



یادداشت تحقیقاتی»

طراحی مسیر بهینه و بدون برخورد بازوی مکانیکی در حضور موانع بیضی گون با استفاده از الگوریتم ژنتیکی

فرید نجفی^{۱*}، محمود کریمی^۲، مصطفی غیور^۳

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

*تهران، صندوق پستی ۴۳۳۴۴-۱۹۹۹۱-۱۹۹۹۱@fnajafi.kntu.ac.ir

چکیده- در این مقاله طراحی مسیر بازوی مکانیکی با چند درجه آزادی در فضای سه بعدی با ارائه روش تحلیلی جدیدی برای پیشگیری از برخورد با موانع بیضی گون انجام شده است. برای تعیین مسیر بازوی مکانیکی و به منظور دستیابی سریع به جوابهای بهینه در فضای کاری پیچیده، نوعی الگوریتم ژنتیک با نرخ جهش فازی معرفی استفاده شده است. از چند جمله‌ای درونیاب اسپیلاین درجه سه برای تخمین هر یک از زوایای مفصلی استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک، تعدادی نقطه میانی را برای انجام انطباق منحنی با چند جمله‌ای درونیاب تعیین می‌کند تا با استفاده از آن بتوان تابع هدف مورد نظر را بهینه کرد. نتایج شبیه‌سازی، کارایی و توانایی روش ارائه شده را نشان می‌دهد.
کلیدواژگان: طراحی مسیر بهینه، بازوی مکانیکی، الگوریتم ژنتیکی، نرخ جهش فازی، شرط عدم برخورد.

Optimal Trajectory Planning and Obstacle Avoidance of a Manipulator in the Presence of Ellipsoidal Obstacles Using Genetic Algorithms

Farid Najafi^{1*}, Mahmood Karimi², Mostafa Ghayour³

1- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology

2- PhD Candidate, Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology

3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology

*P.O. Box 84156-83111 fnajafi@kntu.ac.ir

Abstract - In this paper, an optimal trajectory planning method is presented for robot manipulators with multiple degrees of freedom in 3D space using a new analytical technique for collision avoidance in the presence of ellipsoidal obstacles. To generate the robot's trajectory, a genetic algorithm with a fuzzy mutation rate is introduced to have a quick access to optimal solutions in a complex workspace. A cubic spline interpolation polynomial is applied to approximate trajectories in the joint space. In order to optimize the objective function, the genetic algorithm determines a number of interior points for curve fitting using interpolation polynomials. The performance of the proposed technique is demonstrated by simulations.

Keywords: Optimal Trajectory Planning, Robot Manipulators, Genetic Algorithms, Fuzzy Mutation Rate, Collision-Free Conditions.

۱- مقدمه

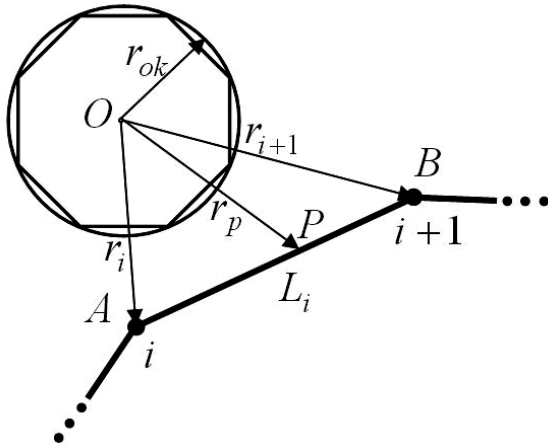
مزایای استفاده از رباتها در محیطهای آلوده و خطرناک و یا مکانهایی با موانع و محدودیتهای خاص، پژوهشگران را به بهبود کارایی رباتها علاقه‌مند ساخته است. در این زمینه، دقت و سرعت بالا و همچنین ظرافت همراه با قابلیت تحرک نیز مورد توجه بوده که به استفاده از افزونگی درجه آزادی در طراحی بازوی مکانیکی انجامیده است. نتایج مثبت استفاده از افزونگی درجه آزادی و پیشرفتهای علمی- فنی در غلبه بر بعضی مشکلات سخت افزاری و نرم افزاری، کاربرد رباتهای ابرافزونه را به‌طور جدی مطرح ساخته است. رباتهای ابرافزونه در راکتورهای هسته‌ای، اعمال جراحی، عملیات اکتشافی در اعماق دریا، امداد رسانی در مکانهای زلزله زده برای نجات جان مجروحان، چیدن میوه‌ها و مانند اینها استفاده می‌شوند. یکی از مسائلی که در سالهای اخیر به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته، طراحی مسیر حرکتی بازوهای مکانیکی با ابر افزونگی درجه آزادی برای جلوگیری از برخورد با موانع است. این کار با پیدا کردن مسیر بهینه بدون برخورد بازوی مکانیکی از حالت اولیه مشخص به وضعیت نهایی حاصل می‌شود.

Saab و Vanputte [۱] الگوریتمی را برای طراحی مسیر با استفاده از نقشه سطح ارائه کرده‌اند. این الگوریتم فضای جستجو را به مناطق دارای مانع و آزاد تقسیم کرده و با استفاده از روش‌های هندسی، مسیری نزدیک به بهینه را پیدا می‌کند. Galicki [۲] روشی را برای طراحی مسیر بدون برخورد ارائه کرده که بر پایه میدانهای پتانسیل و کمینه سازی معیاری انتگرالی استوار است. Li و Ding [۳] راهبردی را بر پایه منطق فازی برای اهرم‌بندیهای چند درجه آزادی برای جلوگیری از برخورد با موانع ایجاد کرده که در آن از نوعی تابع شبه‌فاصله برای اندازه‌گیری فاصله ربات و موانع استفاده شده است. روشی دیگر برای جلوگیری از برخورد بازوهای ابر افزونه، به‌کارگیری شبکه‌های عصبی است. Zhang و Wang [۴] از شبکه عصبی دو لایه به‌منظور حل بی‌درنگ سینماتیک معکوس استفاده کرده‌اند.

به‌تازگی از الگوریتم ژنتیکی برای طراحی مسیر و حرکت رباتها و اهرم‌بندیها استفاده شده است. Yano و Tooda [۵] نوعی الگوریتم ژنتیکی را برای دستیابی به موقعیت و حرکت نهایی اهرم‌بندی با دو درجه آزادی پیشنهاد کرده‌اند که در آن، توابع هدف در فضای مفصلی و دکارتی تعریف و سپس با هم ترکیب شده‌اند. Lavoie و Boudreau [۶] با استفاده از الگوریتم ژنتیکی و با محاسبه لحظه‌به‌لحظه اختلاف بین موقعیتهای و جهت‌گیریهای واقعی و دلخواه و مفاصل، طراحی مسیر بازوهای مکانیکی با چند درجه آزادی را در حضور موانعی با مرزهای خطی انجام داده است. Tian [۷] روش جدیدی را برای طراحی مسیر بازوی مکانیکی صفحه‌ای در حضور چند مانع نقطه ای ارائه کرده است که در آن از نوعی تابع درونیاب هرمیتی برای تقریب زدن مسیر استفاده شده و الگوریتم ژنتیکی برای یافتن مسیر بهینه به‌کار رفته است. در پژوهشی دیگر Roy و Pratihar [۸] با ترکیب مجموعه‌های فازی و بهینه‌سازی ژنتیکی، الگوریتمی را برای حل مسأله طراحی مسیر بدون برخورد ارائه کرده است. در این الگوریتم، کمترین زمان سپری شده به‌عنوان معیار بهینه‌سازی به‌کار رفته و مسیر حرکت به‌صورت مجموعه‌ای از پاره‌خطهای کوچک در نظر گرفته شده است. در [۱۳] طراحی مسیر با استفاده از روش شبه‌معکوس حلقه بسته و الگوریتم ژنتیکی انجام شده است. در [۱۴] نوعی الگوریتم ژنتیکی با چند تابع هدف برای طراحی مسیر مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن برای رباتی با دو درجه آزادی صفحه‌ای ارائه شده است.

در این مقاله شرط عدم برخورد بازوی مکانیکی فضایی با پایه ثابت مطالعه شده است. بدین منظور، با استفاده از الگوریتم ژنتیکی و با ارائه روش جدیدی برای اعمال نرخ جهش، نقاطی میانی در فضای کاری مفصلها جستجو و انتخاب می‌شوند. سپس با به‌کارگیری چند جمله‌ای اسپلاین درجه سه، مسیری هموار بر نقاط به‌دست آمده برازش داده می‌شود تا پیکربندی بازوی مکانیکی در طول مسیر به‌دست آید. در صورت رسیدن مجری نهایی به نقطه هدف، شرط عدم برخورد بازوها با موانع با استفاده از راهکار

$$r_{i+1}^2 - r_i^2 = L_i^2 - 2r_i L_i \cos(\widehat{OAB}) \quad (1)$$



شکل ۱ نمایش هندسی عضو در مقابل مانع

همچنین با در نظر گرفتن نقطه دلخواه P بر روی عضو L_i رابطه زیر به دست می آید:

$$r_p^2 = r_i^2 + L_{AP}^2 - 2r_i L_{AP} \cos(\widehat{OAB}) \quad (2)$$

اگر $\cos(\widehat{OAB}) < 0$ باشد، با استفاده از رابطه (۲) می توان دید که $|r_{i+1}^2 - r_i^2| > L_i^2$ خواهد بود. اگر $r_i > r_{0k}$ و با توجه به روابط (۱) و (۲) و این که $\cos(\widehat{OAB}) < 0$ است، آنگاه به ترتیب r_{i+1} و r_p بزرگتر از r_{0k} خواهد بود. در نتیجه به دلیل این که P نقطه ای دلخواه است پس این شرایط موجب عدم برخورد عضو i ام با مانع k ام می شود.

حالتی که $\cos(\widehat{OAB}) > 0$ و $\cos(\widehat{OBA}) > 0$ باشند، یعنی دو زاویه \widehat{OAB} و \widehat{OBA} هر دو کوچکتر از 90° هستند و شرط عدم برخورد در صورتی ارضا می شود که طول خط عمود وارد بر عضو i ام از مرکز مانع k ام، بزرگتر از شعاع مانع باشد. برای سادگی محاسبه در ارضای این شرط می توان نامساوی زیر را ارائه کرد:

جدیدی بررسی می شود. با تولید نسلهای مختلف در الگوریتم ژنتیکی، حالتی که بازوی مکانیکی بدون برخورد و با کمترین مقدار تابع هدف کل مسیر را طی کند، به عنوان مسیر بهینه پذیرفته می شود.

۲- فرمول بندی مسأله

بازوی مکانیکی را با N درجه آزادی در فضای سه بعدی با عضوهای L_1, L_2, \dots, L_n و مختصات عمومی q_1, q_2, \dots, q_n در نظر بگیرید. بازو باید بدون برخورد با موانع که با ابعادی مختلف در فضای کاری قرار دارند، از حالت اولیه به سمت موقعیت پایانی مجری نهایی حرکت کند. هدف این تحقیق دستیابی به مسیر بهینه ای است که بازوی مکانیکی بدون برخورد با موانع و با کمترین مقدار تابع هدف بتواند آن را ببیماید. برای این منظور فرضهای زیر در نظر گرفته شده است:

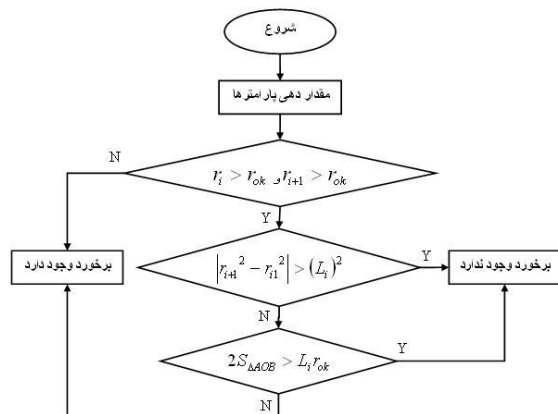
۱. مانع به شکل یک بیضی گون افقی یا قائم و ساکن است.
۲. سرعت حرکت بازوی مکانیکی برای صرف نظر کردن از شتابهای اول و آخر حرکت، کم در نظر گرفته می شود.

۲-۱- شرایط عدم برخورد

برای بررسی برخورد اهرمها با هر یک از موانع و همچنین استفاده بیشتر و مؤثرتر از فضای حرکتی اهرمها، روش تحلیلی جدیدی در این مقاله پیشنهاد شده است که به طور دقیق امکان برخورد را مشخص می سازد و موجب کاهش حجم برنامه نویسی و همچنین افزایش سرعت اجرا شده و به عنوان بخشی از قیود بهینه سازی استفاده می شود. در روش پیشنهادی، هر عضو را در تقابل با یک مانع کروی با شعاع r_{0k} در نظر گرفته و صفحه ای را از این عضو و مرکز کره عبور می دهیم که حاصل آن دایره ای با شعاع r_{0k} است. اکنون شرط عدم برخورد را به جای کره، می توان بین بازو و دایره به دست آمده بررسی کرد. بنابراین با توجه به شکل (۱) می توان نوشت:

بیضی گون به مانع کروی، راهکاری که پیشتر ذکر شد، استفاده می‌شود.

روش مذکور که به صورت الگوریتم شکل (۲) ارائه شده، باید برای هر نقطه مسیر و تمامی حالات میان موانع و عضوها بررسی شود تا یکی از قیود مسأله را که عدم برخورد است، ارضا کند.



شکل ۲ الگوریتم عدم برخورد با مانع دایره‌ای

۲-۲- تولید مسیر

برای رسیدن به نتیجه، علاوه بر جلوگیری از برخورد با موانع باید مسیری را پیدا کرد تا مجری نهایی به صورت هموار بین دو نقطه شروع و پایان حرکت کند. درونیاب اسپلاین درجه سه روشی مناسب با زمان محاسباتی کم برای برازش منحنی بر نقاطی مشخص به صورت هموار و پایدار است. به دلیل پیچیده بودن مسیر حرکت، این روش مزایای مهمی نسبت به چند جمله‌ایهای ساده با درجه بالا دارد [۹].

اگر $S(x)$ نشان‌دهنده چند جمله‌ای اسپلاین درجه سه بر روی n نقطه مجزای x_1, x_2, \dots, x_n باشد، آنگاه $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)$ و $f'(x_1), f'(x_2), \dots, f'(x_n)$ و $f''(x_1), f''(x_2), \dots, f''(x_n)$ به ترتیب برابر با مقدار و مشتقهای اول و دوم در این نقاط است. ایده اصلی این روش، برازش توابع تکه‌ای به شکل زیر است [۱۰]:

$$2S_{\Delta AOB} > r_{0k} L_i \quad (3)$$

در این روابط i و k به ترتیب نمایش‌دهنده i امین عضو و k امین مانع هستند. $S_{\Delta AOB}$ مساحت ایجاد شده توسط مرکز مانع k ام و دو سر عضو i ام است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S_{\Delta AOB} = \sqrt{H(H-L_i)(H-r_i)(H-r_{i+1})} \quad (4)$$

در این رابطه H نصف مجموع اضلاع مثلث است. پس از ارائه الگوریتم عدم برخورد بازوی مکانیکی به مانع کروی، به الگوریتم موانع بیضی گون می‌پردازیم. معادله هر یک از موانع و عضو i ام بازوی مکانیکی را به ترتیب به شکل‌های کلی زیر می‌توان در نظر گرفت:

$$\frac{(x-O_{xk})^2}{a_k^2} + \frac{(y-O_{yk})^2}{b_k^2} + \frac{(z-O_{zk})^2}{c_k^2} = 1 \quad (5)$$

$$Ax + By + Cz = D \quad (6)$$

که در آنها O_{xk}, O_{yk}, O_{zk} مختصات مرکز و a_k, b_k, c_k وترهای بیضی گون k ام است. با اعمال نگاشت $X = (x - O_{xk})/a_k$ ، $Y = (y - O_{yk})/b_k$ و $Z = (z - O_{zk})/c_k$ می‌توان معادلات (۵) و (۶) را در فضای X و Y به دست آورد.

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = 1 \quad (7)$$

$$Aa_k X + Bb_k Y + Cc_k Z = D - AO_{xk} - BO_{yk} - CO_{zk} \quad (8)$$

از معادلات (۷) و (۸) می‌توان دریافت که با استفاده از نگاشت مذکور، موانع بیضی گون در مختصات x, y و z به موانعی کروی در مختصات X, Y, Z تبدیل شده و عضوها با توجه به تغییر موقعیت و جهت گیری‌شان به صورت خطی باقی می‌مانند. حال با تبدیل مانع

می کنند. از این رو یکی دیگر از قیدهای مسأله به صورت زیر نوشته می شود:

(۱۱)

$$\forall i, j \in \begin{cases} i = N - 1, N - 2 \\ j = n_p \end{cases} \Rightarrow (\theta_{ij} - \bar{\theta}_{ij}) = 0$$

در پایان، تابع هدف و همچنین قیدهای بالا به الگوریتم ژنتیکی اعمال می شود تا جوابهای بهینه، که نشان دهنده مسیر مورد نظر است، به دست آید.

۳- الگوریتم ژنتیکی

به علت پیچیده و غیرخطی و گاهی ناپیوسته بودن قیدهای حاکم بر مسأله و همچنین گستردگی فضای طراحی، استفاده از روشهای سنتی بسیار دشوار و در مواردی ناممکن است. لذا کاربرد روشهای نوین بهینه سازی که بتوانند چنین مسائلی را با الهام گرفتن از فرایندهای موجود در طبیعت تحلیل کنند راه حل مناسبی به نظر می رسد.

الگوریتم ژنتیکی نوعی شیوه بهینه سازی احتمالی است که از الگوی تکامل طبیعی اقتباس شده است. در این روش، نخست متغیرهای مسأله بهینه سازی به صورت زیررشته هایی (معمولاً باینری) که مجموعه آنها تقریب ریاضی برای کروموزوم زنده است، توصیف می شوند. سپس به کروموزوم های مختلف، که در واقع نمایشگر طراحی های مختلف هستند، اجازه داده می شود که در شرایطی مشخص به ترکیب و تولید مثل بپردازند. شرایط ترکیب طوری در نظر گرفته می شود که کروموزوم های قویتر امکان بیشتری برای بقا بیابند و کروموزوم های ضعیفتر به تدریج از میان بروند. الگوریتم های ژنتیکی به خلاف روشهای سنتی بهینه سازی، جستجوی خود را به طور همزمان در چندین نقطه دنبال می کنند. مجموعه کروموزوم هایی که در هر تکرار الگوریتم بررسی و ارزیابی می شوند یک نسل نامیده می شوند.

$$S(x) = \begin{cases} s_1 x; & x_1 \leq x < x_2 \\ s_2 x; & x_2 \leq x < x_3 \\ \vdots & \\ s_{n-1} x; & x_{n-1} \leq x < x_n \end{cases} \quad (9)$$

که S_q چند جمله ای درجه سه بوده و به صورت زیر تعریف می شود:

$$s_q(x) = a_q(x - x_q)^3 + b_q(x - x_q)^2 + c_q(x - x_q) + d_q \quad (10)$$

برای محاسبه ضرایب وزنی a_q, b_q, c_q, d_q باید شرایطی برقرار باشد تا بتوان این $(n-1)$ مجهول را به دست آورد. اول آن که تابع $S(x)$ باید بر روی تمامی نقاط برازش شود و دوم این که توابع $S(x), S'(x)$ و $S''(x)$ باید بر روی بازه $[x_1, x_n]$ پیوسته باشند.

با اعمال این شرایط بر روی دسته معادلات (۶)، دو درجه نامعینی باقی می ماند. روش معمول برای برطرف کردن آنها به کارگیری شرط درونیاب اسپلاین طبیعی یعنی $S''(x_i) = S''(x_n) = 0$ است.

بنابراین با استفاده از این روش درونیابی می توان مسیر حرکت را طراحی کرد. بدین منظور، نخست نوعی الگوریتم ژنتیکی دو لایه برای جستجوی نقاط میانی به مسأله اعمال شده و چند جمله ای اسپلاین درجه سه برای ایجاد N منحنی هموار به منظور تعیین زوایای مفصلی استفاده می شود. سپس مسیر به دست آمده به n_p نقطه تقسیم شده و پیکربندی بازوی مکانیکی با توجه به زوایای مفصلی در هر نقطه تعیین می شود. به دلیل مشخص بودن نقطه هدف مجری نهایی، تعیین پیکربندی نهایی که مربوط به نقطه مسیر آخر است فقط با داشتن $N-2$ زاویه مفصلی و با به کارگیری سینماتیک معکوس قابل محاسبه است. در این مرحله پیکربندیهای $N-2$ عضو که فاصله مفصل $N-1$ تا مجری نهایی بیشتر از مجموع دو عضو آخر شوند، جوابهای موهومی برای دو زاویه مفصلی دیگر ایجاد

در آغاز، نسلی با جمعیت اولیه خاص کروموزوم‌ها (رشته‌ها) به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. هر رشته شامل زیررشته‌هایی است که هر یک بیان کننده یکی از متغیرهای مستقل مسأله بوده و می‌تواند هر یک از مقادیر گسسته را در دامنه تعریف متغیر مربوط به صورت تصادفی اختیار کند. به این ترتیب نسلی از کروموزوم‌ها که به صورت تصادفی ایجاد شده تشکیل می‌شوند. سپس به منظور ارزیابی کروموزوم‌ها از تابع هدف استفاده می‌شود. در مسأله بهینه‌سازی ما، افراد مناسب نسل باید کمترین مقدار را برای این تابع ایجاد کنند. تابع هدف با توجه به دیدگاه‌های گوناگونی انتخاب می‌شود. در این مسأله، مربع قدر مطلق مجموع حرکت مختصات عمومی متصل شده به هر یک از عملگرهای 1، 2 تا N از نقطه شروع تا پایان و همچنین معیار مهارت به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. این انتخاب مطابق با کمینه‌سازی حرکات مفاصل برای کاهش انرژی مصرف شده و بیشینه‌سازی مهارت بازوی مکانیکی است [۱۱، ۶]:

$$Fit(pos) = 2 \times \frac{pos - 1}{N_{ind} - 1} \quad (14)$$

در این رابطه N_{ind} تعداد کروموزوم‌های موجود در هر نسل و pos موقعیت هر کروموزوم در جمعیتی است که به صورت نزولی برحسب تابع هدف مرتب شده‌اند. این تابع، عددی غیر منفی را برای هر کروموزوم به دست می‌دهد که نشان‌دهنده شایستگی یا توانایی فردی آن کروموزوم است. اگر کروموزوم‌های نسل حاضر که قیود مسأله را به طور کامل ارضا می‌کنند شرایط بهینه‌گی را نداشته باشند، از میان آنها برآورده‌ترین کروموزوم‌ها انتخاب شده و برای ترکیب و تولید کروموزوم‌های جدید به حوزة تزویج فرستاده می‌شوند. برای تولید نسل بعد از روش نخبه‌گرایی استفاده می‌شود.

زمان بر بودن طراحی مسیر بازوهای مکانیکی فضایی با درجه آزادی بالا در برابر موانع، یکی از مشکلاتی است که مسأله بهینه‌سازی با آن روبه‌رو است. از این رو در این مقاله روشی جدید پیشنهاد شده تا بتوان این مشکل را تا حدی کاهش داد. با زیاد شدن درجه آزادی، هر چه تعداد نسلها بیشتر باشد، رسیدن به حالت بهینه کلی مشکل‌تر می‌شود. بنابراین با توجه به اینکه نرخ جهش در چنین شرایطی بسیار تأثیرگذار است، لذا روش جدید و مؤثری برای اعمال نرخ جهش در الگوریتم ژنتیکی ارائه شده است. در آغاز نرخ جهش به دو شکل به الگوریتم ژنتیکی اعمال شد که یکی مقداری ثابت و دیگری افزایش نرخ جهش با استفاده از منحنیهای درجه اول و بالاتر است. شبیه‌سازیهای کامپیوتری ناموفق بودن این روشها را در تحقیق حاضر نشان دادند. سرانجام، ارائه

که در آن $0 \leq \mu_i \leq 1$ بوده و مجموع μ_i ها برابر یک است. T_w معیار مهارت و T_1, T_2, \dots, T_N به ترتیب مجموع مربعات تغییر مکان/زاویه چرخش هر یک از عملگرهای 1، 2 تا N است. μ_1 تا μ_N ضرایب وزنی مفاصل 1 تا N بوده و μ_w ، ضریب وزنی معیار مهارت، با توجه به مقدار مجموع T_i ها نسبت به معیار مهارت به دست می‌آید. بنابراین می‌توان نوشت:

$$T = \sum_{i=1}^N \mu_i T_i - \mu_w T_w \quad (12)$$

(13)

$$T_1 = \sum_{j=1}^{n_p} (q_{1j} - q_{1(j-1)})^2, T_2 = \sum_{j=1}^{n_p} (q_{2j} - q_{2(j-1)})^2, \dots, T_N = \sum_{j=1}^{n_p} (q_{Nj} - q_{N(j-1)})^2, T_w = \sqrt{\det(J(q) J^T(q))}$$

عملگرهای ترکیب متعددی مانند ترکیب تک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای شناخته شده است. در ترکیب تک نقطه‌ای، یک موقعیت دلخواه بر روی دو کروموزوم در نظر گرفته شده و سپس تمامی ارقام (ژن‌ها)ی سمت راست یا سمت چپ این موقعیت در کروموزومهای والد با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند تا دو کروموزوم جدید، که هر یک بخشی از خصوصیات خود را از یکی از دو والد به ارث برده، تولید شود:

01101 0101 01101 0010
 دو والد ترکیب فرزندان
 10111 0010 10111 0101

معمولاً احتمال انجام عمل ترکیب برای هر زوج کروموزوم بین ۰.۶ تا ۱ در نظر گرفته می‌شود، که به آن نرخ ترکیب گفته می‌شود.

پس از اتمام عمل ترکیب، عملگر جهش بر روی کروموزومها اثر داده می‌شود. این عملگر یک رقم (ژن) از یک کروموزوم را به صورت دلخواه‌ی قاعده انتخاب کرده و محتوای آن را تغییر می‌دهد:

101110101 جهش 101111101

احتمال انجام جهش بر روی هر کروموزوم را نرخ جهش می‌گویند که معمولاً عدد بسیار کوچکی در نظر گرفته می‌شود.

پس از انجام فرایندهای بالا، شرط بهینه بودن بررسی شده و در صورت عدم ارضای آن، روند بیان شده برای نسل‌های بعدی تکرار می‌گردد و در پایان نسلی که شامل برازنده‌ترین کروموزومها (طرحهای بهینه) است، به دست می‌آید.

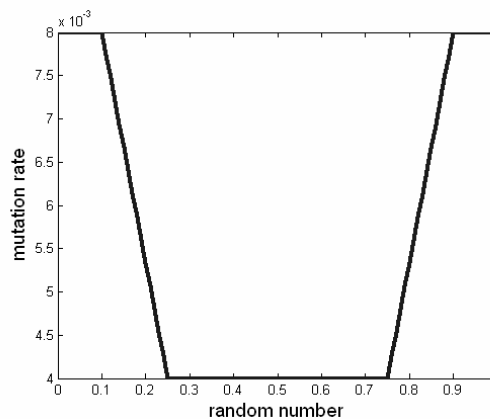
۴- شبیه‌سازی

برای تصدیق الگوریتم ارائه شده، شبیه‌سازی انجام و بررسی شده است. بدین منظور بازوی مکانیکی با چهار درجه آزادی فضایی با مفاصل لولایی و طولهای $L_1 = 1(m)$ ، $L_2 = 1(m)$ ، $L_3 = 0.5(m)$ و $L_4 = 0.25(m)$ در حضور

الگویی بر پایه مقادیر اتفاقی، نتایج بسیار خوبی را در پی داشت. در این الگو از تابع دوزنقه‌ای به شکل زیر استفاده شد.

$$mut = \min \left(\max \left(l + \frac{r-b}{a-b} (u-l), l, \frac{r-c}{d-c} (u-l) + l \right), u \right) \quad (15)$$

mut نرخ جهش و r مقداری اتفاقی در محدوده $[0,1]$ است. u و l حد بالا و پایین نرخ جهش را نشان می‌دهند که با توجه به حداقل و حداکثر نرخ جهش تعیین می‌شوند. ثوابت a, b, c, d بسته به نوع و پیچیدگی مسأله شکل دوزنقه را ایجاد می‌کنند (شکل ۳). نرخ جهش با توجه به رابطه (۱۵) برای ایجاد هر نسل، عددی اتفاقی بین دو مقدار گفته شده است. به دلیل آنکه خود عملگر جهش تصادفی است، لذا نمی‌توان به‌طور دقیق و با توجه به شماره نسل، نرخ مشخصی را به آن اختصاص داد. بنابراین این روش می‌تواند در چند نسل متوالی، نرخهای جهش کاملاً متفاوت اما در محدوده مجاز را اعمال کند.



شکل ۳ تولید نرخ جهش به روش تصادفی

در الگوریتم ژنتیکی به منظور تولید مثل، کروموزومها در قالب زوج‌هایی با یکدیگر ترکیب شده و مانند فرایند وراثت طبیعی، تحت اثر عملگرهایی قرار می‌گیرند که مهمترین آنها عملگر ترکیب و عملگر جهش هستند. عملگر ترکیب بر روی یک زوج کروموزوم مولد عمل کرده و زوج کروموزوم جدیدی را به‌عنوان فرزندان تولید می‌کند.

مانعی با مرزهای بیضی‌گون در نظر گرفته شده که قصد دارد از یک پیکر بندی مشخص به یک نقطه پایانی مجری نهایی برسد. این حالت شبیه حرکت دست انسان است که از یک پیکربندی معین برای برداشتن جسم به‌عنوان هدفی از پیش تعیین شده بدون برخورد با موانع حرکت می‌کند.

با استفاده از زوایای مفصلی به‌دست آمده با الگوریتم ژنتیکی و منحنیهای اسپلاین می‌توان موقعیت مجری نهایی را در هر نقطه از مسیر حرکت به‌دست آورد. معادلات سینماتیک مستقیم اهرم‌بندی با چهار درجه آزادی در حالت کلی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{P}_e = \left(\prod_{q=1}^k R(\theta_q) \right) \vec{P}_e + \vec{P}_b \quad (16)$$

دقت متغیرها: 10
تعداد کروموزومها: 150
بیشترین تعداد نسل: 100
نرخ ترکیب: 0.9
کمترین نرخ جهش: 0.004
میزان زایش: 0.98

همچنین برای عملگر ترکیب از ترکیب دو نقطه‌ای استفاده شده و سازوکار چرخ دوار برای عملگر انتخاب به کار رفته است.

در این رابطه $R(\theta_q)$ ماتریس دوران و \vec{P}_e و \vec{P}_b به ترتیب موقعیت پایه بازوی مکانیکی و مجری نهایی در دستگاه k ام هستند. به دلیل اینکه حل مسئله سینماتیک معکوس بازوهای مکانیکی دارای افزونگی آزادی دشوار بوده و معضل نقاط تکین را نیز دارد، لذا روش کنترل غیر متمرکز برای طراحی زوایای مفصلی به کار رفته است. همان‌طور که پیشتر گفته شد، فقط در نقطه مسیر آخر از روش سینماتیک معکوس برای رسیدن به همگرایی استفاده می‌شود.

زوایای مفصلی و نقطه مسیرهای مربوط به هر یک که به‌عنوان متغیر در الگوریتم ژنتیک جستجو می‌شوند، به شکل زیر هستند:

$$\begin{aligned} \theta_{1-2} &= [\theta_{1-2}^{(initial)} \quad \theta_{1-2}^{(1)} \dots \theta_{1-2}^{(i)} \quad \theta_{1-2}^{(final)}] \\ \theta_{3-4} &= [\theta_{3-4}^{(initial)} \quad \theta_{3-4}^{(1)} \dots \theta_{3-4}^{(i)} \quad * \theta_{3-4}^{(final)}] \\ pp_{1-4} &= [1 \quad pp_{1-4}^{(1)} \dots pp_{1-4}^{(i)} \quad n_p] \end{aligned} \quad (17)$$

۴-۱- نتایج

برای نشان دادن نتایج، بازوی مکانیکی ماهر با چهار درجه آزادی فضایی در حضور مانعی با قطرهای (3, 25, 4) و در محل (1.4, 7, 7) قرار گرفته است. مقادیر اولیه هر یک از زوایای مفصلی این بازوی مکانیکی از عضو اول تا عضو متصل به مجری نهایی به ترتیب برابر است با 0 ، $\pi/6$ ، $-\pi/6$ و $\pi/4$. هدف مسئله حرکت بدون برخورد و رسیدن به موقعیت پایانی در (0, 1, 1.2) است. به‌منظور تعیین مسیر مجری نهایی، چهار نقطه مسیر و پنج زاویه مفصلی در الگوریتم ژنتیکی مطابق رابطه (۱۷) جستجو شده است. تعداد نسل تولید شده برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده است.

شکل ۴ نحوه همگرایی الگوریتم ژنتیکی را تا رسیدن به حد بهینه پایدار نشان می‌دهد که ممکن است در اجراهای مختلف، به‌علت طبیعت الگوریتم ژنتیکی، کمی متفاوت باشد.

در این رابطه i تعداد نقاط میانی است که با توجه به پیچیدگی محیط تعیین می‌شود. pp_i معرف نقطه

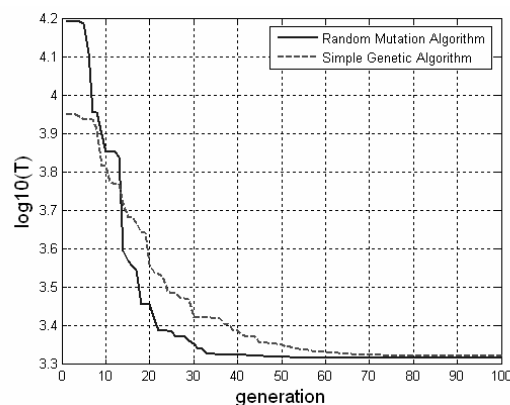
در این شکل لگاریتم تابع برازندگی برحسب تعداد نسل بیان شده تا بتواند محدوده وسیعی از مقادیر را در دامنه کوچکی نمایش دهد. همان طور که دیده می شود با توجه به تعداد متغیرها، نمودار در نقاط پایین همگرا شده که این بیانگر توانمندی خوب الگوریتم به کار رفته می باشد. شکل (۵) زوایای مفصلی θ_1 تا θ_4 را از لحظه شروع تا پایان حرکت برحسب نقاط مسیر نشان می دهد. شکل (۶) نحوه طراحی مسیر بدون برخورد را در فضای اقلیدسی نشان می دهد. این شکل همچنین کارایی الگوریتم جدید هندسی عدم برخورد با موانع بیضوی را در حالت تعداد بالای درجه آزادی نشان می دهد.

۵- نتیجه گیری

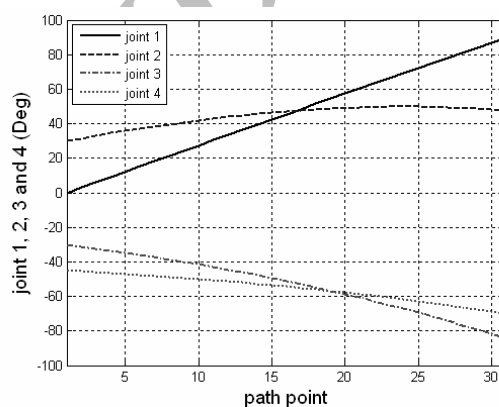
در این تحقیق به طراحی مسیر بازوی مکانیکی n درجه آزادی فضایی در محیطی با تعدادی مانع پرداخته شده است. این طراحی بر پایه کمینه سازی نوعی تابع هزینه از ابتدا تا انتهای حرکت بوده به گونه ای که با موانع برخورد نداشته و تمامی قیدها را ارضا کند. به عنوان نتایج این پژوهش می توان به موارد زیر اشاره کرد: الگوریتم ژنتیکی و راهکار ارائه شده در این مقاله، روش بهینه سازی بسیار مؤثری را برای طراحی مسیر رباتها و بازوهای مکانیکی با درجه آزادی بالا ارائه می کند.

روش جدید ارائه شده برای جلوگیری از برخورد با موانع بیضی گون باعث کاهش حجم برنامه نویسی و زمان اجرا می شود. همچنین این شیوه موجب استفاده بهتری از فضای کاری شده و کارایی بازوی مکانیکی را برای حرکتی بدون برخورد افزایش می دهد.

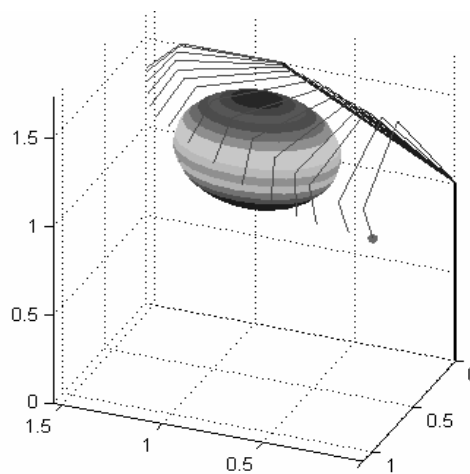
روش درونیایی اسپلاین توانایی ایجاد مسیرهایی هموار و نسبتاً پیچیده را داشته و همچنین موجب ساده تر شدن الگوریتم طراحی مسیر می شود.



شکل ۴ لگاریتم تابع هدف در مقابل تعداد نسل برای نوعی مانع



شکل ۵ زوایای مفصلی برحسب نقاط مسیر برای نوعی مانع



شکل ۶ نحوه حرکت بدون برخورد بازوی مکانیکی

۶- منابع

- [8] Roy, S.S., Pratihar, D.K., "A genetic-fuzzy approach for optimal path-planning of a robotic manipulator among static obstacles," *IE (I) Journal-CP* 84, pp. 15-22, 2003.
- [9] Lancaster, P., Salkauskas, K., "Curve and surface fitting, an introduction," San Diego, CA, USA: Academic Press Inc, 1986.
- [10] Mckinley, S., Levine, M., "Cubic Spline Interpolation," *Math 45: Linear Algebra*, 1999.
- [11] Chen, M.W., Zalzal, A.M.S., "Dynamic modeling and genetic-based trajectory generation for non-holonomic mobile manipulators," *Control Eng. Practice* 5(1), pp. 39-48, 1997.
- [12] Chipperfield, A., Fleming, P., Fonseca, C., "Genetic algorithm toolbox for use with MATLAB," Department of Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield, Version 1.2, 1994.
- [13] Maria da Graça Marcos, J.A. Tenreiro Machado, T.-P. Azevedo-Perdicoulis "Trajectory planning of redundant manipulators using genetic algorithms" *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 14, pp. 2858-2869, 2009.
- [14] E.J. Solteiro Pires, P.B. de Moura Oliveira, J.A. Tenreiro Machado "Manipulator trajectory planning using a MOEA" *Applied Soft Computing*, 7, pp. 659-667, 2007.
- [1] Saab, Y., Vanputte, M., "Shortest path planning on topographical maps," *IEEE Trans System Man Cy A*, 29(1), pp. 139-150, 1999.
- [2] Galicki, M., "Optimal planning of collision-free trajectory of redundant manipulators," *Int. J. of Robotics Research* 11, pp. 549-559, 1992.
- [3] Ding, H., Li, H.X., "Fuzzy avoidance control strategy for redundant manipulators," *Engineering Application of AI* 12, pp. 513-521, 1999.
- [4] Zhang, Y., Wang, J., "Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators using a dual neural network," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B Cybernetics*, Vol. 34, No. 1, February 2004.
- [5] Yano, F., Tooda, Y., "Preferable movement of a multi-joint robot arm using genetic algorithm," In: Part of the SPIE Conf. On Intelligent Robots and Computer Vision 3837, pp. 80-88, 1999.
- [6] Lavoie, M.H., Boudreau, R., "Obstacle avoidance for redundant manipulators using a genetic algorithm," *CCToMM Symposium*, 2001.
- [7] Tian, L., Collins, C., "An effective robot trajectory planning method using a genetic algorithm," *J. of Mechatronics* 14(5), pp. 455-470, 2004.