http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

دوره ۱۲ شماره ۱ اردیبهشت ۱۳۹۱ ص ص ۵۰-۶۵

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۰/۴/۲۹
پذیرش ۹۰/۱۱/۱۰
ارائه در سایت ۹۱/۱/۳۰

طراحی مسیر با هدف بهینه‌سازی زمان و کمینه‌کردن تعداد سوئیچ برای بازوی مارگون کابلی فضایی با مفاصل قفل‌شونده

علی طاهری‌فر[۱]، حسن سالاریه[۲*]، آریا الستی[۳]

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
* تهران، صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۱۵۵، salarieh@sharif.ir

چکیده- در این مقاله، طراحی مسیر سینماتیکی نوع خاصی از بازوهای ابر افزونه مورد بررسی قرار گرفته است. در این بازو با کاهش تعداد عملگرهای کابلی و اضافه‌کردن سیستم قفل در هر لینک، وزن و تعداد عملگرهای آن تا حد زیادی کاهش پیدا کرده است. در این پژوهش، از روش بهینه‌سازی تکاملی پرواز پرندگان در طراحی مسیر استفاده شده است و تمامی قیود سینماتیکی نظیر محدوده حرکتی مفاصل و قیود مربوط به سیستم قفل بازو درنظر گرفته شده‌اند. در بخش اول، جهت کاهش ارتعاشات و مصرف انرژی و افزایش دقت حرکت، مسیر با مشخصه کمترین تعداد سوئیچ، به‌روش بهینه‌سازی یافت شده است. برای صحه‌گذاری بر نتایج به‌دست آمده چند آزمایش مختلف طراحی و بررسی شده است و براساس آن عملکرد مناسب روش پیشنهادشده نشان داده شده است. در بخش دوم، طراحی مسیر با هدف کمینه‌کردن زمان بر اساس تئوری بنگ-بنگ ارائه شده است. در این بخش سینماتیک معکوس بازو در نقطه هدف به‌گونه‌ای حل شده است که مجموع تغییر طول پایه‌های لینک‌ها حداقل شوند. در این قسمت نتایج به‌دست آمده از روش پرواز پرندگان با نتایج روش شبیه‌سازی انجماد طبیعی مقایسه شده است تا صحت پاسخ‌های حاصل شده تائید و عملکرد صحیح آن روشن شود.

کلیدواژگان: طراحی مسیر، بهینه‌سازی، بازوهای افزونه، الگوریتم پرواز پرندگان

Minimum time and minimum switch path planning for a hyper-redundant manipulator with lockable joints

A. Taherifar[1], H. Salarieh[2*], A. Alasty[3]

1- MSc of Mech. Eng., Sharif Univ. of Technology, Tehran, Iran
2- Assist. Prof. of Mech. Eng., Sharif Univ. of Technology, Tehran, Iran
3- Prof. of Mech. Eng., Sharif Univ. of Technology, Tehran, Iran
* P.O. B. 11155-9567 Tehran, salarieh@sharif.ir

Abstract- In this paper, the kinematic path planning of a special hyper-redundant manipulator with lockable joints is studied. In this manipulator the extra cables are replaced by a locking system to reduce weight of the structure and the number of actuators. In this research, the particle swarm optimization is used for path planning. In addition, the kinematic constraints such as joint limits are considered. In the first part of this paper, the minimum switch path planning is solved. This kind of path planning will decrease the vibration and energy consumption and increase the accuracy of manipulator. To validate the result, an innovative test is designed. According to the test results, the performance of the proposed method is shown. In the second part of the paper, the minimum time trajectory planning is studied based on the bang-bang theory. The inverse kinematic of manipulator is calculated such that the sum of legs length changes is decreased. Finally, the result of trajectory planning obtained from particle swarm optimization are compared to simulated annealing optimization results to confirm the performance and correctness of results.

Key words: Path planning, Optimization, Redundant manipulators, Particle swarm optimization

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]

۱- مقدمه

بازوهای مارگون، بازوهایی با درجات آزادی افزونه هستند که تعداد درجات آزادی آن‌ها از حداقل مورد نیاز برای دسترسی به تمام نقاط فضا بیشتر است. با توجه به شکل ظاهری بازوهای مارگون، از اصطلاحاتی همچون خرطوم فیل[1] و بازوی هشت‌پا[2]، توسط محققان استفاده شده است. بازوهای با درجات آزادی افزونه[3] توانایی کار در محیط‌های کاملاً مقید، پیچیده و خطرناک نظیر کار در راکتورهای هسته‌ای، اعمال جراحی، کاوش‌ها و ایستگاه‌های فضایی را دارند[۱]. با توجه به درجات آزادی بالای بازوهای افزونه و وجود پاسخ‌های زیاد برای سینماتیک معکوس این بازوها[۲]، مسئله طراحی مسیر این گونه بازوها توجه بسیاری از متخصصان را به خود جلب کرده است. طراحی مسیر بازوها می‌تواند با رویکرد سینماتیکی و یا دینامیکی انجام پذیرد. با هر کدام از این رویکردها می‌توان توابع هزینه متفاوتی را جهت یافتن مسیر بهینه به‌کار برد. به عنوان مثال، تابع هزینه می‌تواند کمینه‌کردن مصرف انرژی[۳-۵]، کمینه‌کردن زمان حرکت، جلوگیری از برخورد با موانع [۷،۶]، حرکت یکنواخت بدون ناپیوستگی در سرعت و شتاب، دوری از نقاط تکین[۸] و یا حرکت با مینیمم جرک[4] باشد[۹].

در مقاله‌ای که توسط آتا و همکارانش[۱۰] ارائه شد، مسئله ردیابی مسیر بازوهای با درجه آزادی اضافی با استفاده از روش جستجوی الگوی تعمیم یافته مورد بررسی قرار گرفت. هدف از حل این مسئله رسیدن به کمترین خطا بین نقاط مسیر مطلوب و نقاط مسیر واقعی بود. در تعریف تابع هدف، کمینه‌کردن حرکت مفاصل نیز درنظر گرفته شده است. آن‌ها برای نشان دادن کارایی الگوریتم و مقایسه آن با الگوریتم ژنتیک، یک بازوی سه درجه آزادی در صفحه را معیار قضاوت قرار دادند. سای و هانگ[۱۱] روشی برای کنترل بهینه ربات‌های چند درجه آزادی با استفاده از شبکه عصبی دوگانه براساس نامساوی‌های تغییراتی خطی[5] ارائه دادند. ایده اصلی این تحقیق بر پایه ضعف روش ماتریس شبه معکوس در حل مسئله سینماتیک معکوس می‌باشد.

1. Elephant trunk
2. Tentacle manipulator
3. Redundant manipulator
4. Jerk
5. LVI

در مقالاتی که تاکنون اشاره شد، تمرکز پژوهشگران در مسئله طراحی مسیر بیشتر بر روی حرکت بدون ناپیوستگی در سرعت و شتاب بوده است، اما زاچاریا و همکارانش[۱۲] در سال ۲۰۰۵، با برقراری آنالوژی بین مسئله فروشنده دوره گرد[6] و مسئله طراحی مسیر، روشی بر پایه الگوریتم ژنتیک ارائه دادند. آن‌ها در این روش ترتیب بهینه گذر از نقاط مشخصی از فضای کاری را به‌دست آورند. زیدیاس و همکارانش[۱۳] در سال ۲۰۱۰ روشی برای پیداکردن جواب مسئله برنامه‌ریزی وظایف[7] در حضور موانع و در کمترین زمان پیشنهاد دادند. مسئله آن‌ها از دو بخش عمده تشکیل شده که از نظر محاسباتی هر دو بخش جزء مسائل ان پی-سخت[8] می‌باشند. این تحقیق برای یک محیط دوبعدی در حضور موانع با شکل‌ها و سایزهای مختلف انجام گرفته است و هدف آن گذر نقطه انتهایی ربات از یک سری نقاط مشخص، بدون برخورد با موانع است. نوآوری این تحقیق در ترکیب مسائل بهینه زمانی، برخورد موانع و برنامه‌ریزی وظایف می‌باشد. نکتاریوس و همکاران[۱۴] روشی آفلاین برای یافتن موقعیت بهینه پایه ربات جهت ردیابی یک مسیر سه‌بعدی با ماکزیمم عملکرد سرعتی ارائه دادند.

به‌طور کلی اضافه‌شدن معادلات دینامیکی در مسئله طراحی مسیر باعث پیچیده‌تر شدن معادلات و زمان‌بر شدن حل آن‌ها می‌شود. بنابراین اکثر مقالاتی که با رویکرد دینامیکی به بررسی طراحی مسیر ربات‌ها می‌پردازند، از روش‌های هوشمند برای مدلسازی و یا پیش‌بینی مسیر استفاده می‌کنند. خوخی و بارون[۱۵] با استفاده از دو شبکه عصبی-فازی مسیر بهینه زمانی را برای یک بازوی سه درجه آزادی در صفحه به‌دست آوردند. آن‌ها از یک شبکه عصبی برای حل سینماتیک معکوس ربات و از شبکه دیگری برای مدلسازی دینامیک ربات استفاده کردند. در این مقاله برای موقعیت، سرعت، شتاب، جرک و گشتاور محدوده تغییرات درنظر گرفته شده است. در مقاله بعدی خوخی و بارون[۱۶] توابع هدف چندگانه برای طراحی مسیر ربات افزونه ارائه شده است. برای این کار از یک شبکه عصبی-فازی آفلاین برای تولید مسیرهای چندهدفه در فضای کاری ربات استفاده شده است. مسیر مورد نظر می‌تواند دارای کمترین زمان و یا کمترین انرژی باشد.

6. TSP
7. Task scheduling problem
8. NP-hard

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]

هنرور در سال ۲۰۰۹ ایده جدید استفاده از سیستم قفل در مفاصل را مطرح کرد[۱۷]. به کمک این نوآوری می‌توان، تنها با استفاده از سه کابل و سه عملگر، کل بازو را کنترل کرد. استفاده از مکانیزم قفل باعث کاهش تعداد عملگرها و سبک‌تر شدن بازو و در نتیجه کاهش هزینه‌ها می‌شود. یک بازوی ۸ درجه آزادی با این شیوه در آزمایشگاه کنترل دانشگاه صنعتی شریف ساخته شده است. با اینکه ایده مطرح شده ساختار بازو را ساده‌تر کرده است، اما باعث پیچیدگی طراحی مسیر و کنترل آن شده است. در این مقاله، هدف بررسی طراحی مسیر برای یک مدل سینماتیکی از بازوی مارگون کابلی با مفاصل قفل‌شونده معرفی شده در مرجع [۱۷] می‌باشد. در طراحی مسیر این بازو، متغیرهای پیوسته یعنی طول کابل‌ها و متغیرهای گسسته یعنی وضعیت قفل‌ها وارد می‌شوند. وجود متغیرهای گسسته و پیوسته در کنار هم طراحی مسیر این بازو را به یک مسئله خاص و جدید تبدیل می‌کند به طوری که تاکنون هیچ تحقیقی در خصوص طراحی مسیر این نوع بازوها صورت نگرفته است. در این مقاله، سعی شده است تا با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی نحوه تغییر طول کابل‌ها و نحوه باز و بسته‌شدن قفل‌های مفاصل به گونه‌ای بهینه شوند که بازو با کمترین تعداد سوئیچینگ و یا در کمترین زمان به نقطه هدف برسد. جنبه دیگر نوآوری این پژوهش در استفاده از الگوریتم پرواز پرندگان می‌باشد، چرا که در تحقیقاتی که تاکنون صورت گرفته غالبا از الگوریتم‌های ژنتیک در طراحی مسیر استفاده شده است.

ادامه این مقاله به شش بخش تقسیم می‌شود. در بخش دوم مفاهیم اولیه راجع به بازوی مارگون با مفاصل قفل‌شونده و سینماتیک مستقیم بازو ارائه خواهد شد و از یک شبکه عصبی برای مدلسازی سینماتیک استفاده می‌شود. در بخش سوم توضیح مختصری راجع به روش بهینه‌سازی پرواز پرندگان ارائه خواهد شد و در بخش چهارم طراحی مسیر با معیار کمترین سوئیچ ارائه می‌شود. طراحی مسیر با هدف بهینه‌سازی زمان و نتایج آن در بخش پنجم توضیح داده می‌شود. در این بخش نتایج بهینه‌سازی روش پرواز پرندگان با نتایج حاصل از روش شبیه‌سازی انجماد طبیعی (آنیلینگ[1]) مقایسه خواهد شد. در نهایت نتیجه‌گیری پایانی در بخش ششم آورده می‌شود.

1. Annealing

۲- مفاهیم اولیه

۲-۱- تعریف مسئله

در این مقاله هدف طراحی مسیر نوع خاصی از بازوهای با درجات آزادی افزونه می‌باشد. در بازوهای کابلی مرسوم از سه کابل برای کنترل موقعیت هر لینک استفاده می‌شود. اما در این بازو تنها از سه کابل برای کنترل موقعیت کل بازو استفاده می‌شود و در کنار آن از سیستم قفل در روی هر لینک بهره می‌برد. این بازو دارای لینک‌های با ساختار لولایی-کشویی-کروی سه‌گانه[2] است که مطابق شکل ۱ به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند. کابل‌های اصلی از سوراخ‌های لبه صفحات عبور کرده و به صفحه بالایی محکم می‌شوند. انتهای دیگر کابل‌ها توسط موتور و قرقره متصل به آن کشیده می‌شوند. هر لینک دارای سه جک هیدرولیکی کوچک مطابق شکل ۲ می‌باشد. دریچه‌های جک‌های هیدرولیکی توسط لوله‌های انعطاف‌پذیر به یکدیگر وصل شده‌اند. در مسیر لوله‌ها از یک عدد شیر سلونوئیدی استفاده شده است که در صورت بازبودن شیر، جک‌ها آزادانه حرکت می‌کنند و زمانی که شیر سلونوئیدی بسته باشد کل لینک قفل خواهد شد. شکل ۲ مدار هیدرولیکی به‌کار رفته در سیستم قفل هر لینک را نشان می‌دهد. با مشاهده این مدار می‌توان رابطه قیدی بین طول جک‌ها را به صورت زیر نوشت:

$$l_1 + l_2 + l_3 = L \qquad (۱)$$

در این رابطه، l_3, l_2, l_1 به ترتیب طول پایه‌های اول، دوم و سوم‌اند. این رابطه قیدی بیان می‌کند که در هر لحظه با داشتن طول دو جک می‌توان طول جک سوم را به‌دست آورد و وضعیت کامل یک لینک را مشخص کرد. علاوه بر این طول یک پایه نمی‌تواند از یک مقدار مشخصی کمتر و از مقدار معین دیگری بیشتر باشد. این قیدها را به صورت زیر بیان می‌کنیم:

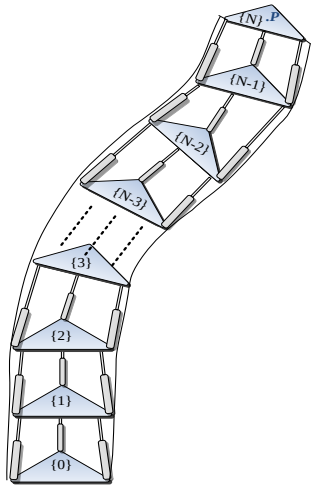
$$\begin{aligned} l_{\min} &\le l_1 \le l_{\max} \\ l_{\min} &\le l_2 \le l_{\max} \\ l_{\min} &\le l_3 \le l_{\max} \end{aligned} \qquad (۲)$$

در این رابطه، $l_{\min}$ و $l_{\max}$ به ترتیب حداقل و حداکثر طول پایه‌ها می‌باشند. تمامی قیدهای بیان‌شده در روابط (۱) و (۲) در طراحی مسیر بازو لحاظ خواهند شد.

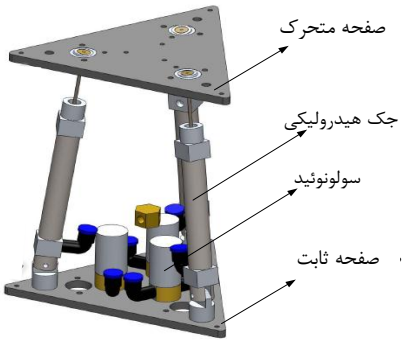
2. 3-RPS

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]



شکل ۱ شماتیک بازوی N لینکی کابلی



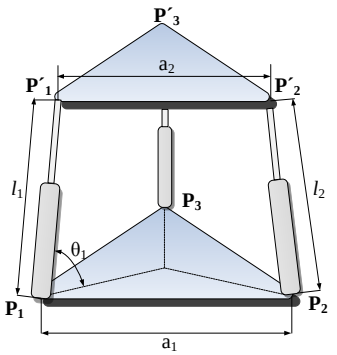
شکل ۲ شماتیک یک لینک به همراه سولونوئیدها و اتصالات

با متصل‌کردن لینک‌ها به یکدیگر و تشکیل بازو، در هر لحظه، تمامی لینک‌ها به جز یکی از آن‌ها قفل شده و سپس با تغییر طول کابل تغییرات لازم در اندازه پایه آن لینک به وجود آمده و بدین ترتیب می‌توان با هر ترتیب دلخواهی مفصل‌ها را آزاد و یا قفل کرد و با کشش سه کابل هر شکل دلخواهی را به بازو داد.

۲-۲- معادلات سینماتیک مستقیم

برای حل معادلات سینماتیکی کل بازو، ابتدا معادلات مربوط به یک لینک بازو را نوشته و سپس، با استفاده از ماتریس‌های نگاشت، معادلات را برای تمام نقاط بازو می‌نویسیم.

با توجه به شکل ۳ زاویه جک‌ها با صفحه پایینی $\theta_1,\theta_2,\theta_3$ طول جک‌ها l_1,l_2,l_3، طول ضلع مثلث متساوی‌الاضلاع پایینی a_1 و طول ضلع مثلث متساوی‌الاضلاع بالایی a_2 می‌باشد. محور دوران مفاصل پایینی، عمود بر خط چین‌ها می‌باشد. پارامترهای هندسی بازو در جدول ۱ آمده است.

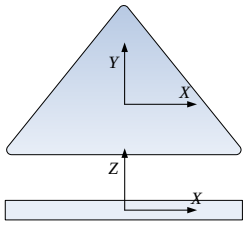


شکل ۳ شماتیک لینک دو درجه آزادی با ساختار موازی

جدول ۱ پارامترهای هندسی بازو بر حسب میلی‌متر

a_1	a_2	l_{min}	l_{max}
۱۰۰	۷۰	۱۰۰	۱۵۰

با درنظر گرفتن دستگاه مختصات مطابق شکل ۴ بر روی صفحه پایینی، مختصات نقاط روی صفحات ثابت و متحرک را می‌توان به صورت روابط (۳) و (۴) نوشت.



شکل ۴ سیستم مختصات متصل به صفحه پایینی

$$P_1=\begin{bmatrix} x_1=\dfrac{-a_1}{2} \\ y_1=\dfrac{-\sqrt{3}}{6}a_1 \\ z_1=0 \end{bmatrix},\quad P_2=\begin{bmatrix} x_1=\dfrac{a_1}{2} \\ y_1=\dfrac{-\sqrt{3}}{6}a_1 \\ z_2=0 \end{bmatrix},$$

$$P_3=\begin{bmatrix} x_3=0 \\ y_3=\dfrac{\sqrt{3}}{3}a_1 \\ z_3=0 \end{bmatrix} \qquad (۳)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]

$$P_1' = \begin{bmatrix} x_1' = \frac{-a_1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} l_1 \cos\theta_1 \\ y_1' = \frac{-\sqrt{3}}{6} a_1 + \frac{1}{2} l_1 \cos\theta_1 \\ z_1' = l_1 \sin\theta_1 \end{bmatrix},$$

$$P_2' = \begin{bmatrix} x_1' = \frac{a_1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} l_2 \cos\theta_2 \\ y_1' = \frac{-\sqrt{3}}{6} a_1 + \frac{1}{2} l_2 \cos\theta_2 \\ z_2' = l_2 \sin\theta_2 \end{bmatrix},$$

$$P_3' = \begin{bmatrix} x_3' = 0 \\ y_3' = \frac{\sqrt{3}}{3} a_1 - l_3 \cos\theta_3 \\ z_3' = l_3 \sin\theta_3 \end{bmatrix} \qquad (۴)$$

با توجه به اینکه فاصله نقاط صفحه بالایی از هم a_2 است، داریم:

$$\begin{aligned} &(x_1' - x_2')^2 + (y_1' - y_2')^2 + (z_1' - z_2')^2 = a_2^2 \\ &(x_1' - x_3')^2 + (y_1' - y_3')^2 + (z_1' - z_3')^2 = a_2^2 \\ &(x_2' - x_3')^2 + (y_2' - y_3')^2 + (z_2' - z_3')^2 = a_2^2 \end{aligned} \qquad (۵)$$

$$\begin{aligned} &a_1^2 - \sqrt{3} a_1 l_1 \cos\theta_1 - \sqrt{3} a_1 l_2 \cos\theta_2 + l_1 l_2 \cos\theta_1 \cos\theta_2 + \\ &l_1^2 - 2 l_1 l_2 \sin\theta_1 \sin\theta_2 + l_2^2 = a_2^2 \\ &a_1^2 - \sqrt{3} a_1 l_1 \cos\theta_1 - \sqrt{3} a_1 l_3 \cos\theta_3 + l_1 l_3 \cos\theta_1 \cos\theta_3 + \\ &l_1^2 - 2 l_1 l_3 \sin\theta_1 \sin\theta_3 + l_3^2 = a_2^2 \\ &a_1^2 - \sqrt{3} a_1 l_2 \cos\theta_2 - \sqrt{3} a_1 l_3 \cos\theta_3 + l_2 l_3 \cos\theta_2 \cos\theta_3 + \\ &l_2^2 - 2 l_2 l_3 \sin\theta_2 \sin\theta_3 + l_3^2 = a_2^2 \end{aligned}$$

(۶)

حال چنانچه طول‌های l_1, l_2, l_3 معلوم باشند، می‌توان معادلات (۶) را حل کرد و مقادیر $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ را به‌دست آورد. برای حل معادلات (۶) باید از روش‌های حل عددی معادلات غیرخطی استفاده کرد. با داشتن طول جک‌ها و زوایا و با استفاده از ماتریس‌های انتقال می‌توان مختصات هر نقطه از بازو را نسبت به دستگاه مختصات اصلی به‌دست آورد.

اگر ${}^N P$ موقعیت مجری نهایی بازو در دستگاه مختصات شماره N باشد، داریم:

$${}^0P = {}^0_1T \, {}^1_2T \ldots {}^{N-1}_{N}T \; {}^N P \qquad (۷)$$

در معادله (۷) ماتریس ${}^A_BT$ ماتریسی است که موقعیت و جهت دستگاه مختصات A نسبت به دستگاه مختصات B را بیان می کند و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$${}^A_BT = \begin{bmatrix} {}^A_BR_{(3\times3)} & {}^AP_{Borg\,(3\times1)} \\ [0]_{(1\times3)} & 1 \end{bmatrix} \qquad (۸)$$

که در آن ${}^A_BR$ ماتریس دوران دستگاه B نسبت به دستگاه A و ${}^AP_{Borg}$ مختصات مبدا دستگاه B نسبت به دستگاه A می‌باشد. ستون‌های ماتریس ${}^A_BR$ به عبارتی مختصات بردارهای یکه دستگاه B در دستگاه A هستند. بنابراین داریم:

$${}^A_BR = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 \end{bmatrix}$$

$$R_1 = \frac{(P_2' - P_1')}{|P_2' - P_1'|}, \quad R_2 = \frac{(P_3' - \frac{P_2' + P_1'}{2})}{\left| P_3' - \frac{P_2' + P_1'}{2} \right|}, \quad R_3 = R_1 \times R_2$$

$${}^AP_{Borg} = \begin{bmatrix} \frac{P_1' + P_2' + P_3'}{3} \end{bmatrix} \qquad (۹)$$

به این ترتیب می‌توان با داشتن طول تمام پایه‌ها، مختصات تمام نقاط بازو را نسبت به دستگاه مختصات اصلی متصل به کف بازو به‌دست آورد یا به عبارتی سینماتیک مستقیم بازو را حل کرد. در بخش بعدی نحوه مدلسازی سینماتیک مستقیم یک لینک با استفاده از شبکه عصبی توضیح خواهد شد.

۲-۳- مدلسازی سینماتیک با شبکه عصبی

بسیاری از سیستم‌های پیچیده را می‌توان با استفاده از شبکه‌های عصبی و با دادن داده‌های ورودی و خروجی سیستم مدلسازی کرد. در شبکه‌های عصبی، بدون نیاز به معادلات داخلی سیستم می‌توان سیستم را با دقت بالایی مدل کرد. استفاده از شبکه‌های عصبی علاوه بر ساده‌کردن مدلسازی، باعث افزایش سرعت محاسبات شده و امکان انجام محاسبات به صورت آنلاین را فراهم می‌کنند.

با توجه به اینکه برای حل سینماتیک معکوس بازوی افزونه کابلی به روش بهینه‌سازی روابط سینماتیک مستقیم بارها و بارها فراخوانی شده و از طرفی روابط نهایی سینماتیک مستقیم

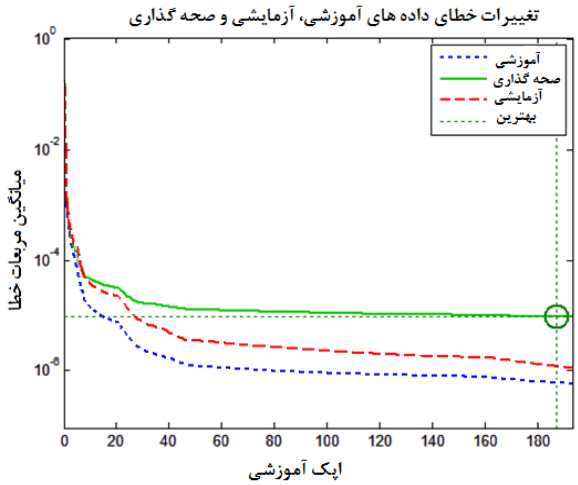
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]

بازو به سه معادله جبری غیرخطی منجر می‌شود، سرعت محاسبات بسیار کند می‌شود. به همین دلیل، سینماتیک مستقیم (رابطه (۶)) را به یک شبکه عصبی آموزش می‌دهیم تا سرعت اجرای بهینه سازی افزایش یابد.

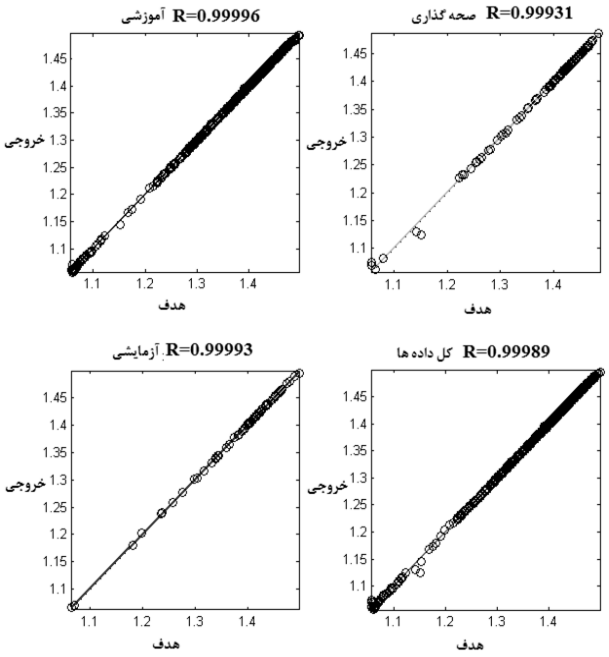
۲-۴- آموزش شبکه عصبی

برای مدلسازی سینماتیک مستقیم، از یک شبکه عصبی دولایه‌ای استفاده شده است. با توجه به پیچیدگی مسئله، تعداد نرون‌های لایه مخفی برابر ۲۰ انتخاب شده است. برای آموزش شبکه از ۴۰۰ جفت داده ورودی-خروجی استفاده شده است. سه ورودی شبکه عبارت‌اند از l_1,l_2,l_3 و سه خروجی شبکه $\theta_1,\theta_2,\theta_3$ می‌باشند. بعد از ۱۸۷ دوره آموزشی[1] خطای داده‌های صحه‌گذاری شروع به افزایش کرده[2] و آموزش به پایان رسیده است. میانگین مربعات خطای[3] داده‌های صحه‌گذاری در بهترین حالت به $۹/۵۰۴۵ \times ۱۰^{-۶}$ رسیده است. شکل ۵ تغییرات خطای داده‌های آموزشی، آزمایشی و صحه‌گذاری را در تکرارهای مختلف نشان می‌دهد. نمودار همبستگی این داده‌ها در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. با توجه به این نمودار، همبستگی داده‌های آموزشی و غیر آموزشی به ترتیب برابر ۹۹/۹۶ درصد و ۹۹/۹۳ درصد می‌باشد. با به‌کار بردن این مدلسازی سرعت انجام محاسبات حدود ۱۲ برابر می‌شود.



شکل ۵ خطای داده‌های آموزشی، آزمایشی و صحه‌گذاری در تکرارهای مختلف آموزش شبکه عصبی

1. Epoch
2. Over-fitting
3. MSE



شکل ۶ نمودار همبستگی داده‌های آموزشی، آزمایشی، صحه‌گذاری و کل داده‌ها

برای اثبات عملکرد صحیح مدل در یک بازوی ۶ لینکی، ۲۰۰ جفت داده تصادفی به شبکه عصبی داده شده است. در هر یک از این جفت داده‌ها، طول پایه‌های تمام لینک‌های بازو وجود دارد. به عبارت دیگر مقادیر l_1,l_2,l_3 هر ۶ لینک در یک جفت داده قرار داده شده است. با اعمال ورودی‌ها به شبکه عصبی، زوایای $\theta_1,\theta_2,\theta_3$ برای هر لینک به‌دست آمده و سپس با استفاده از رابطه (۷) مختصات مجری نهایی بازو محاسبه شده است. جدول ۲ میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطا[4] را برای این ۲۰۰ جفت داده آزمایشی نشان می‌دهد. واحد میانگین مربعات خطا میلی‌متر مربع و واحد ریشه میانگین مربعات خطا میلی‌متر می‌باشد. با توجه به پارامترهای هندسی بازو که در جدول ۱ ذکر شده است، طول عمودی یک بازوی ۶ لینکی حدود ۷۴۰ میلی‌متر خواهد شد و ریشه میانگین مربعات خطای آن زیر ۲/۵ میلی‌متر بوده و در این تحقیق قابل قبول درنظر گرفته شده است. هر چند با افزایش تعداد داده‌های آموزشی به همراه تعداد نرون‌های شبکه و تعداد لایه‌های آن می‌توان خطا را کاهش داد. بدیهی است که با پیچیده‌ترکردن شبکه و افزایش داده‌های آموزش می‌توان

4. RMSE

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]

دقت شبکه را در تخمین سینماتیک مستقیم افزایش داد. البته در اینجا چون هدف معرفی الگوریتم و نحوه عملکرد آن است، جهت اجتناب از طولانی‌شدن زمان شبیه‌سازی‌ها، از بزرگ‌تر کردن شبکه خودداری شده است.

جدول ۲ میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطا برای ۲۰۰ جفت داده آزمایشی

خطا/ مختصات	میانگین مربعات خطا	ریشه میانگین مربعات خطا
X	۱/۰۶۶۱	۱/۰۳۲۵
Y	۳/۰۰۷۲	۱/۷۳۴۱
Z	۵/۹۱۸۱	۲/۴۳۲۷

۳- بهینه‌سازی پرواز پرندگان

۳-۱- مقدمه

روش پرواز پرندگان[1] یک الگوریتم بهینه‌سازی بر پایه جمعیت است[۱۸]. این روش در ابتدا توسط ابرهارت و کندی ابداع شد. بهینه‌سازی یک مسئله در این روش با تعدادی از پاسخ‌های اتفاقی آغاز شده و سپس، با تکرارهای پیاپی، پاسخ‌های بهینه در فضای جستجو کشف می‌شوند. در برخی سیستم‌ها، الگوریتم پرواز پرندگان بسیار هوشمندتر و سریع‌تر از الگوریتم‌های ژنتیک عمل می‌کند و پیاده‌سازی آن نیز ساده‌تر می‌باشد. توصیف جامع‌تر در مورد این الگوریتم را می‌توان در مراجع [۱۹] و [۱۸] یافت. در ادامه توصیف مختصری از الگوریتم پرواز پرندگان پیوسته داده خواهد شد.

۳-۲- الگوریتم پرواز پرندگان پیوسته

فرض کنید یک فضای جستجوی D بعدی و یک دسته N تایی از ذرات در این فضا داشته باشیم (این ذرات همان پرندگان متعلق به گروه‌اند می‌باشند). بردار D بعدی به نام $X_i=(x_{i1},x_{i2},\ldots,x_{iD})(i=1,2,\ldots,N)$، نشان‌دهنده موقعیت ذره i ام است. هر درایه از بردار Xi یک متغیر بهینه‌سازی است و هر ذره می‌تواند یک پاسخ احتمالی برای مسئله بهینه‌سازی باشد. ارزندگی یا میزان بهینه‌بودن هر ذره را می‌توان با قراردادن موقعیت آن ذره در تابع هزینه به‌دست آورد. تمایل ذره i ام برای تغییر موقعیت در یک جهت بخصوص را با $V_i=(v_{i1},v_{i2},\ldots,v_{iD})(i=1,2,\ldots,N)$، نشان می‌دهیم و آن را سرعت ذره می‌نامیم (در اینجا سرعت ذره مفهوم تغییرات موقعیت Δx را دارد). بهترین موقعیت تجربه‌شده توسط ذره i ام تا تکرار t را با $P_i=(p_{i1},p_{i2},\ldots,p_{iD})$ نشان می‌دهیم و بهترین موقعیت تمامی ذرات تا تکرار t را $P_g=(p_{g1},p_{g2},\ldots,p_{gD})$ می‌نامیم. موقعیت ذره i ام در هر تکرار را می‌توان توسط رابطه زیر به‌روز کرد:

$$X_i(t+1)=X_i(t)+V_i(t+1) \quad (۱۰)$$

$$V_i(t+1)=wV_i(t)+b_1r_1(P_i-X_i(t))+b_2r_2(P_g-X_i(t)) \quad (۱۱)$$

که در آن $i=1,2,\ldots,m$ و w ضریب اینرسی است و مقدار ثابتی در بازه [۰،۱] می‌گیرد، b_1 و b_2 به ترتیب موسوم به ضریب یادگیری ادراکی و اجتماعی هستند و r_1 و r_2 اعداد اتفاقی تولیدشده در بازه [۰،۱] می‌باشند. معیار پایان‌پذیری الگوریتم می‌تواند حداکثر تعداد تکرارها و یا رسیدن به مقدار مشخصی از ارزندگی برای P_g باشد[۲۰].

۴- مسئله کمترین سوئیچ

۴-۱- مقدمه

یکی از جذاب‌ترین توابع هدف در طراحی مسیر بازوی افزونه قفل‌شونده، طراحی مسیر با کمترین تعداد سوئیچ می‌باشد. کاهش تعداد سوئیچ‌ها باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود، زیرا در هر مرتبه باز و بسته‌شدن قفل یک لینک، سولونوئیدهای آن لینک مقداری انرژی الکتریکی مصرف می‌کنند. علاوه بر این، دقت حرکت نیز کاهش می‌یابد زیرا هر بار که قفل لینکی باز شود و قفل لینک دیگری بسته شود، راستای حرکت بازو عوض شده و به علت وجود لقی در مفاصل بازو دقت حرکت کاهش می‌یابد و مزیت سوم به‌کار بردن کمترین سوئیچینگ، کاهش ارتعاشات است. البته ارتعاشات دستگاه در تعداد زیاد سوئیچ اتفاق می‌افتد و در تعداد محدودتر چندان محتمل نمی‌باشد.

در این بخش فرض بر این است که تعداد سوئیچ‌ها و مقدار مصرف انرژی با یکدیگر متناسب می‌باشند (که فرض منطقی می‌باشد). به همین علت یافتن کمترین تعداد سوئیچ و حل مسئله طراحی مسیر مربوط به آن متناظر حل مسئله مینیمم انرژی خواهد بود.

1. PSO

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]

مسئله یافتن کمترین سوئیچ یک مسئله بهینه‌سازی است. خواسته مسئله این است که مجری نهایی بازو از یک نقطه مشخص شروع به حرکت کند و به نقطه مقصد از پیش تعیین شده برسد و در طی حرکت از حداقل تعداد سوئیچ استفاده کند. شایان ذکر است که در اینجا شکل مسیر حرکت دارای اهمیت نمی‌باشد و صرفا شروع از یک نقطه و رسیدن به نقطه انتهایی مد نظر است.

برای حل این مسئله می‌توان روش زیر را به‌کار برد. ابتدا سینماتیک معکوس بازو را در نقطه شروع حرکت به‌دست آورده تا طول پایه‌های تمامی لینک‌ها مشخص شود، سپس سینماتیک معکوس بازو در نقطه مقصد را به گونه ای حل کرده که تنها طول پایه‌های (جک) چند لینک (حداقل لینک ممکن) متفاوت از وضعیت ابتدایی خود باشند. در این صورت حرکت از نقطه شروع به نقطه مقصد تنها با تغییر طول پایه‌های چند لینک به وقوع خواهد پیوست.

۴-۲- طراحی مسیر کمترین سوئیچینگ

با توجه به توضیحات داده شده و با استفاده از روش بهینه‌سازی پرواز پرندگان به توضیح کامل روش به‌کار رفته، قیودات مسئله بهینه‌سازی و تکنیک‌های به‌کار رفته در بهینه‌سازی می‌پردازیم.

همان‌طور که اشاره شد، طراحی مسیر با این تابع هزینه منوط به حل سینماتیک معکوس در نقطه ابتدایی و نقطه مقصد می‌باشد. برای سادگی می‌توان فرض کرد که بازو در شروع حرکت در وضعیت کاملا عمودی قرار داشته باشد. یعنی طول تمامی پایه‌ها برابر میانگین مقدار حداکثر و حداقل خود باشند، به عبارتی $l_{nom}=\frac{l_{\min}+l_{\max}}{2}$. چنانچه این فرض را انجام ندهیم، باید در نقطه شروع حرکت، موقعیت مجری نهایی را دریافت کنیم و با حل سینماتیک معکوس، طول پایه‌ها را به‌دست آوریم که این مسئله محدودیتی را در روش ارائه‌شده در این بخش ایجاد نمی‌کند؛ زیرا حل سینماتیک معکوس به روش پرواز پرندگان به راحتی صورت می‌گیرد.

جهت یافتن حداقل سوئیچ‌ها با استفاده از روش بهینه‌سازی، باید سینماتیک معکوس را در نقطه‌ی انتهایی به گونه‌ای حل کرد که حتی‌الامکان اکثریت لینک‌ها بدون تغییر نسبت به وضعیت ابتدایی خود باقی بمانند. برای این کار باید تابع تشویقی‌ای تعریف شود که به ازای ثابت‌ماندن طول پایه‌های یک لینک به ارزندگی آن انتخاب بیفزاید. در کنار این تابع تشویقی، باید توابع جریمه دیگری نیز قرار داد تا قیود بهینه‌سازی همواره ارضا شوند.

از آنجایی که متغیرهای بهینه‌سازی همان طول پایه‌ها (جک‌ها) می‌باشند، در الگوریتم پرواز پرندگان ذرات را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$X_i=\left[l_1^1,l_1^2,\ldots,l_1^N,\ l_2^1,l_2^2,\ldots,l_2^N\right] \qquad (۱۲)$$

که در آن l_1^i طول پایه اول لینک i ام و l_2^i طول پایه دوم آن لینک می‌باشد. طول لینک سوم با استفاده از رابطه قیدی (۱) به‌دست می‌آید. همان‌طوری که اشاره شد، طول پایه‌ها دارای محدوده بیشینه و کمینه مطابق رابطه (۲) می‌باشند که در طراحی مسیر لحاظ شده‌اند.

برای ارضای این قیود در الگوریتم بهینه‌سازی پرواز پرندگان، سرعت ذره‌ای که از این قیدها تجاوز کرده را برابر صفر قرار می‌دهیم، با این کار تمایل ذره را به تغییر در این جهت از بین می‌بریم. به عبارت دیگر ترم سرعت را در تکرار بعدی حذف می‌کنیم تا تجاوز از آن قید انجام نشود. برای رسیدن به پاسخ مطلوب، علاوه بر صفرکردن سرعت‌ها در شرایط خروج از قیدهای تعریف شده، تکنیک دومی که به‌کار برده شده است گردکردن طول پایه‌هاست. به این معنا که هر گاه طول پایه ها از $l_{\max}$ بیشتر شود، مقدار طول پایه را برابر $l_{\max}$ قرار می‌دهیم و هر گاه طولش از مقدار مینیمم کمتر شود، آن را برابر $l_{\min}$ می‌گذاریم.

توابع تشویقی به ازای ثابت‌ماندن طول پایه‌ها نسبت به حالت اولیه به صورت زیر در تابع هدف اعمال می‌شوند:

$$\text{Cost}=\sqrt{(X_B-X_{final})^2+(Y_B-Y_{final})^2+(Z_B-Z_{final})^2}-K\times C \qquad (۱۳)$$

که در آن (X_B,Y_B,Z_B) موقعیت نقطه مقصد است و $(X_{final},Y_{final},Z_{final})$ موقعیت مجری نهایی در انتهای حرکت خود است. عدد K تعداد لینک‌هایی است که طول هر دو پایه آن‌ها نسبت به حالت اولیه (حالت عمودی بازو) ثابت مانده است. به عبارت دیگر، در طول حرکت از نقطه شروع به سمت نقطه انتهایی، هیچ نیازی به بازکردن قفل آن‌ها نیست. عدد C همان عدد تشویقی است که به این میزان از تابع هدف کاسته می‌شود. آنچه قابل توجه است اینکه در این تابع تشویقی، با دو

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]

برابرشدن تعداد لینک‌های ثابت، مقدار تشویق نیز دو برابر می‌شود، یعنی به صورت خطی عمل می‌کند در حالی که می‌توان توابع تشویقی را به شکل‌های دیگر نظیر گوسی، سیگموئیدی و یا نمایی نیز متصور شد.

از آنجایی الگوریتم پرواز پرندگان یک الگوریتم بهینه‌سازی بر مبنای اعداد اتفاقی می‌باشد، احتمال اینکه طول هر دو پایه یک لینک دقیقا برابر مقدار اولیه خود یعنی $l_{nom} = \frac{l_{\min} + l_{\max}}{2}$ بمانند بسیار کم خواهد بود. بنابراین، بعد از به‌روزشدن ذرات در الگوریتم بهینه‌سازی، مقادیری که اختلاف اندکی با l_{nom} دارند را گرد می‌کنیم. این عملیات ریاضی را می‌توان به شکل زیر نشان داد:

$$\begin{aligned} &if \quad \left|l_1^i - l_{nom}\right| \le \varepsilon, \ then \ l_1^i = l_{nom} \\ &if \quad \left|l_2^i - l_{nom}\right| \le \varepsilon, \ then \ l_2^i = l_{nom} \end{aligned} \qquad (۱۳)$$

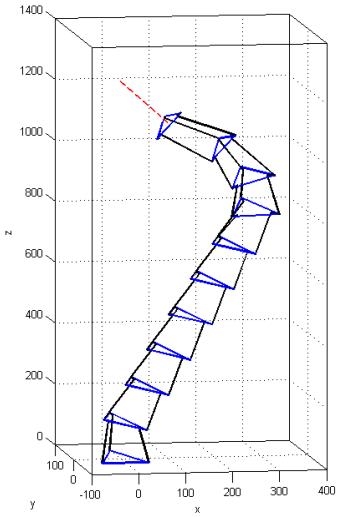
که در آن ε عدد مثبت دلخواه کوچکی است.

۴-۳- شبیه سازی و نتایج

برای اجرای الگوریتم پرواز پرندگان، جمعیتی شامل ۳۰ ذره را انتخاب کرده و معیار پایان‌پذیری الگوریتم را رسیدن به حداکثر ۴۰ تکرار قرار می‌دهیم. ضرائب b_1 و b_2 در رابطه به‌روز رسانی (۱۱) برابر ۲ قرار داده شده و یک تابع کاهنده خطی برای ضریب سرعت w انتخاب شده است. مقادیر حداکثر و حداقل w به ترتیب با سعی و خطا برابر ۰/۹۵ و ۰/۵ قرار داده شده‌اند.

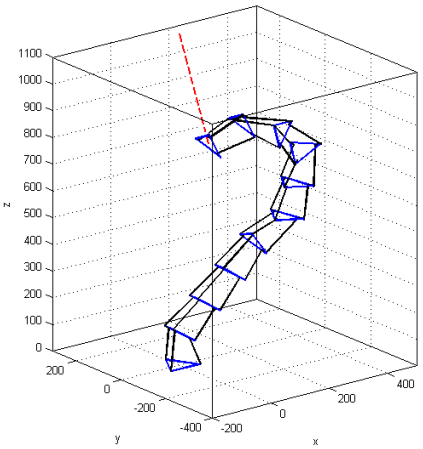
با توجه به اندازه پارمترهای هندسی بازو در جدول ۱، حداکثر سرعت ذرات برابر ۶ میلی‌متر انتخاب شده است. با این انتخاب، امکان تغییر بیش از ۶ میلی‌متر برای طول پایه‌ها در یک تکرار وجود نخواهد داشت. کاهش بیش از حد این پارامتر، کاهش سرعت بهینه‌سازی و افزایش بیش از حد آن واگراشدن الگوریتم را درپی خواهد داشت. مقدار ε در رابطه (۱۳) را برابر ۶ میلی‌متر و اندازه C را برابر ۵ انتخاب می‌کنیم. شایان ذکر است که در یافتن سینماتیک معکوس بازو دو خواسته مد نظر قرار گرفته شد؛ یکی رسیدن به نقطه B و دیگری افزایش تعداد لینک‌های بدون تغییر طول. حال اگر میزان تشویق (C) افزایش داده شود، احتمال رسیدن به نقطه هدف (B) کاهش می‌یابد پس باید با انتخاب صحیح میزان تشویق، همواره تعادلی بین این دو خواسته برقرار شود.

در شکل ۷ طراحی مسیر با کمترین سوئیچ برای نقطه هدف به مختصات (۱۱۰۰، ۰، ۱۰۰) نشان داده شده است. با اجرای الگوریتم بهینه‌سازی با ملاحظات ذکرشده در بخش‌های قبلی، این حرکت تنها با بازکردن قفل ۳ لینک انجام شده و باقی لینک‌ها در وضعیت ابتدایی خود مانده‌اند.



شکل ۷ وضعیت نهایی بازو در نقطه هدف (۱۱۰۰، ۰، ۱۰۰) با بازکردن قفل ۳ لینک

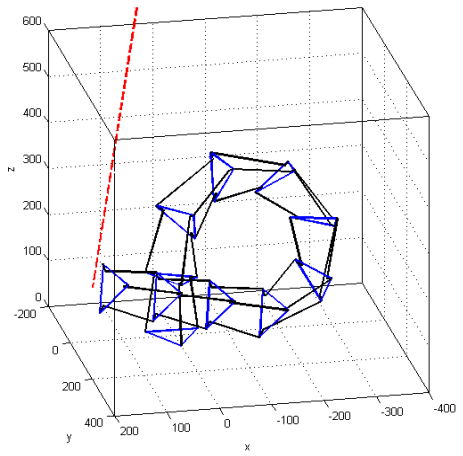
خط‌چین نشان داده شده در شکل خطی است که نقطه شروع حرکت را به نقطه هدف متصل می‌کند. شکل ۸ طراحی مسیر برای نقطه هدف (۸۰۰، ۰، ۱۰۰) را نشان می‌دهد. در این حرکت، تنها قفل ۶ لینک باز شده است.



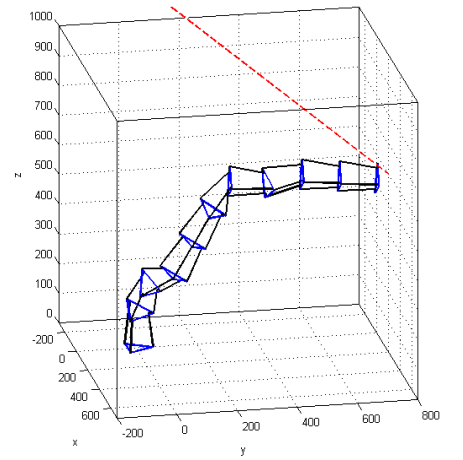
شکل ۸ وضعیت نهایی بازو در نقطه هدف (۸۰۰، ۰، ۱۰۰) با بازکردن قفل ۶ لینک

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]

در شکل ۹ و ۱۰ طراحی مسیر کمترین سوئیچ برای رسیدن به نقاط (۲۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰) و (۶۰۰، ۸۰۰، ۲۰۰) نشان داده شده‌اند. جابجایی بازو از نقطه شروع به سمت نقطه هدف با ۳ لینک بدون حرکت (قفل‌شده) انجام شده است.



شکل ۹ وضعیت نهایی بازو در نقطه هدف (۲۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰) با بازکردن قفل ۴ لینک

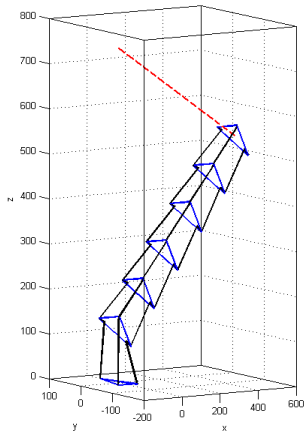


شکل ۱۰ وضعیت نهایی بازو در نقطه هدف (۶۰۰، ۸۰۰، ۲۰۰) با بازکردن قفل ۶ لینک

۴-۴- صحه‌گذاری بر نتایج

روش‌هایبهینه‌سازی مبتنیبر حیات طبیعی[1] عموما اثبات ریاضی برای رسیدن به پاسخ بهینه مطلق ندارند. در روش‌هایی نظیر پرواز پرندگان، الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی مورچگان برخلاف روش آنیلینگ هیچ تضمینی مبنی بر رسیدن به پاسخ مطلق ارائه نمی‌دهند. از این رو در هر مسئله باید راه‌حلی ابتکاری برای صحه‌گذاری نتایج به‌دست آمده از این الگوریتم‌ها پیدا کرد.

در طراحی مسیر کمترین سوئیچینگ برای صحه‌گذاری بر نتایج، طول پایه‌های تعداد معینی از لینک‌ها را به صورت اتفاقی تغییر می‌دهیم تا بازو در وضعیت مشخصی قرار گیرد. سپس موقعیت مجری نهایی بازو را ذخیره کرده و آن را به‌عنوان نقطه هدف به الگوریتم طراحی مسیر با مینیمم سوئیچ براساس پرواز پرندگان می‌دهیم تا مشخص شود که آیا این روش توانایی پیداکردن لینک‌های آزادشده و تغییر طول پایه‌های مربوط به آن را دارد یا خیر. اگرچه این آزمایش به طور قطع نمی‌تواند چیزی را ثابت کند، اما عملکرد کلی الگوریتم را نشان خواهد داد. این آزمایش برای چند نمونه متفاوت اجرا و نتایج بررسی شدند. در این آزمایش‌ها ترجیحا قفل یک یا دو لینک باز شده است، زیرا بازکردن تعداد بیشتر احتمال وجود پاسخ‌های صحیح دیگر را افزایش می‌دهد. در اینجا یک نمونه از تست‌ها توضیح داده می‌شود. لینک ۱ را باز کرده و طول پایه‌های اول و دوم آن را به ترتیب برابر ۱۴۵ و ۱۰۰ میلی‌متر تغییر می‌دهیم. مجری نهایی به مختصات (۴۵۹، ۱۰۵/۹-، ۴۳۱/۱) میلی‌متر می‌رسد. بعد از اجرای الگوریتم بهینه‌سازی با این نقطه هدف، بعد از ۴۰ تکرار، الگوریتم پاسخی را می‌یابد که طول پایه‌های لینک ۱ به ترتیب ۱۴۵/۰۳ و ۱۰۰ میلی‌متر است. با این طول پایه‌ها به فاصله ۰/۵۳ میلی‌متری نقطه هدف می‌رسیم که در محدوده دقت شبکه عصبی آموزش داده شده است. دیده می‌شود که الگوریتم توانسته با بازکردن یک لینک به نقطه مورد نظر برسد. شکل ۱۱ تصویر بازوی ۶ لینکی را در وضعیت نهایی نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ وضعیت نهایی بازو زمانی که پایه‌های لینک ۱ برابر ۱۴۵ و ۱۰۰ میلی‌متر قرار داده شوند (آزمایش اول)

1. Artificial life

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]

در تست دوم، قفل لینک‌های ۱ و ۲ باز شده و طول پایه‌های آن مطابق ردیف دوم جدول ۳ تنظیم شده است و در تست سوم تنها قفل لینک سوم باز شده است. در ستون آخر جدول دقت رسیدن به نقطه هدف با استفاده از الگوریتم ارائه‌شده نشان داده شده است.

جدول ۳ اطلاعات مربوط به تغییر طول پایه‌ها در آزمایش‌های سه‌گانه

آزمایش‌ها	l_1	l_2	قفل اول	l_1	l_2	قفل دوم	دقت
مقادیر آزمایشی	۱۴۵	۱۰۰	۱	ندارد			۰/۵۳
نتایج	۱۴۵/۱	۱۰۰					
مقادیر آزمایشی	۱۲۴/۶	۱۲۶/۹	۱	۱۳۳	۱۴۸/۱	۲	۴/۱۸
نتایج	۱۱۸/۸	۱۳۳/۴		۱۳۳	۱۵۰		
مقادیر آزمایشی	۱۱۴/۸	۱۱۳/۶	۳	ندارد			۰/۰۶
نتایج	۱۱۴/۸	۱۱۳/۶					

۵- مسئله کمترین زمان

۵-۱- مقدمه

به طور کلی یافتن مسیر بهینه زمانی از آن جهت دارای اهمیت است که در بسیاری از ربات‌های صنعتی جهت افزایش بهره‌وری باید وظایف مختلفی در کمترین زمان توسط ربات صورت پذیرد. به طور خاص در بازوی مارگون کابلی قفل‌شونده، طراحی مسیر کمترین زمان یکی از زمینه‌های جالب در طراحی مسیر می‌باشد. طراحی مسیر بهینه زمانی می‌تواند با لحاظ‌کردن دینامیک مسئله و یا بدون آن صورت پذیرد. در این مقاله طراحی مسیر سینماتیکی بازو مد نظر می‌باشد.

برای داشتن حرکت کمینه زمانی می‌توان از تئوری بنگ-بنگ[1] استفاده کرد[۲۱]. بر اساس این تئوری، کمترین زمان حرکت وقتی حاصل می‌شود که عملگرها همواره در حد اشباع شتاب خود عمل کنند. بدون پرداختن به اثبات این موضوع به طراحی مسیر بر این اساس می‌پردازیم.

براساس این تئوری حرکت هر مفصل در بازه زمانی $[0 \quad t_f]$ به دو بخش تقسیم می‌شود که حرکت مفصل در بخش اول با شتاب $+\alpha$ و در بخش دوم با شتاب $-\alpha$ حرکت داده می‌شود.

1. bang-bang

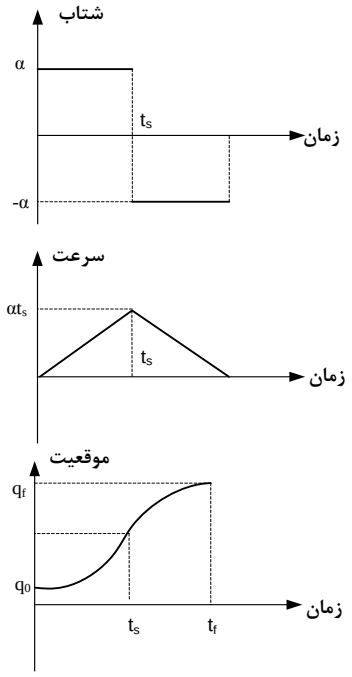
فرض می‌کنیم تغییر شتاب در وسط بازه اتفاق افتاده باشد، یعنی نقطه تغییر شتاب برابر $t_s = \frac{t_f}{2}$ باشد و سرعت حرکت در ابتدا و انتهای بازه برابر صفر باشد. بدین ترتیب برای بخش اول حرکت یک تابع درجه دوم به صورت زیر داریم:

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$$
$$q(0) = q_0,\ \dot{q}(0) = 0,\ \dot{q}(t_s) = \alpha t_s$$
$$\rightarrow q(t) = q_0 + \frac{1}{2}\alpha t^2 \qquad (۱۴)$$

که در آن q مشخصه مفصل، t_f انتهای بازه زمانی و t_s وسط بازه زمانی است. معادله حرکت بخش دوم به صورت زیر خواهد شد:

$$q(t) = a_4 + a_5 t + a_6 t^2$$
$$q(t_f) = q_f,\ \dot{q}(t_f) = 0,\ \dot{q}(t_s) = \alpha t_s$$
$$\rightarrow q(t) = q_f - \frac{1}{2}\alpha t_f^{\,2} + \alpha t_f t - \frac{1}{2}\alpha t^2 \qquad (۱۵)$$

نمودار تغییرات شتاب، سرعت و موقعیت هر مفصل در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲ نمودار تغییرات شتاب، سرعت و موقعیت هر مفصل برای حرکت بهینه زمانی

حال اگر در معادله اول $q(t_s) = \frac{q_0 + q_f}{2}$ را قرار دهیم، داریم:

$$t_f = 2\sqrt{\frac{q_f - q_0}{\alpha}} \qquad (۱۶)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]

براساس این معادله این طور می‌توان استدلال کرد که برای کم‌کردن زمان حرکت باید اندازه $q_f - q_0$ را حداقل کرد، زیرا α در طراحی سینماتیکی مقداری ثابت است که بسته به مشخصات موتور باید تعیین شود. در بازوی مارگون کابلی، مشخصه هر مفصل (q) و طول پایه‌ها (l_1 و l_2) می‌باشد. بنابراین اگر یک بازوی N لینکی ($2N$ درجه آزادی) را درنظر بگیریم و بخواهیم حرکت بازو از نقطه شروع به نقطه هدف، تنها با باز و بسته‌کردن N لینک بدون تکرار و در کمترین زمان انجام شود، آنگاه باید مجموع قدر مطلق تغییرات طول پایه‌ها حداقل شود؛ به عبارت دیگر تابع تبدیل زیر باید مینیمم شود.

$$f_{time} = \sum_{i=1}^{N} \left(\left|\Delta l_1^i\right| + \left|\Delta l_2^i\right| \right)$$
$$\Delta l_1^i = l_{1\,final}^i - l_{1\,start}^i, \quad \Delta l_2^i = l_{2\,final}^i - l_{2\,start}^i \qquad (۱۷)$$

که در آن Δl_1^i تغییر طول پایه اول لینک i ام و Δl_2^i تغییر طول پایه دوم آن لینک است. علت اینکه تغییر طول دو پایه را با هم جمع می‌کنیم آن است که به دلیل ویژگی‌های ساختاری بازوی مورد نظر ممکن است تغییر طول پایه‌ها به طور همزمان انجام نشود. این موضوع به جهت تغییر طول پایه‌ها نیز بستگی دارد که در اینجا راجع به آن بحث می‌شود. همان‌طور که در بخش‌های گذشته نیز توضیح داده شده است، در هر لینک این بازو یک مکانیزم قفل هیدرولیکی وجود دارد. اگر برای ایجاد یک حرکت مشخص نیاز به کوتاه‌کردن طول پایه‌ها باشد، آنگاه با بازکردن هر سه سولونوئید و کشیدن کابل‌ها می‌توان به مطلوب دست یافت. ولی چنانچه لازم باشد طول پایه ۱ یا ۲ و یا هر دوی آن‌ها افزایش یابند، باید مطابق دستور زیر عمل کرد.

جدول ۴ نحوه باز و بسته‌کردن سولونوئیدها و کشش کابل‌ها برای حالت‌های مختلف

حرکت مطلوب پایه‌ها		سولونوئید ۱	سولونوئید ۲	سولونوئید ۳	کابل‌ها
پایه ۱	پایه ۲	✓	×	✓	کشش ۱
↓	↓	✓	✓	×	کشش ۲
پایه ۱	پایه ۲	✓	×	✓	کشش ۱
↓	↑	✓	✓	×	کشش ۳
پایه ۱	پایه ۲	✓	×	✓	کشش ۳
↑	↓	✓	✓	×	کشش ۲
پایه ۱	پایه ۲	✓	×	✓	کشش ۳
↑	↑	✓	✓	×	کشش ۳

اگر بخواهیم طول پایه ۱ کاهش و طول پایه ۲ افزایش یابد (ردیف دوم جدول ۴)، ابتدا سولونوئید ۱ و ۳ را باز کرده و با کشیدن کابل ۱ و آزادکردن کابل ۳ طول مورد نظر را در پایه ۱ ایجاد می‌کنیم. سپس سولونوئید ۲ و ۳ را باز می‌کنیم و با کشش کابل ۳ و آزادکردن کابل ۲ به نقطه مورد نظر می‌رسیم. جدول ۴ نحوه باز و بسته‌کردن سولونوئیدها و کشش کابل‌ها را نشان می‌دهد. علامت ✓ نشان‌دهنده بازبودن یک سوئیچ و علامت × بسته بودن آن سوئیچ را نشان می‌دهد.

۵-۲- طراحی مسیر بهینه زمانی

همان‌طور که قبلا نیز توضیح داده شده است، یافتن مسیر بهینه زمانی منوط به حل سینماتیک معکوس بازو در نقطه انتهایی مسیر می‌باشد. با به‌کار بردن روش بهینه‌سازی پرواز پرندگان و لحاظ‌کردن رابطه (۱۷)، مسیر بهینه زمانی را پیدا می‌کنیم.

تابع هزینه مسئله از دو بخش تشکیل یافته است. به عبارت دیگر طراحی مسیر بهینه زمانی منجر به یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه شده است. این تابع هدف در رابطه زیر آمده است:

$$f_{\text{end}} = \sqrt{(X_B - X_{\text{final}})^2 + (Y_B - Y_{\text{final}})^2 + (Z_B - Z_{\text{final}})^2}$$
$$\text{Cost Fun.} = c \times f_{\text{end}} + (1-c) \times f_{\text{time}} \qquad (۱۸)$$

بخش اول تابع هدف، فاصله مجری نهایی بازو را از نقطه انتهایی مطلوب مشخص می‌کند. شایان ذکر است که نقطه شروع حرکت بازو به طور پیش‌فرض و به صورت کاملا عمودی فرض شده است. بخش دوم تابع هدف مربوط به زمان حرکت می‌شود. تابع f_{time} در رابطه (۱۷) آمده است و توضیحات مربوط به آن در قسمت قبل داده شده است.

ذرات را می‌توان مشابه با بخش قبل و مطابق رابطه (۱۲) تعریف کرد. قیدهای مسئله نیز شامل محدوده تغییرات طول پایه‌ها و رابطه قیدی بین طول پایه‌ها می‌باشد که به ترتیب مطابق رابطه (۲) و رابطه (۱) تعریف می‌شوند. مجددا تاکید می‌شود که در طراحی مسیر بهینه زمانی نیز تعداد N سوئیچ غیرتکراری را برای یک بازوی N لینکی درنظر می‌گیریم.

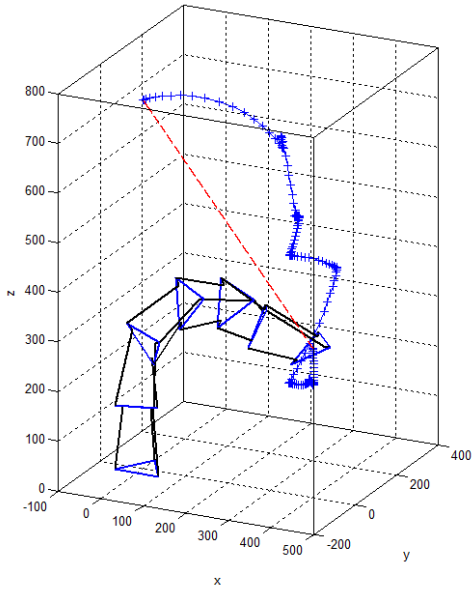
۵-۳- نتایج طراحی مسیر بهینه زمانی

بهینه‌سازی این مسئله با استفاده از روش پرواز پرندگان و با استفاده از ۴۰ ذره انجام شده است. نتایج بهینه‌سازی برای یک

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

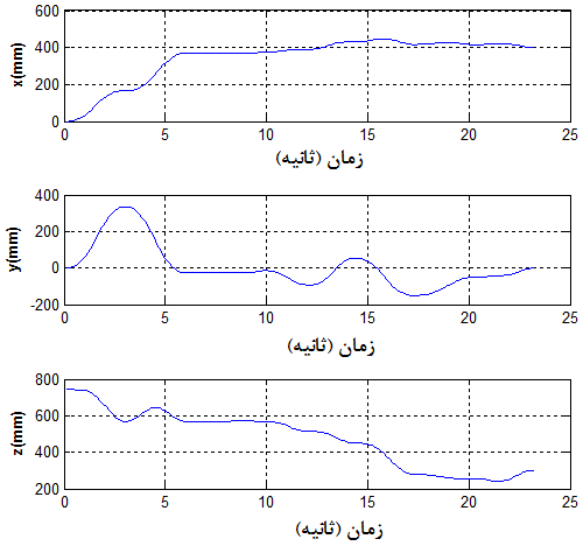
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]

بازوی ۱۲ درجه آزادی بعد از ۳۰ تکرار گزارش شده‌اند. ضریب w و سایر پارامترها، مطابق آنچه در طراحی مسیر کمترین سوئیچینگ گفته شد، تنظیم شده‌اند. ضریب c در فرمول (۱۸) برای این نقطه هدف برابر ۰/۸ انتخاب شده است. شکل ۱۳ شماتیک بازو در حین حرکت از نقطه شروع به سمت نقطه هدف را نشان می‌دهد. منحنی ستاره‌ای مسیر حرکت بازو را برای ترتیب خاصی از باز و بسته‌کردن قفل‌ها نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که بعد از تعیین سینماتیک معکوس بازو در نقطه انتهایی، طول پایه‌های تمامی لینک‌ها به‌دست می‌آید. اگر این طول پایه‌ها طی ۶ سوئیچ به بازو اعمال شود، مستقل از ترتیب سوئیچ‌ها به نقطه هدف مورد نظر می‌رسیم.

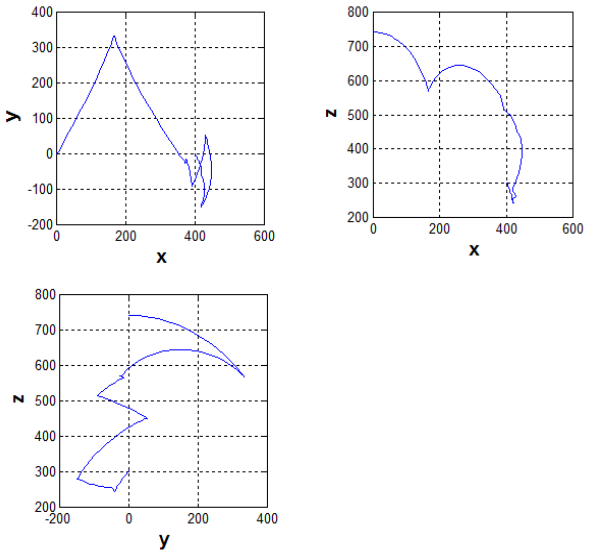


شکل ۱۳ شماتیک بازو در وضعیت نهایی و مسیر حرکت بازو از نقطه شروع به سمت نقطه هدف (۳۰۰، ۰، ۴۰۰)

شکل ۱۴ نمودار تغییرات مختصه‌های x، y و z مجری نهایی را برحسب زمان نشان می‌دهند. شکل ۱۵ مسیر حرکت مجری نهایی در صفحات xy، xz و yz را نشان می‌دهد. البته این منحنی با تغییر ترتیب سوئیچ‌ها تغییر خواهد کرد. شکل ۱۶ نمودار تغییرات سرعت مجری نهایی در راستاهای x، y و z برحسب زمان را نشان می‌دهد. همان‌طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، بعد از پایان هر بازه حرکتی، سرعت مجری نهایی صفر شده است. علت این امر آن است که پروفیل سرعت پایه‌ها مطابق شکل ۱۲ به صورت مثلثی می‌باشد و سرعت در ابتدا و انتهای بازه حرکتی هر لینک صفر می‌باشد. همچنین زمانی که یک لینک انتخاب می‌شود، ابتدا کابل‌های ۱ و ۳ تغییر داده می‌شود و سپس کابل‌های ۲ و۳ کشیده می‌شوند و به همین علت حرکت بازو دارای ۱۲ بخش است که در ابتدا و انتهای هر کدام، سرعت صفر می‌شود. شکل ۱۷ به وضوح نحوه تغییر طول کابل‌ها را بر حسب زمان نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان مشاهده کرد که در برخی از بازه‌های زمانی طول یک کابل ثابت مانده است و این به دلیل قفل‌بودن سولونوئید مربوط به آن کابل در لینک مورد نظر است.

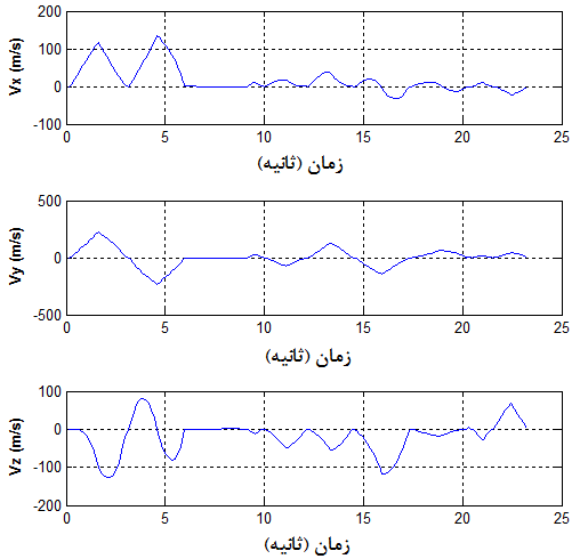


شکل ۱۴ تغییرات مختصه‌های x، y و z مجری نهایی برحسب زمان

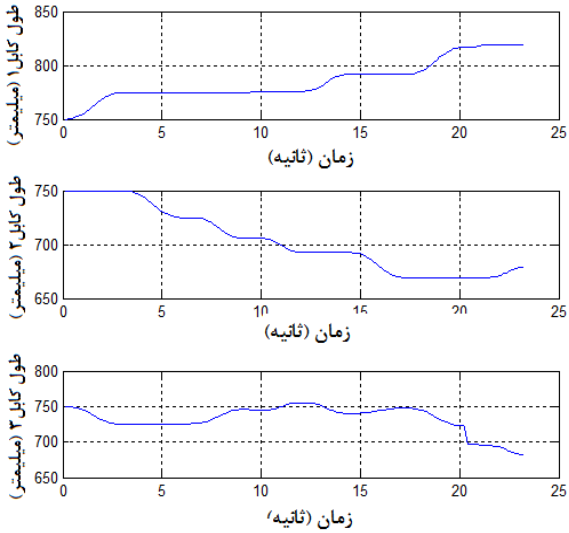


شکل ۱۵ مسیر حرکت مجری نهایی در صفحات xy، xz و yz

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]



شکل ۱۶ تغییرات سرعت مجری نهایی در راستاهای x، y و z برحسب زمان



شکل ۱۷ تغییر طول کابل‌ها بر حسب زمان

۵-۴- صحه‌گذاری بر نتایج

ممکن است این سوال مطرح شود که چه تضمینی وجود دارد که پاسخ‌های به‌دست آمده از نظر زمانی بهینه باشند. در پاسخ به این سوال می‌توان گفت که روش‌های بهینه‌سازی تکاملی تضمینی برای رسیدن به پاسخ بهینه ارائه نمی‌کنند. در این بخش برای اینکه نشان دهیم پاسخ‌های به‌دست آمده نزدیک به بهینه زمانی می‌باشند، نتایج چند نقطه هدف را با نتایج روش شبیه‌سازی انجماد طبیعی مقایسه می‌کنیم. این مقایسه برای نمایش برتری یک روش نسبت به روش دیگر ارائه نشده‌اند، بلکه هدف این بوده که با نشان‌دادن نزدیکی پاسخ‌های به‌دست آمده از دو روش متفاوت، بر درستی آن‌ها صحه گذاشته شود.

با توجه به اینکه تابع هزینه در رابطه (۱۸) متشکل از دو تابع هزینه می‌باشد، با انتخاب یک ضریب وزنی معین، در تکرار های مختلف، مقادیر متفاوتی برای f_{end} و f_{tim} به‌دست می‌آید. اساسا این دو تابع در تعارض با یکدیگرند و کاهش یکی منجر به افزایش دیگری می‌شود. با توجه به این توضیحات چنانچه در پاسخ‌های به‌دست آمده، مقدار f_{end} کمتر از ۵ میلی‌متر باشد (در مرتبه دقت شبکه عصبی آموزش داده شده، خطای کمتر از ۰/۵ درصد) آن پاسخ مورد قبول قرار گرفته شده است. با توضیحات ارائه‌شده می‌توان نتیجه دیگری را نیز به‌دست آورد. از آنجایی که محدوده‌ای از پاسخ‌ها مورد قبول قرار گرفته است، طبیعتا نمی‌توان به هیچ کدام از پاسخ‌هایی که در محدوده قرار گرفته‌اند بهینه مطلق اطلاق کرد.

برای اجرای الگوریتم شبیه‌ساز انجماد از تابع انجماد بولتزمن استفاده شده است و دمای شروع برابر ۱۰۰ درنظر گرفته شده است و معیار پایان الگوریتم رسیدن به یکی از دو عامل زیر می‌باشد.

۱. رسیدن به حداکثر تکرار ۵۰۰۰

۲. باقی‌ماندن تغییرات تابع هدف در محدوده 10^{-6} در طی ۵۰۰ تکرار

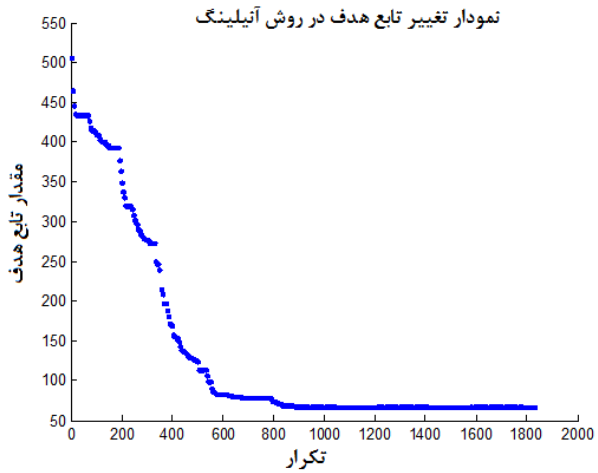
بعد از پایان الگوریتم شبیه‌ساز انجماد از روش بهینه‌سازی جستجوی مستقیم الگویابی[1] استفاده شده است. با انجام این کار نتایج به‌دست آمده بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بهبود پیدا می‌کنند. استفاده از این روش ترکیبی در برخی مقالات [۱۰] دیده شده است. شکل ۱۸ نمودار تغییرات ارزندگی بهترین ذره را در حین بهینه‌سازی برای نقطه هدف (۳۰۰، ۰، ۴۰۰) نشان می‌دهد. در این اجرا، معیار دوم بعد از ۱۸۳۳ تکرار ارضا شده و الگوریتم متوقف شده است.

سه نقطه هدف مختلف برای آزمایش این الگوریتم درنظر گرفته شده است. جدول ۵ نتایج بهینه‌سازی برای این سه نقطه هدف را نشان می‌دهد. این نتایج بعد از ۵ تا ۱۰ بار اجرای الگوریتم‌ها و انتخاب بهترین پاسخ به‌دست آمده‌اند. همان‌طوری که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مقادیر f_{end} همگی کوچک‌تر

1. Pattern search

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]

از ۵ میلی‌متر و قابل قبول هستند، اما مقادیر f_{time} که نشان‌دهنده مجموع قدر مطلق تغییر طول پایه‌هاست اختلاف کمی در دو الگوریتم دارند. این اختلاف اندک نشان‌دهنده آن است که نتایج الگوریتم پرواز پرندگان نزدیک به پاسخ بهینه می‌باشند. از طرف دیگر، با مقایسه نتایج حاصل از دو الگوریتم و تعداد تکرارها می‌توان به توانایی و سرعت روش پرواز پرندگان پی برد.



شکل ۱۸ تغییرات ارزندگی بهترین ذره در حین بهینه‌سازی با روش شبیه‌ساز انجماد طبیعی برای نقطه هدف (۳۰۰، ۰، ۴۰۰)

جدول ۵ نتایج بهینه‌سازی برای سه نقطه هدف به روش پرواز پرندگان و شبیه‌سازی انجماد

توابع هدف/نقطه هدف	شبیه‌سازی انجماد			پرواز پرندگان		
	تکرار	f_{time}	f_{end}	تکرار	f_{time}	f_{end}
(۰، ۴۰۰، ۰)	۳۵۶۴	۱۰۱/۳۹	۰/۷۴	۳۰	۹۵/۶۰	۴/۳۴
(۵۲۰، ۰، ۱۰۰)	۱۴۲۰	۱۱۱/۷۵	۱/۳۷	۳۰	۱۰۲/۷۵	۱/۴۵
(۳۰۰، ۰، ۴۰۰)	۱۸۳۳	۱۵۷/۱۴	۳/۰۷	۴۰	۱۶۱/۳۱	۲/۱۲

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتم بهینه‌سازی پرواز پرندگان جهت طراحی مسیر یک بازوی افزونه به‌کار گرفته شده است. بازوی مارگون مورد مطالعه دارای سیستم قفل بوده و تاکنون تحقیقی در مورد طراحی مسیر این نوع از بازوها صورت نگرفته است. در بخش اول مقاله معادلات سینماتیکی بازو استخراج شده و سینماتیک مستقیم به یک شبکه عصبی آموزش داده شده است. در بخش دوم به طراحی مسیر با هدف کمترین تعداد سوئیچ در حضور قیود سینماتیکی پرداخته شده است و با روش بهینه‌سازی پرواز پرندگان حداقل تعداد سوئیچینگ برای رسیدن به نقطه هدف یافت شده است. در بخش دوم طراحی مسیر کمینه زمانی انجام شده است. نتایج بهینه‌سازی با روش پرواز پرندگان در این بخش با نتایج حاصل از روش شبیه‌سازی انجماد طبیعی مقایسه شده است. بدین ترتیب صحت پاسخ‌های به‌دست آمده تائید شده است.

۷- مراجع

[1] Choset H., Henning W., “A Follow the Leader Approach to Serpentine Robot Motion Planning”, *ASCE Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 12, 1999, pp. 65-73.

[2] Zhang Y., et al., “A Dual Neural Network for Redundancy Resolution of Kinematically Redundant Manipulators Subject to Joint Limits and Joint Velocity Limits”, *Neural Networks, IEEE Transactions on*, Vol. 14, 2003, pp. 658-667.

[3] Da Graca Marcos M., et al., “Trajectory Planning of Redundant Manipulators using Genetic Algorithms”, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 14, 2009, pp. 2858-2869.

[4] Yan B., Yan G. Z., “Minimal Energy Trajectory Planning for Intersection Curve Scanning Redundant Manipulator Based on Genetic Algorithm”, *Xi Tong Gong Cheng Yu Dian Zi Ji Shu/Systems Engineering and Electronics*, Vol. 27, 2005, pp. 896-899.

[5] Mitrovic D., et al., “Optimal Feedback Control for Anthropomorphic Manipulators”, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010)*, Alaska, 2010, pp. 4143-4150.

[6] Liang T. C., Liu J. S., “Tmproved Trajectory Planner for Redundant Manipulators in Constrained Workspace”, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 16, 1999, pp. 339-351.

[7] Sciavicco L., Siciliano B., “A Solution Algorithm to The Inverse Kinematic Problem for Redundant Manipulators”, *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, Vol. 4, 2002, pp. 403-410.

[8] Liu Y., et al., “Research on Parallel Optimization Scheme Between Singularity Avoidance and Minimum Torque for a Redundant Manipulator”, *Harbin Gongye Daxue Xuebao/Journal of Harbin Institute of Technology*, Vol. 38, 2006, pp. 1-3.

[9] Yang J., et al., “Optimal Trajectory Pplanning for Redundant Manipulators Based on Minimum

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]

Jerk", *ASME Conference Proceedings*, Vol. 2, New York City, NY, 2009, pp. 1141-1150..

[10] Ata A., Myo T., "Optimal Point-to-Point Trajectory Tracking of Redundant Manipulators using Generalized Pattern Search", *Arxiv preprint cs/0601063*, 2006,

[11] Cai B., Zhang Y., "Bi-Criteria Optimal Control of Redundant Robot Manipulators using LVI-Based Primal-Dual Neural Network"; *Optimal Control Applications and Methods*, Vol. 31, 2010, pp. 213-229.

[12] Zacharia P. T., Aspragathos N. A., "Optimal Robot Task Scheduling Based on Genetic Algorithms", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 21, 2005, pp. 67-79.

[13] Xidias E. K., et al., "Time-Optimal Task Scheduling for Articulated Manipulators in Environments Cluttered with Obstacles", *Robotica*, Vol. 28, 2010, pp. 427-440.

[14] Nektarios A., Aspragathos N. A., "Optimal Location of a General Position and Orientation End-Effector's Path Relative to Manipulator's Base, Considering Velocity Performance", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 26, 2010, pp. 162-173.

[15] Khoukhi A., et al., "A Hierarchical Neuro-Fuzzy System to Near Optimal-Time Trajectory Planning of Redundant Manipulators", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 21, 2008, pp. 974-984.

[16] Khoukhi A., et al., "Hybrid Neuro-Fuzzy Multi-Objective Trajectory Planning of Redundant Manipulators", *Control and Intelligent Systems*, Vol. 37, 2009, pp. 87-96.

[۱۷] هنرور م.، "طراحی، شبیه‌سازی و کنترل یک بازوی مارگون کابلی با مفاصل قفل‌شونده"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۸۸.

[18] Kennedy J., Eberhart R., "Particle Swarm Optimization", *Proc. IEEE International Conf. on Neural Networks*, 1995, Vol. 4, pp. 1942-1948.

[19] Shi X., et al., "Particle Swarm Optimization-Based Algorithms for TSP and Generalized TSP", *Information Processing Letters*, Vol. 103, 2007, pp. 169-176.

[20] Khanesar M. A., et al.; "A Novel Binary Particle Swarm Optimization", *Mediterranean Conference on Control & Automation*, Athens, 2007, pp. 1-6.

[21] Spong M., *Robot Modelling and Control*, United State of America, JOHN Wilely, 2003, pp. 222-300.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.1.13.8]