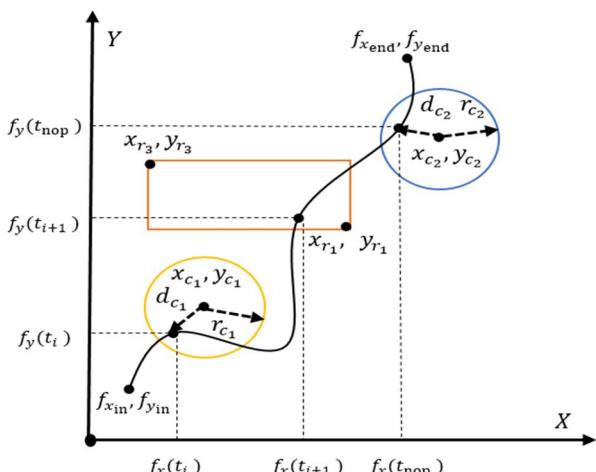
$$J_1 = x_{r3} - f_x(t_i) ; J_2 = f_x(t_i) - x_{r1} \quad (77)$$

$$J_3 = y_{r3} - f_y(t_i) ; J_4 = f_y(t_i) - y_{r1} \quad (77)$$

$$J = (J_1 \cdot J_2) > 0 \& (J_3 \cdot J_4) > 0 \quad (77)$$

$$OB_3 = \sum_{t=2}^{n_{\text{nop}}} J \quad (78)$$

که $y_{r_3}, y_{r_1}, x_{r_3}, x_{r_1}$ به ترتیب شعاع دو دایره، r_{c1}, r_{c2} و $i = 2:n_{\text{nop}}$ به ترتیب مختصات مکانی دو رأس مستطیل در راستای x و y هستند. همچنین $y_{r_2}, y_{r_3}, y_{r_1}, x_{r_2}, x_{r_3}, x_{r_1}$ به ترتیب مختصات مکانی مرکز دو دایره در راستای x و y هستند. در این تحقیق اگر شرایط رابطه (77) (اوضاع گردد) مقدار عددی یک و در غیر این صورت صفر را به خود می‌گیرد و با توجه به این موضوع اگر نقاط مسیر تولید شده به مانع مستطیلی برخورد کند مقدار عددی رابطه (78) افزایش و در غیر این صورت کاهش یافته تا به صفر برسد. در شکل 6 شماتیکی از روند مطرح شده به ازای چند نقطه از تمام نقاط مسیر آورده شده است. لازم به ذکر است که برای تمام نقاط تشکیل دهنده منحنی روابط (78) تا (78) چک می‌گردد.



شکل 6 روند مسیر تولید شده در حضور قیدهای برخورد

گونه‌ای تعیین شده است که مسیر حاصله کمترین طول را داشته باشد و همچنین به موانع بر خورد نکند. برای حل مسأله بهینه‌سازی طرح شده در این تحقیق از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته استفاده شده است. این روش نسبت به الگوریتم‌هایی از قبیل رنگریک و تجمع ذرات از سرعت و دقت همگرایی بالاتری برخوردار است [15].

در صورتی که تعداد n نقطه کنترل جهت تولید مسیر به روش ایجاد منحنی اسپلاین در نظر گرفته شده باشد و (n) برابر مقادیر عددی آن نقاط در بازه تعریف شده باشد. در این صورت می‌توان روابط مسیر تولید شده را به صورت (62) تا (65) بیان کرد:

$$t = [t_1 \ t_{\text{nop}}] \quad (62)$$

$$i = \left[0, \frac{1}{n+1}, \frac{2}{n+1}, \dots, \frac{n}{n+1}, 1\right] \quad (63)$$

$$f_x(t) = \text{SPL}(i, [f_{x_{\text{in}}} f_{x_1} f_{x_2} \dots f_{x_n} f_{x_{\text{end}}}], t) \quad (64)$$

$$f_y(t) = \text{SPL}(i, [f_{y_{\text{in}}} f_{y_1} f_{y_2} \dots f_{y_n} f_{y_{\text{end}}}], t) \quad (65)$$

$f_{x_{\text{in}}}, f_{x_{\text{end}}}$ به ترتیب نقاط ابتدا و انتهای مسیر در صفحه‌ی x و y می‌باشند. همچنین متغیر $t_1 \dots t_{\text{nop}}$ تعداد نقاط در بازه تعریف شده در نظر گرفته شده در بازه‌ی [0, 1] برای رسم منحی است. که هر چه تعداد این نقاط بیشتر باشد منحنی رسم شده از دقت بیشتری برخوردار است.

(f_x, f_y) نقاط مسیر هستند که با تغییر t از t_{nop} تا t_1 از نقطه شروع تا هدف تغییر می‌کنند. SPL تابعی است که از نقاط ورودی خود منحنی اسپلاین عبور می‌دهد و مقادیر را در هر نقطه بر می‌گرداند. این تابع در نرم‌افزار متلب تعریف شده است. عملکرد این تابع در شکل 5 نشان داده شده است.

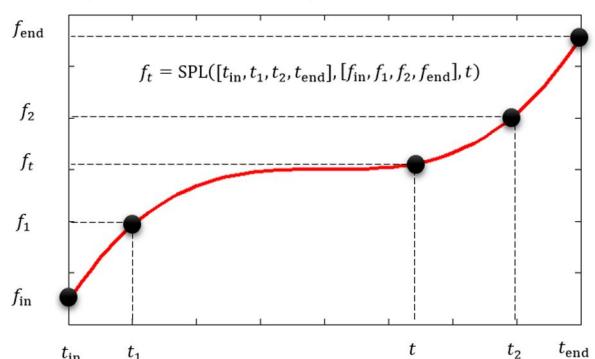
همواره برای بهینه‌سازی هر مسئله‌ای باید تابع هدف و متغیرهای بهینه‌سازی مشخص شوند. در این مسئله متغیرهای بهینه‌سازی نقاط f_{x_n}, f_{y_n} هستند. که همان نقاط کنترل منحنی اسپلاین هستند. در این تحقیق شش نقطه کنترل، یعنی سه نقطه کنترل در جهت محور x و سه نقطه کنترل در جهت محور y در نظر گرفته شده‌اند. تابع هدف در این مسئله طوری مشخص شده است که کاهش آن به معنای کاهش طول مسیر و جلوگیری از برخورد با موانع است. بنابراین تابعی که نمایانگر موانع در فضای دو بعدی است با نام $OB(X, Y)$ تعریف شده که تابعی از مکان است.

طول مسیر به صورت روابط (66) تا (68) است:

$$Ln_x(t_i) = f_x(t_i) - f_x(t_{i-1}) \quad i = 2:n_{\text{nop}} \quad (66)$$

$$Ln_y(t_i) = f_y(t_i) - f_y(t_{i-1}) \quad i = 2:n_{\text{nop}} \quad (67)$$

$$L = \sum_{t=2}^{n_{\text{nop}}} \left((Ln_x^2(t_i) + Ln_y^2(t_i))^{\frac{1}{2}} \right) \quad i = 2:n_{\text{nop}} \quad (68)$$



شکل 5 نحوه عملکرد تابع SPL

- 7 ارزیابی محل سکونت فاخته‌های رشد کرده جدید
- 8 محدود کردن تعداد فاخته‌ها در محیط زندگی با از بین بردن فاخته‌هایی که در محل‌های بدی زندگی می‌کنند.
- 9 دسته‌بندی فاخته‌ها و محاسبه بهترین دسته و انتخاب محل سکونت هدف
- 10 اجراء دادن برای ایجاد جمعیت جدید فاخته‌ها حول محل سکونت هدف
- 11 اگر شرایط توقف مهیا باشد، الگوریتم متوقف شود و گر نه به مرحله 2 برگردد [15].

7- ایجاد سیگنال مطلوب از مسیر تولید شده جهت کنترل ربات موازی

پس از اینکه مسیر بهینه ساخته شد و پارامترهای مربوطه بدست آمد، نوبت به ایجاد سیگنال‌های مطلوب جهت کنترل ربات موازی می‌رسد. برای این منظور فرض می‌شود که مجری نهایی ربات موازی نسبت به دستگاه مختصات ثابت 0 که در شکل 2 نشان داده شده است، با سرعت ثابت خطی V_d مسیر را طی کند، بنابراین با در نظر گرفتن سرعت ثابت در مسیر، معادله (79) بدست می‌آید [18]:

$$\left(\left(\frac{\partial f_x(k(t))}{\partial k(t)} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_y(k(t))}{\partial k(t)} \right)^2 \right) \left(\frac{dk(t)}{d(t)} \right)^2 = V_d^2 \\ k(0) = t_1 \quad (79)$$

در نتیجه، سیگنال‌های مطلوب، جهت تعیین به عنوان موقعیت مرجع ربات به صورت رابطه (80) (بیان می‌شوند):

$$\begin{aligned} x_d &= f_x(k(t)) \\ y_d &= f_y(k(t)) \end{aligned} \quad (80)$$

با توجه به معادله (79) به صورت رابطه (81) بدست می‌آید:

$$k(t) = \int_0^t \left(V_d^2 \left(\left(\frac{\partial f_x(k(t))}{\partial k(t)} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_y(k(t))}{\partial k(t)} \right)^2 \right)^{-1} \right)^{\frac{1}{2}} dt \quad (81)$$

8- شبیه‌سازی و کنترل ربات صفحه‌ای موازی

جهت شبیه‌سازی ایجاد مسیر بهینه سه محیط با موانع متفاوت در نظر گرفته شده که به ترتیب دارای شرایط پیچیده‌تر و سخت‌تری هستند. در این تحقیق برای تولید مسیر از سه نقطه کنترل در صفحه x و سه نقطه کنترل در صفحه y استفاده شده است. که مجموع این شش نقطه به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته در نظر گرفته شده است. اولین محیط، محیطی بدون مانع در نظر گرفته شده که تابع برخورد با مانع در این محیط به صورت رابطه (82) (تعریف می‌شود):

$$OB(x, y) = 0 \quad (82)$$

نقطه شروع و پایان مسیر به صورتی در نظر گرفته شده اند که ربات موازی توانایی دستیابی به آن‌ها با ابعاد ذکر شده در جدول 1 را داشته باشد.

$$(f_{x_{in}}, f_{x_{end}}) = [0.01 \quad 0.038] \quad (83)$$

$$(f_{y_{in}}, f_{y_{end}}) = [0.01 \quad 0.084] \quad (84)$$

واضح است که کوتاهترین مسیر بهینه، در محیطی که در آن مانع وجود ندارد قاعده‌تاً باید خط واصل نقاط شروع و هدف باشد و همانطور که در شکل 7 نشان داده شده است مسیر بهینه ساخته شده تقریباً خط واسط نقاط شروع و هدف است.

همچنین در این تحقیق برای عدم برخورد مجموعه مکانیکی ربات موازی، نظیر بازوها به موانع، فرض شده است که ارتفاع مجموعه از صفحه زیاد باشد و موانع در ارتفاع پایین‌تری قرار داشته باشند. در ضمن برای عدم برخورد ابزار متصل شده به مجری نهایی، به موانع در این تحقیق، شعاع ابزار به ابعاد موانع واقعی در حل مسأله، اضافه می‌گردد. بدین صورت محیط ابزار متصل شده به مجری نهایی ربات، به موانع برخورد نخواهد کرد.

6- الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

الگوریتم بهینه‌سازی فاخته همانند سایر روش‌های بهینه‌سازی نظیر الگوریتم‌های تجمع ذرات، ژنتیک، کلونی مورچه و سایر روش‌ها با یک جمعیت اولیه به نام فاخته شروع می‌گردد، هر فاخته تعدادی تخم دارد که آن‌ها را در لانه پرندگانی که تخم‌های آن‌ها از نظر شکل، رنگ و اندازه مشابه می‌باشد مخفی می‌کند، تعدادی از این تخم‌ها شروع به رشد کرده و به یک فاخته مادر تبدیل می‌گردد و بقیه توسط پرنده میزبان تشخیص داده می‌شود و از بین خواهند رفت. میزان تخم‌های رشد کرده مناسب بودن لانه‌های آن منطقه را نشان می‌دهند. هرچه تخم‌های بیشتری در یک ناحیه قادر به زیست باشند و نجات یابند به همان اندازه تمایل بیشتری به آن منطقه اختصاص می‌باید. بنابراین موقعیتی که در آن بیشترین تعداد تخم‌ها نجات یابند پارامتری خواهد بود که

الگوریتم بهینه‌سازی فاخته قصد بهینه‌سازی آن را دارد [15].

فاخته‌ها برای بیشینه کردن نجات تخم‌های خود به دنبال بهترین منطقه می‌گردند. پس از آنکه جووجه‌ها از تخم در آمدند و به فاخته بالغ تبدیل شدند، جوامع و گروههایی تشکیل می‌دهند. هر گروه منطقه سکونت خود را برای زیست دارد. بهترین منطقه سکونت تمام گروه‌ها مقصد بعدی فاخته‌ها در سایر گروه‌ها خواهد بود. تمام گروه‌ها به سمت بهترین منطقه موجود فعلی مهاجرت می‌کنند. هر گروه در منطقه‌ای نزدیک بهترین موقعیت فعلی ساکن می‌شوند. با در نظر گرفتن تعداد تخمی که هر فاخته خواهد گذاشت و همچنین فاصله فاخته‌ها از منطقه بهینه فعلی برای سکونت، تعدادی شعاع تخم‌گذاری محاسبه شده و شکل می‌گیرد. سپس فاخته‌ها شروع به تخم‌گذاری تصادفی در لانه‌های داخل شعاع تخم‌گذاری خود می‌کنند. این پروسه تا رسیدن به بهترین محل برای تخم‌گذاری (منطقه با بیشترین سود) ادامه می‌باید. این محل بهینه جایی است که بیشترین تعداد فاخته‌ها در آن گرد می‌آیند. پس از چند تکرار تمام جمعیت فاخته‌ها به یک نقطه بهینه با حداقل شbahat تخم‌ها به تخم‌های پرنده‌گان میزبان و همچنین به محل بیشترین منابع غذایی می‌رسند. این محل بیشترین سود کلی را خواهد داشت و در آن کمترین تعداد تخم‌ها از بین خواهند رفت. بنابراین، گام‌های اصلی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

1- تشکیل مکان سکونت¹ جمعیت اولیه فاخته‌ها به وسیله‌ی تعدادی نقطه تصادفی

2- تخصیص تعدادی تصادفی تخم به هر فاخته

3- تعریف شعاع تخم‌گذاری² برای هر فاخته

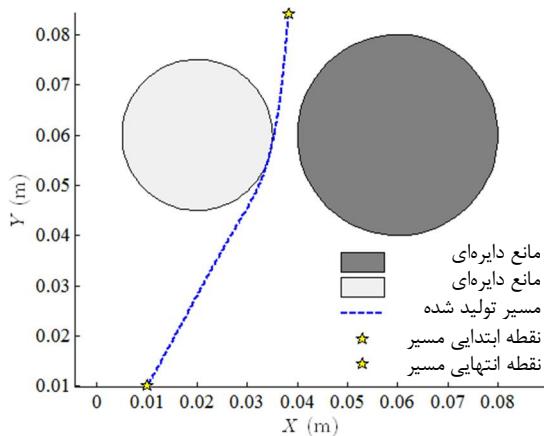
4- هر فاخته تخم خود را در شعاع تخم‌گذاری مربوط به خود قرار می‌دهد

5- از بین رفتن تخم‌های فاخته‌ای که توسط پرنده میزبان شناسایی می‌شود

6- اجازه دادن به رشد تخم‌های شناسایی نشده در لانه میزبان

1- habitats

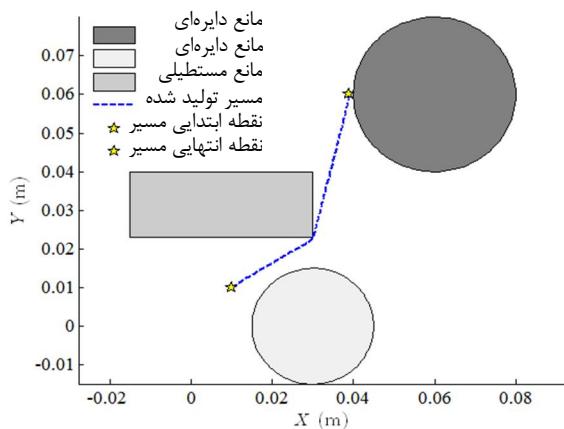
2- Egg Laying Radius(ELR)



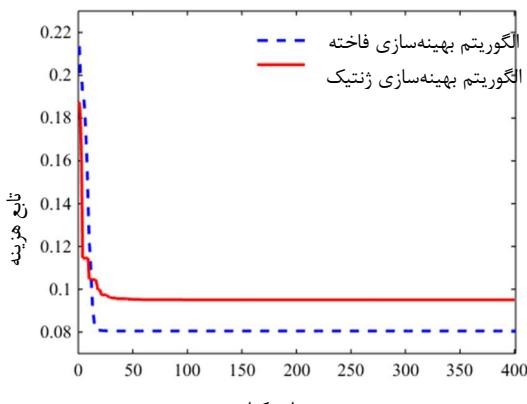
شکل 8 مسیر تولید شده در حضور مانع دایره‌ای

در این محیط انتظار می‌رود که مسیر تولید شده به گونه‌ای باشد که از نزدیکی یکی از رئوس مانع مستطیلی عبور ننموده و در ضمن عدم برخورد به دو مانع دایره‌ای شکل، کوتاه‌ترین فاصله را بپسمايد تا به نقطه هدف برسد که در شکل 9 نشان داده شده است.

همچنین در شکل 10 مقایسه نرخ همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته و ژنتیک برای شبیه‌سازی دوم نشان داده است. همانطور که در شکل مشخص است الگوریتم بهینه‌سازی فاخته نسبت به الگوریتم ژنتیک تقریباً در تعداد تکرار کمتری به مقدار بهینه‌تر، با سرعت بالاتر رسیده است. سرعت و دقیق بالای همگرایی یکی از مزیت‌های این الگوریتم نسبت به روشی چون الگوریتم ژنتیک و یا تجمع ذرات است [15]. همچنین پارامترهای مربوط به الگوریتم‌های فوق در جداول 2 و 3 آورده شده‌اند.

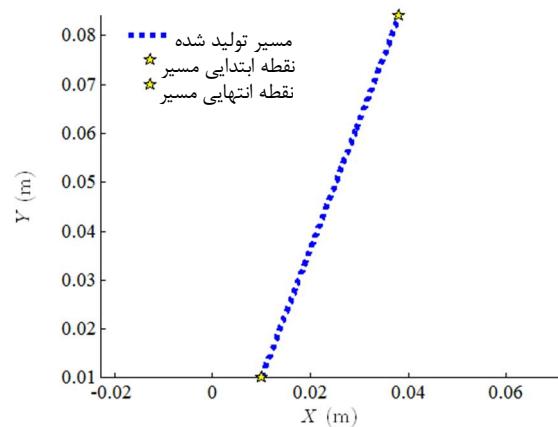


شکل 9 مسیر تولید شده در حضور مانع دایره‌ای و مستطیلی



شکل 10 مقایسه نرخ همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته و ژنتیک در شبیه‌سازی دوم

جدول 1 مشخصات فیزیکی ربات 3 درجه آزادی	
مشخصات فیزیکی یا هندسی	مقدار عددی
طول ضلع (b)	$(C_i C_{i+1})$
جرم سکوی متحرک	$0/2 \text{ kg}$
طول ($B_i C_i = l$)	200 mm
قطر مقطع بازوی میانی	10 mm
چگالی بازوی میانی	$2770 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
مدول یانگ بازوی میانی	73 GPa
دامنه‌ی کورس ($A_i B_i$)	200 mm
قطر داخلی سیلندر	14 mm
قطر خارجی سیلندر	16 mm
چگالی سیلندر	$2770 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
طول ضلع ($A_i A_{i+1}$)	660 mm



شکل 7 مسیر تولید شده بدون حضور مانع

دومین محیط، محیطی است که در آن دو دایره به مراکز $x_{c1} = 0.06$ و $x_{c2} = 0.02$ و شعاع‌های $r_{c1} = 0.02$ و $r_{c2} = 0.06$ $y_{c1} = 0.06$ و $y_{c2} = 0.015$ در مسیر ربات موازی قرار گرفته‌اند.

تابع برخورد، نقطه شروع و پایان مسیر به صورت روابط (85) تا (87) در نظر گرفته شده است:

$$OB(x, y) = OB_1 + OB_2 \quad (85)$$

$$(f_{x_{in}}, f_{x_{end}}) = [0.01 \quad 0.038] \quad (86)$$

$$(f_{y_{in}}, f_{y_{end}}) = [0.01 \quad 0.084] \quad (87)$$

در این محیط انتظار می‌رود که مسیر تولید شده به گونه‌ای باشد که دایره‌ها را دور بزند و از نقاط شروع و هدف تقریباً کوتاه ترین مسیر را طی نماید. همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است، مسیر تولید شده علاوه بر اینکه به دو مانع دایره‌ای شکل برخوردی ندارد همچنین برای کوتاه‌تر شدن از نزدیکی یکی از مانع به خوبی گذشته است.

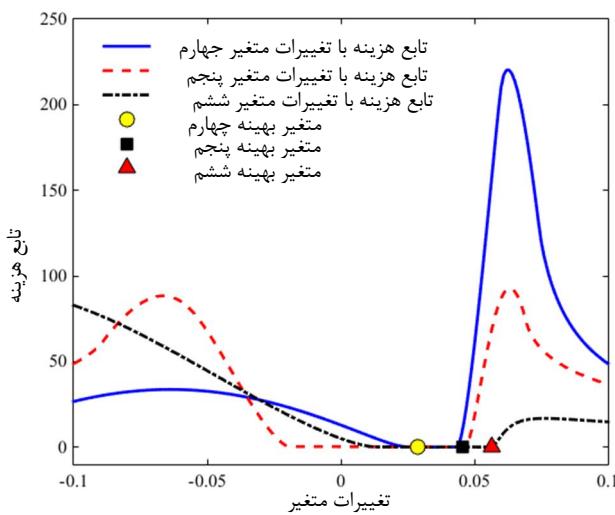
محیط سوم، محیطی است که در آن دو دایره به مراکز $x_{c1} = 0.06$ و $x_{c2} = 0.015$ و شعاع‌های $r_{c1} = 0.02$ و $r_{c2} = 0.03$ و $y_{c1} = 0.06$ و $y_{c2} = 0.03$ یک مستطیل به رؤس $x_{r1} = 0.04$ و $y_{r1} = 0.04$ و $x_{r2} = 0.03$ و $y_{r2} = 0.023$ در مسیر حرکت ربات موازی قرار گرفته شده است.

تابع برخورد، نقطه شروع و پایان مسیر به صورت روابط (88) تا (90) در نظر گرفته شده‌اند:

$$OB(x, y) = OB_1 + OB_2 + OB_3 \quad (88)$$

$$(f_{x_{in}}, f_{x_{end}}) = [0.01 \quad 0.039] \quad (89)$$

$$(f_{y_{in}}, f_{y_{end}}) = [0.01 \quad 0.060] \quad (90)$$



شکل 12 نمودار تابع هزینه به ازای تغییرات متغیرهای چهارم تا ششم

لازم به ذکر است که کلیه ضرایب ثابت مربوط به کنترل کننده مود لغزشی با آزمون و خطای بصری دست آمده است که نیروی اعمالی به هر سه عملگر کشویی ربات موازی قابل اعمال با عملگرهای موجود ساخته شده باشد. این کنترل کننده به ازای سه موقعیت مرجع (X_p, Y_p, ϕ_p) مورد آزمایش قرار گرفت. به دلیل مقاوم بودن کنترلر به نامعینی‌های پارامتری در این شبیه‌سازی، مقادیر جرم سکویی متحرک، نیروی خارجی اعمالی به سکوی متحرک در راستای محور x ، نیروی خارجی اعمالی به سکوی متحرک در راستای محور y و اینترسی مجری نهایی ربات موازی متغیر و در بازه‌ای مجاز به شرح جدول 4 تغییرات دارند.

مجری نهایی ربات موازی در تمام شبیه‌سازی‌ها در مکان اولیه [0.01 m, 0.005 m, 0.05 rad] قرار گرفته است و مجری نهایی ربات در تمام شبیه‌سازی‌ها مسیر را با سرعت ثابت $\frac{cm}{s} = V_d = 1$ می‌نماید. در این بخش سه مسیر تولید شده به عنوان موقعیت مرجع برای ربات موازی تعیین شده است. همچنین زاویه مجری نهایی که مستقل از تولید مسیر فوق است در هر سه شبیه‌سازی به ترتیب $\phi_p = 0.06, 0.08, 0.1$ Rad در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل‌های 13 تا 18 مشخص است ربات بعد از طی مدت زمان اندکی به موقعیت مرجع تعیین شده ($X_{pd}, Y_{pd}, \Phi_{pd}$) دست یافته است. همچنین شکل‌های 19 تا 21 مقدار نیروی اعمالی به عملگرهای ربات سه درجه آزادی موازی از طرف کنترل کننده طراحی شده در طی این مدت زمان را نشان می‌دهد که اندازه آن‌ها مطلوب بوده و قابل ایجاد توسط عملگرهای کشویی ساخته شده موجود است.

جدول 4 نامعینی‌های پارامتری ربات 3 درجه آزادی

نام پارامتر	مقدار تعیین شده در کنترلر	مقدار اسمی در معادلات شبیه‌سازی	مقدار تعیین شده در
جرم سکویی متحرک	kg 0/5	kg 0/2	
نیروی خارجی اعمالی به سکوی متحرک در راستای محور x	N 10	N 0	
نیروی خارجی اعمالی به سکوی متحرک در راستای محور y	N 2	N 0	
اینترسی مجری نهایی ϕ	kg · m ² -4e2 /083	kg · m ² -5e 8/33	I _ه

جدول 2 پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

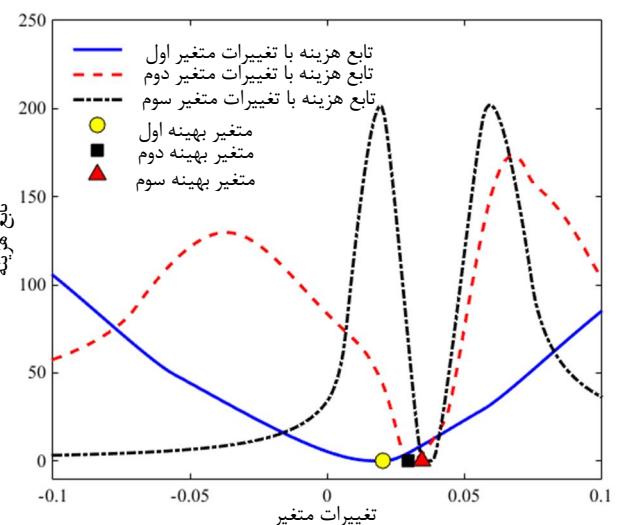
نام پارامتر	مقدار عددی
تعداد فاخته	5
ماکریتم تعداد فاخته	10
ماکریتم تعداد تخم فاخته	10
ماکریتم تعداد تخم فاخته	15
تعداد تکرار	400
ضریب ساعی λ	0/5

جدول 3 پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی زنتیک

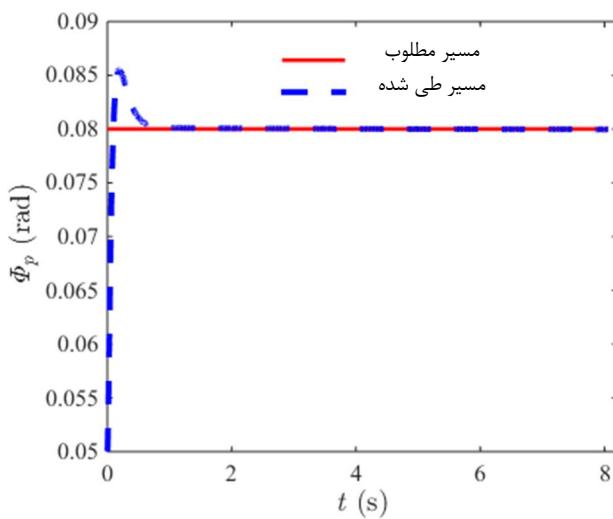
نام پارامتر	مقدار عددی
تعداد جمعیت	200
ترکیب	0/8
جهش	0/04
تعداد تکرار	400

برای اعتبار سنجی نتایج تست همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته به این صورت عمل شد که به تابع هزینه مسیر تولید شده از شش متغیر بهینه بدست آمده، در هر مرتبه پنج متغیر از مقادیر بدست آمده توسط الگوریتم بهینه‌سازی، داده شد و یک متغیر در بازه‌ای متناسب تغییر داده شد. حال باید تابع هزینه‌ای که در این بازه تغییرات بدست می‌آید برای متغیر بهینه داده شده توسط الگوریتم فاخته کمترین مقدار ممکن را داشته باشد. بدین صورت الگوریتم بهینه‌سازی به کمترین مقدار تابع هزینه دست یافته و روش ارائه شده صحه‌گذاری می‌شود. در این تحقیق برای تمام شش متغیر این روند انجام گردید و نتایج حاصل در شکل‌های 11 و 12 ارائه شد. این اعتبار سنجی برای نتایج شبیه‌سازی دوم، انجام گرفته است. فقط ذکر این نکته که به دلیل مقادیر کم تابع هزینه (ناشی از عدم برخورد با موانع) در اطراف متغیر بهینه، در شکل 12 این متغیرها به راحتی قابل تفکیک با سایرین نیستند.

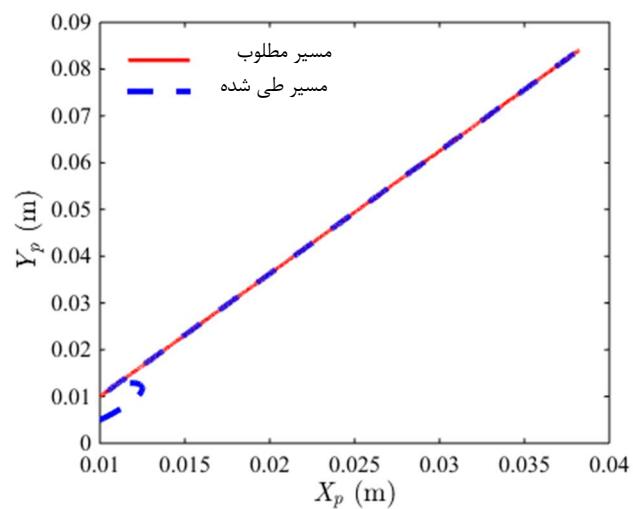
در ادامه تحقیق برای ربات موازی سه درجه آزادی با سه حلقه‌ی سینماتیکی RPR و مشخصات داده شده در جدول 1، کنترلر از نوع مود لغزشی طراحی می‌گردد. ورودی سیستم غیرخطی ربات فوق سه نیروی اعمالی به عملگرهای کشویی در هر سه حلقه سینماتیکی است که از طرف کنترلر طراحی شده ایجاد می‌گردد و خروجی سیستم فوق مکان سکوی متحرک در راستاهای x و y و دوران ϕ است.



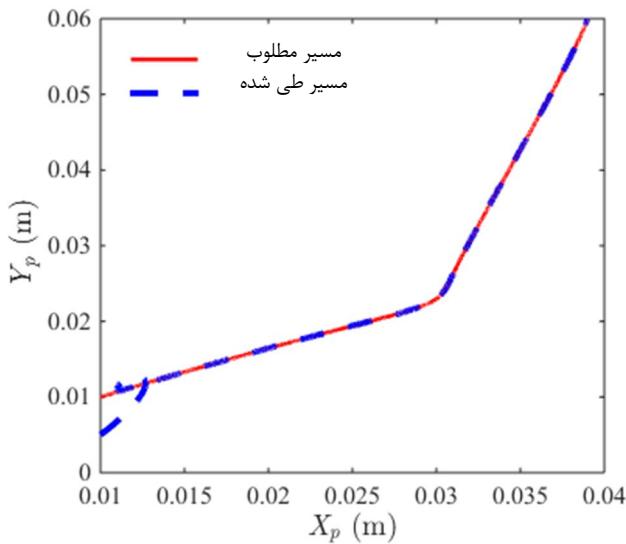
شکل 11 نمودار تابع هزینه به ازای تغییرات متغیرهای اول تا سوم



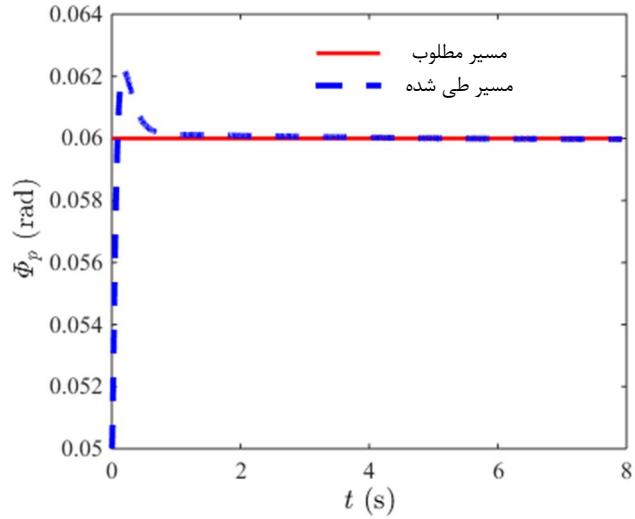
شکل 16 چرخش مجری نهایی ربات در شبیه‌سازی دوم



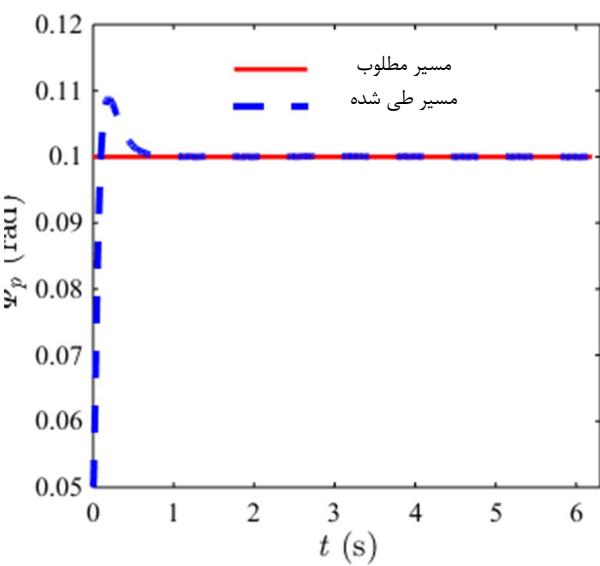
شکل 13 مکان مجری نهایی ربات در شبیه‌سازی اول



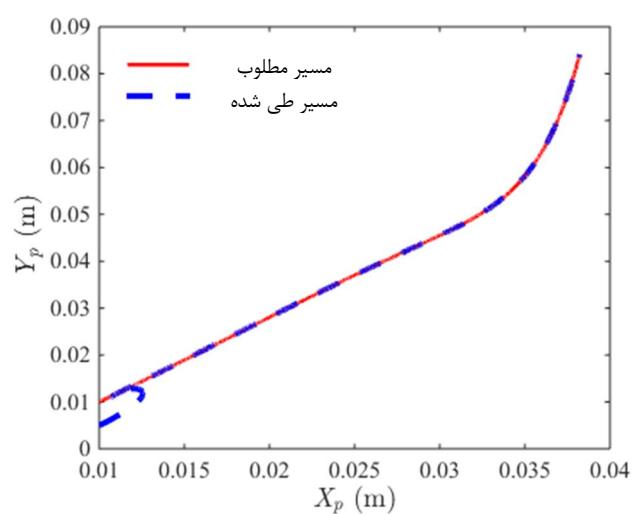
شکل 17 مکان مجری نهایی ربات در شبیه‌سازی سوم



شکل 14 چرخش مجری نهایی ربات در شبیه‌سازی اول



شکل 18 چرخش مجری نهایی ربات در شبیه‌سازی سوم

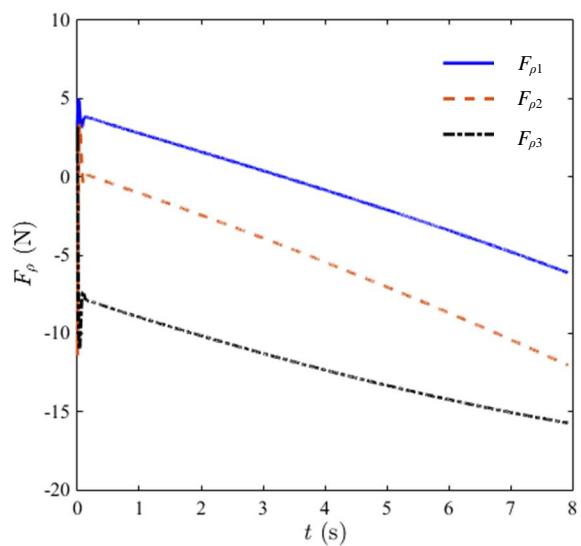


شکل 15 مکان مجری نهایی ربات در شبیه‌سازی دوم

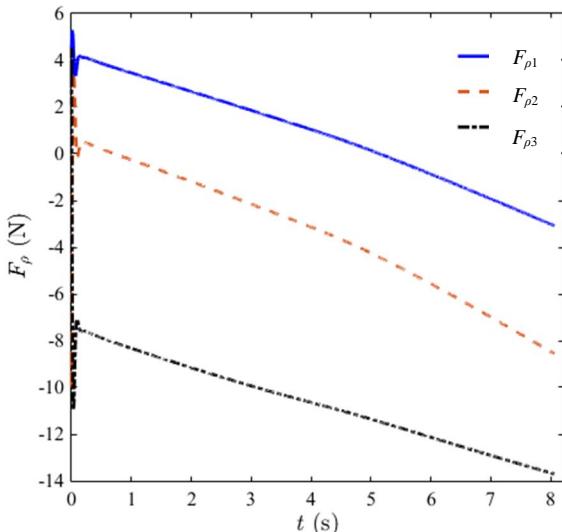
مسیرهایی با وجود موافع و به وسیلهٔ منحنی اسپلین و با استفاده از الگوریتم کارامد فاخته طراحی گردید. همان‌طور که از نتایج ارائه شده در این تحقیق مشخص است استفاده از روش منحنی‌های اسپلین و الگوریتم بهینه‌سازی فاخته به خوبی مؤثر واقع شده به صورتی که طول مسیر ایجاد شده تا حد امکان، بدون برخورد با موافع تعریف شده کوتاه شده است. برای مقایسه سرعت و دقیق‌تری همگرایی این الگوریتم با الگوریتم مشهور ژنتیک مقایسه گردید که بررسی نتایج نشان از سرعت و دقیق‌تری آن دارد. همچنین نتایج همگرایی این الگوریتم توسط روشی ساده‌گذاری شد. در ادامه مسیرهای تعریف شده با استفاده از روشی به عنوان سیگنال مطلوب برای موقعیت مرجع سکویی متحرک ریات تعریف شدند و ریات با استفاده از کنترل‌کننده مود لغزشی با وجود نامعینی‌های زیاد تعریف شده توافق نداشت به آن موقعیت‌ها با طی مدت زمان اندکی دست یابد. همچنین از نتایج مربوط به نیروهای وارد شده به عملگرهای کشویی مشخص است. نیروهای اعمال شده قابلیت ایجاد توسط عملگرهای ساخته شده موجود را دارند.

۱۰- مراجع

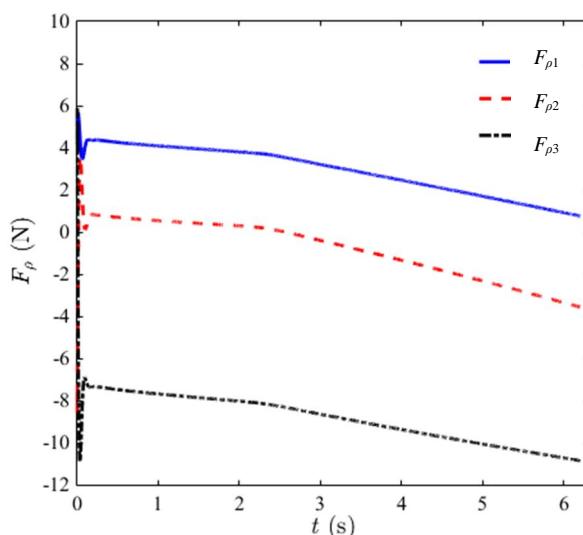
- [1] M. Terrier, A. Dugas and J.Y. Hascoet, Qualification of parallel kinematics machines in high-speed milling on free form surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, pp. 865-877, 2004.
- [2] L. Ren, J. K. Mills, and D. Sun, Adaptive Synchronization Control of a Planar Parallel Manipulator, *Proceeding of The American Control Conference*, pp. 1-6, 2004.
- [3] H.Kordjazi, A.Akbarzadeh, Control of 3-PRR parallel robots using computed torque method, *Tenth Conference on Manufacturing Engineering*, Babol, Iran, 2010. (In Persian)
- [4] S.N.Nabavi, A.Akbarzadeh, S.Abolghasemi, A Method for Solving Dynamic Equations of a 3-PRR Parallel Robot, *A. Mechanics*, vol. 232, pp. 414-418, 2012.
- [5] X. Zhang, J. K. Mills, and W. L. Cleghorn, Multi-mode vibration control and position error analysis of parallel manipulator with multiple flexible links, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 34, no. 2, pp. 197-213, 2010.
- [6] X. Zhang, J. K. Mills, and W. L. Cleghorn, Dynamic Modeling and Experimental Validation of a 3-PRR Parallel Manipulator with Flexible Intermediate Links, *J. Intell.Robot.Syst*, vol. 50, no. 4, pp. 323-340, 2007.
- [7] G. Javid, M.-R.Akbarzadeh-T., A. Akbarzadeh, and S. N. Nabavi, Trajectory tracking of 3-PRR parallel manipulator with PI Adaptive fuzzy terminal sliding mode controller, *1st International conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE)*, Mashhad, Iran, 2011.
- [8] A. Eshaghiyeh Firoozabadi, S.Ebrahimi and G.Amirian, Dynamic characteristics of a 3-RPR planar parallel manipulator with flexible intermediate links, *Robotica*, 2014 (Published online)
- [9] R. W. II and A. Joshi, Planar parallel 3-RPR manipulator, *Proceedings of the Sixth Conference on Applied Mechanisms and Robotics*, 1999.
- [10] S. S. Parsa, H. M. Daniali, and R. Ghaderi, Optimization of parallel manipulator trajectory for obstacle and singularity avoidance based on neural network, *Int J Adv Manuf Technol*, pp. 811-816, 2010.
- [11] M. Danesh, M.R Abazari, Optimize path planning of a planar parallel robot to avoid obstacle collision using genetic algorithm, *Intelligent Systems (ICIS), 2014 Iranian Conference on*, vol., no., pp.1,4, 4-6 Feb. 2014.
- [12] C. Nasa, S. Bandyopadhyay, Trajectory-tracking control of a planar 3-RRR parallel manipulator with singularity avoidance, *13th World Congress in Mechanism and Machine Science*, Guanajuato, Mexico, 19-25 June, 2011.
- [13] S. Lahouar, S. Zeghloul, L. Romdhane, Singularity Free Path Planning for Parallel Robots, *Advances in Robot Kinematics: Analysis and Design*, 2008
- [14] De Boor, C., *A Practical Guide to Splines*, Springer-Verlag, 1978.
- [15] R. Rajabioun, Cuckoo Optimization Algorithm, *Applied Soft Computing*, 2011.
- [16] J. J. E. Slotine and W. Li, *Applied nonlinear control*, Prentice hall Englewood Cliffs, 1991.



شکل ۱۹ نیروی اعمال شده به عملگرهای کشویی در شبیه‌سازی اول



شکل ۲۰ نیروی اعمال شده به عملگرهای کشویی در شبیه‌سازی دوم



شکل ۲۱ نیروی اعمال شده به عملگرهای کشویی در شبیه‌سازی سوم

۹- نتیجه‌گیری

در تحقیق پیش‌رو برای یک ریات سه درجه آزادی صفحه‌ای موازی

- [18] E. Zakeri and S. Farahat, Safe path planning and control of an Unmanned Underwater Vehicle (UUV) using particle swarm optimization and fuzzy logic control method, *Moadres Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 14, pp. 199–210, 2015. (In Persian)
- [17] F. Piltan, S. Emamzadeh, and M. Mirzaei, PUMA-560 Robot Manipulator Position Sliding Mode Control Methods Using MATLAB / SIMULINK and Their Integration into Graduate / Undergraduate Nonlinear Control, Robotics and MATLAB Courses, *IJRA*, 2012.