

ارائه روش جدید برای حل سینماتیک معکوس و بهینه کردن عملکرد بازوهای مکانیکی ماهر با درجه آزادی بالا توسط الگوریتم ژنتیک

سیف دلیل صفایی^۱، فرشاد برازنده^۲

کارشناس ارشد مکترونیک^۱، استادیار دانشگاه امیر کبیر^۲

^۱seif.dalilsafaei@gmail.com, ^۲Fbrazandeh@aut.ac.ir

چکیده: در این مقاله روشی بسیار کارآمد و سریع جهت حل سینماتیک معکوس بازوهای مکانیکی با درجه آزادی بالا ارائه گردیده است. بعلاوه این روش قادر به کمینه کردن مسیر حرکت مفاصل، انرژی مصرفی و گشتاور محرکه ها در حین رسیدن به هدف می باشد. در ضمن، با توجه به قابلیت بالای الگوریتم ژنتیک این روش قادر به برخورد با تعداد زیاد قید می باشد. در انتها نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج روشی که بر مبنای تابع چگالی فضای کاری است مقایسه شده است. از مزایای این روش سرعت بالای حل برای تعداد زیاد درجه آزادی، بهینه نمودن عملکرد ربات، ارضا نمودن تعداد زیاد قید، محدود نبودن روش به نوع مفصل، حرکت بلادرنگ ربات جهت طی نمودن مسیر مشخص، خطای پایین در رسیدن به هدف و قابلیت کنترل جهت رسیدن به هدف می باشند.

واژه‌های کلیدی: بازوی مکانیکی، قید، بهینه سازی و الگوریتم ژنتیک

Abstract: In this Paper, an efficient and quick method for inverse kinematic solution of hyper-redundant manipulators is presented. In addition, it minimizes the joints' displacement, energy consumption, and actuators torque while the end effector reaches the target. Due to the flexibility of the genetic algorithm, it is capable of handling any number of constraints. At the end, the simulation result is compared with a method based on workspace density function. The advantages of new method are fast, optimization of robot function, handling many constraints, independent of joint design, real time, minimum error and ability to control the direction of reaching the target.

Keywords: Hyper redundant manipulator, Constraint, Optimization, Genetic algorithm

در مورد کاربردهای این ربات ها می توان به استفاده در صنعت اتوماسیون [2,3]، استفاده در راکتورهای هسته ای [4]، جراحی [5,6]، بازرسی لوله های نفت و گاز [7]، عملیات شناسایی در محیط جنگی [8]، بازرسی پل های شکسته [5]، ربات امدادگر [9]، عملیات مین یابی [10]، ربات خدمات فضایی ناسا [11] و ساختن ایستگاه های فضایی [12] اشاره کرد.

هدف از کنترل بازوی مکانیکی با درجه آزادی بالا صرفا رسیدن به نقطه ای مشخص و یا حرکت بر روی مسیر معین نمی باشد بلکه در حین طی مسیر می بایست قیدهایی را نیز ارضا نمود. این قیدها را می توان به دو دسته قیدهای نرم که توسط کاربر تعیین می شوند و قیدهای سخت که جز محدودیت های ذاتی این ربات ها می باشند تقسیم بندی کرد. قیدهای سخت شامل محدودیت زاویه دوران مفاصل، محدودیت سرعت مفاصل و محدودیت گشتاور وارده به مفاصل می باشند. قیدهای نرم شامل حداقل کردن اختلاف

۱. مقدمه

به دلیل کوچک بودن درجه آزادی، ربات های صنعتی قادر به دسترسی به بسیاری از نقاط نمی باشند. بازوهای مکانیکی با درجه آزادی بالا به دلیل دارا بودن تعداد زیاد مفصل و درجه آزادی بالا قادرند از مسیرهای متنوعی به یک هدف مشخص دست یابند؛ این ویژگی باعث عبور ربات از مکان های پر پیچ و خم بدون برخورد به مانع می شود. ربات مارگونه، بازوی مکانیکی با درجه آزادی بالا، ربات خرطوم شکل، ربات پیوسته و ربات با درجه آزادی بالا نامهای مختلف این نوع ربات ها می باشند [1]. عنوان ربات با درجه آزادی بالا برای اولین بار توسط چیر یکجیان^۱ مطرح گردید که مناسب ترین نام برای این نوع ربات ها است.

¹ Chirikjian

۲.۲. هدف

هدف اصلی این مقاله حل سینماتیک معکوس و یافتن رشته ای از زوایای مفاصل می باشد به گونه ای که تابع h یا همان فاصله سر ربات تا هدف کمینه گردد.

$$h(x) = \sqrt{(x_e - x_g)^2 + (y_e - y_g)^2 + (z_e - z_g)^2} \quad (1)$$

x_e, y_e, z_e مختصات سر ربات (انتهای موثر) و x_g, y_g, z_g مختصات نقطه هدف می باشند که توسط طراح و با انتخاب نقاطی نزدیک به هم بر روی مسیر تعیین می شوند.

۳.۲. بهینه کردن عملکرد ربات

بهینه کردن عملکرد ربات عبارت است از:

۱- بلادرنگ کردن حرکت ربات: برای این منظور می بایست اختلاف حرکات تمام مفصل که با رابطه زیر نمایش داده شده است کمینه گردد، زیرا کاهش زمان رابطه مستقیم با میزان حرکت های مفاصل دارد.

$$\min \left(\sum_{i=1}^n |(\theta_{i,x} - \theta'_{i,x})| \right) \& \min \left(\sum_{i=1}^n |(\theta_{i,y} - \theta'_{i,y})| \right) \quad (2)$$

در رابطه ۲، $\theta_{i,x}$ زاویه اولیه مفصل i و $\theta'_{i,x}$ زاویه ثانویه مفصل i در راستای چرخش x می باشند. $\theta_{i,y}$ نیز زاویه اولیه مفصل i و $\theta'_{i,y}$ زاویه ثانویه مفصل i در راستای چرخش y می باشند. ربات از موقعیت تعیین شده ای به موقعیت تعیین شده دیگر می رود، محلی که ربات در آن قرار دارد (به لحاظ پیکر بندی ربات) موقعیت اولیه ربات و موقعیت هدف، موقعیت ثانویه نامیده می شود.

۲- بهینه سازی گشتاور: برای این منظور می بایست گشتاور وارده به مفاصل که از رابطه ۳ محاسبه می شود کمینه گردد. با توجه به آنکه سرعت حرکت بسیار پایین می باشد می توان از اثر شتاب صرف نظر کرد. گشتاور در نظر گرفته شده، گشتاور سیستم در موقعیت رسیدن به هدف می باشد. دلیل این مطلب قابل محاسبه نبودن گشتاور وارده به ربات در طی مسیر می باشد. با توجه به آنکه مفاصل ربات با حداقل حرکت ممکن (به منظور بهینه شدن انرژی) به موقعیت مطلوب می رسند، در نظر گرفتن گشتاور مقصد به عنوان پارامتر بهینه سازی فرضی درست می باشد.

$$\|T\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n T_i^2} \quad (3)$$

T_i گشتاور وارده به مفاصل در راستای محورهای x, y (مماسی و عمودی) می باشند. برای محاسبه گشتاور وارده به هر مفصل می بایست گشتاور ناشی از تمام لینک های موثر بر آن مفصل (لینک های قرار گرفته در جلوی آن مفصل تا سر ربات) را محاسبه نمود. رابطه ۴ نحوه محاسبه گشتاور را نشان می دهد.

$$T_i = Z_i \bullet (R_i \times F_i) \quad (4)$$

حرکات مفاصل، حداقل کردن گشتاور وارده به مفاصل، حداقل کردن انرژی وارده به مفاصل، عدم برخورد به مانع و ... می باشد. شکل ۱ نشان دهنده نوعی بازوی مکانیکی با درجه آزادی بالا ساخته شده در آزمایشگاه تحقیقاتی JPL می باشد [9].

در این مقاله ابتدا به بررسی بازو و شرح مسئله پرداخته می شود. سپس روش جدید که شامل ترکیبی از انتخاب بهینه فضای کارمفاصل، حل سینماتیک معکوس توسط الگوریتم ژنتیک و یافتن بهترین جواب به لحاظ بهینه بودن گشتاور می باشد، شرح داده می شود. در انتها به منظور اثبات کار آمد بودن روش جدید نتایج حاصل از شبیه سازی شرح و با نتایج حاصل از یکی از روش های مطرح شده در گذشته که بر مبنای تابع چگالی فضای کاری (روش WSDF) است، مقایسه می گردد.



شکل ۱: بازوی مکانیکی با درجه آزادی بالا [9]

۲. بررسی بازو و شرح مسئله

۱.۲. تعریف مسئله

هدف از این مقاله صرفاً حل سینماتیک معکوس و یافتن زوایای مفاصل جهت رسیدن به هدف مشخص نمی باشد. بلکه ارائه روشی است که ضمن حل سینماتیک معکوس قادر به برخورد با پارامترهای دینامیکی مانند گشتاور و بهینه نمودن عملکرد ربات به لحاظ زمان طی مسیر و انرژی و ارضا نمودن قیدهای وارده به ربات مانند قید گشتاور و قید زاویه دوران مفاصل باشد. فرض می شود که تغییرات سرعت به قدری آرام است که می توان از شتاب صرف نظر کرد.

در ادامه به بررسی کامل اهداف، بهینه نمودن عملکرد ربات و قیدها پرداخته می شود.

Work space density function^۱ (در بیش از ۲۷ مقاله به این روش اشاره شده است.)

برای بهینه شدن انرژی $\Delta\theta_i$ ، T_i می بایست هر دو کمینه گردند. کمینه شدن گشتاور در قسمت قبل شرح داده شد و در این قسمت تنها به کمینه کردن $\Delta\theta_i$ پرداخته می شود. برای کمینه کردن $\Delta\theta_i$ می بایست رابطه 10 بهینه گردد. مفهوم این رابطه این است که ربات با کمترین حرکت به هدف برسد [12].

$$\min(\sum_{i=1}^n (\theta_{i,x} - \theta'_{i,x})^2 + \sum_{i=1}^n (\theta_{i,y} - \theta'_{i,y})^2) \quad (10)$$

۴.۲. ارضا نمودن قیدها

۱- گشتاور: پیکر بندی ربات می بایست به گونه ای باشد که گشتاور وارده به مفاصل از حد مجازی تجاوز نکند (رابطه ۱۱).

$$T_i < T_{\max(i)} \quad i = 1, 2, 3 \quad (11)$$

در رابطه $T_{\max(i)}$ نیز ماکزیمم گشتاور قابل تحمل توسط هر مفصل یا ماکزیمم گشتاور قابل اعمال توسط موتور در راستای مشخص می باشد.

۲- محدودیت زاویه دوران مفصل: برای این منظور می بایست زاویه دوران مفصل از حد مجازی بیشتر نگردد.

$$\theta_{\min(i,j)} < \theta_{i,j} < \theta_{\max(i,j)} \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (12)$$

$\theta_{\min(i,j)}$ و $\theta_{\max(i,j)}$ نیز حداقل و حداکثر زاویه دوران هر مفصل در راستای مشخص می باشند.

۳. روش حل

این بخش به شرح و نحوه اجرای روش پیشنهادی می پردازد. در ابتدا باید گفته شود که روش ارائه شده با روشهای متداول بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک بسیار متفاوت می باشد. دلیل این امر تعداد زیاد قید وارده به ربات می باشد که استفاده از روشهای متداول سبب افزایش زیاد زمان حل و خطا می گردد. مطالبی که در زیر عنوان می شود ترتیب اجرای الگوریتم نیز می باشد.

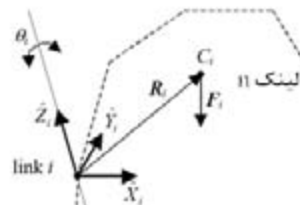
۱.۳. تعیین مسیر

در ابتدا می بایست مسیر حرکت برای ربات تعریف گردد. این کار توسط کاربر و با تعیین نقاط نزدیک به هم روی مسیر که به عنوان هدفهای میانی هستند صورت می پذیرد. وظیفه الگوریتم حداقل کردن فاصله سر ربات تا این نقاط است.

۲.۳. تعیین وضعیت شروع

برای آنکه ربات بتواند حرکت خود را آغاز نماید می بایست یک وضعیت شروع برای آن در نظر گرفت. در این مرحله فرض می شود تمام مدولها در امتداد هم و عمود بر زمین باشند. در نظر گرفتن این وضعیت صرفاً برای سادگی است و می توان هر وضعیت دیگری را برای شروع حرکت انتخاب کرد. عملکرد الگوریتم وابسته به وضعیت شروع نمی باشد. پس از شروع حرکت وضعیت ربات در مرحله قبل به عنوان وضعیت شروع برای رسیدن به موقعیت بعدی در نظر گرفته می شود.

در رابطه بالا Z_i محور دوران، R_i بردار بین مفصل تا مرکز جرم نسبی هر لینک (C_i و F_i نیروی جاذبه ای (رابطه ۵) می باشند.



شکل ۲: نمایش المان های محاسبه گشتاور

$$F_i = \sum_{j=i}^n m_j g \quad (5)$$

در رابطه ۶، m جرم هر لینک می باشد. مرکز جرم نسبی هر لینک نیز از رابطه ۶ بدست می آید.

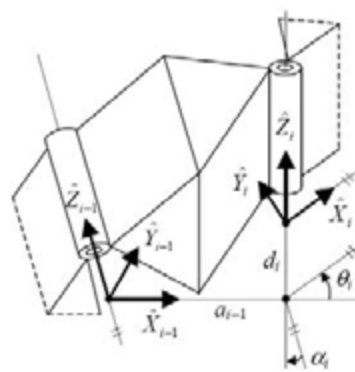
$$C_i = {}^0A_i c'_i \quad (6)$$

در رابطه ۶، C_i ، مرکز جرم هر لینک، و 0A_i ماتریس تبدیلات همگن می باشد که از طریق روابط دناویت هارتبرگ و به شکل زیر محاسبه می گردد.

$${}^0A_i = {}^0A_{i-1} A_{i-1}^i A \quad (7)$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & -\sin \alpha_i d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_i & \cos \theta_i \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & \cos \alpha_i d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

در رابطه بالا a_i طول عمود مشترک، d_i فاصله و θ_i زاویه دوران بین محورهای X_i و X_{i-1} و α_i زاویه پیچش می باشند. در شکل 3 نمایش این پارامترها آمده است.



شکل ۳: نامگذاری دناویت هارتبرگ [12]

۳- کمینه کردن انرژی: هدف از کمینه کردن انرژی کمینه کردن رابطه زیر می باشد.

$$E = T_i \Delta\theta_i \quad (9)$$

شرح داده می شود. متغیرهای الگوریتم ژنتیک زاویه دوران مفاصل می باشند که در این قسمت بازه آنها بدست آمد.

۴.۳. حل سینماتیک معکوس به روش الگوریتم ژنتیک

هدف از این بخش حداقل کردن فاصله بین سر ربات و هدف تعیین شده با در نظر گرفتن قیدهای وارده می باشد که در زیر آمده است،

$$h = \sqrt{(x_c - x_g)^2 + (y_c - y_g)^2 + (z_c - z_g)^2} < R \quad (14a)$$

$$T_i < T_{\max(i)} \quad i = 1, 2, 3 \quad (14b)$$

$$\theta_{\min(i,j)} < \theta_{i,j} < \theta_{\max(i,j)} \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (14c)$$

R همان فاصله سر ربات تا هدف می باشد که با تغییر آن (بزرگ و کوچک کردن) دقت رسیدن به هدف را تغییر داد. بقیه متغیرهای رابطه ۱۴ در روابط ۱، ۱۱ و ۱۲ شرح داده شده است. باید گفته شود هدف از بهینه سازی در این بخش رسیدن به یک مقدار مطلق بهینه برای تابع هدف نمی باشد بلکه تعیین تمام جواب هایی است که فاصله آنها تا هدف از عدد مجازی که توسط طراح تعیین می شود (به عنوان مثال ۲ میلی متر از هدف) کوچکتر باشد. با کوچک و بزرگ کردن این عدد دقت رسیدن به هدف نیز تغییر می کند.

با توجه به تعریف بهینه سازی انجام شده تمامی جواب هایی که شرط کم بودن فاصله را برآورده نمایند توسط الگوریتم ژنتیک استخراج شده و در یک بانک اطلاعاتی برای انجام عملیات بعدی نگهداری می شوند. به عبارت دیگر می توان گفت الگوریتم ژنتیک در یک جواب بهینه محلی متوقف نمی شود بلکه تمام فضای حل را جستجو و به استخراج تمام جواب های ممکن می پردازد.

برای بهینه سازی قیدها توسط الگوریتم ژنتیک و استخراج جواب های مناسب از روش انتخاب جفت برتر [13] واز متغیرهای باینری با طول متغیر استفاده شده است. برای درجه آزادی کم از کروموزومهای با تعداد بیت کم (هیت) دقت مناسب را فراهم می کنند. اما برای درجه آزادی های بالا می بایست تعداد بیت ها افزایش یابد تا دقت مناسب بدست آید.

تنها تفاوت این روش با روش های دیگر در نحوه محاسبه تابع برازندگی و فرایند انتخاب می باشد. برای محاسبه تابع برازندگی حل ها به دودسته حل هایی که تمام قیدها را برآورده می نمایند و حل هایی که حتی یک قید را برآورده نمی کنند تقسیم بندی می شوند. تابع برازندگی گروه اول از رابطه ۱۵ و گروه دوم از رابطه ۱۶ بدست می آید.

$$F(x) = h(x) \quad (15)$$

$$F(x) = f_{\max} + \sum_{j=1}^j g_j(x) \quad (16)$$

در رابطه ۱۵ از $h(x)$ رابطه ۱ محاسبه می شود. همانطور که مشخص است تابع برازندگی این گروه تنها تابع فاصله است. در رابطه ۱۶ $g_j(x)$ تابع قید و f_{\max} حداکثر مقدار تمام جواب های قبل قبول می باشد. برای محاسبه



شکل ۴: نمایش شروع وضعیت حرکت ربات

۳.۳. بهینه کردن عملکرد ربات

در این بخش روش بلادرنگ کردن حرکت ربات و بهینه کردن مصرف انرژی شرح داده می شود و روش بهینه کردن گشتاور وارده به مفاصل ربات در قسمت 3-5 بررسی می گردد. بهینه کردن اختلاف حرکات تمامی مفاصل (رابطه ۲) سبب بهینه شدن رابطه ۱۰ و در نتیجه کمینه شدن انرژی می شود. زیرا در صورتی که اختلاف حرکات تمامی مفاصل بهینه شوند، مجذور مجموع آنها نیز بهینه می گردد. اگر بهینه سازی اختلاف حرکات مفاصل توسط الگوریتم ژنتیک صورت گیرد، می بایست تمام قیدها به عنوان هدف وارد مسئله بهینه سازی گردند که سبب کند شدن الگوریتم ژنتیک خواهد شد. به همین دلیل از روش دیگری تحت عنوان تخصیص فضای کاری به هر مفصل استفاده می شود.

برای این منظور فضایی برای هر مفصل در نظر گرفته می شود که مفصل تنها قادر به دوران به اندازه فضای تعیین شده است. برای محاسبه زاویه دوران مجاز هر مفصل، زمانی جهت حرکت بلادرنگ ربات برای رسیدن به هدف مشخص در نظر گرفته می شود (به عنوان مثال ۰/۲ ثانیه). سپس زاویه دوران مفاصل با استفاده از رابطه زیر بدست می آید.

$$\text{زمان در نظر گرفته شده} * \text{سرعت حرکت} = \quad (13)$$

زاویه دوران مفاصل

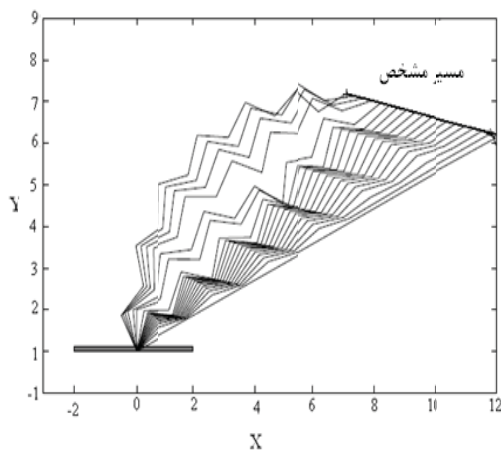
در رابطه ۱۳ سرعت حرکت مفاصل از تقسیم سرعت موتور بر حاصلضرب نسبت تبدیل چرخدنده ها بدست می آید. با توجه به آنکه مفاصل تنها قادر به دوران در محدوده ای هستند که زمان حرکت آنها از زمان تعیین شده تجاوز نکنند (این زمان با توجه به مشخصات سخت افزاری ربات به گونه ای انتخاب می شود که سیستم بلادرنگ حرکت نماید). شرط بلادرنگ بودن برآورده می گردد. مقادیر زوایای بدست آمده برای حرکت بلادرنگ ربات یا $|\theta_{i,j} - \theta_{i,j}'|$ بسیار کوچک می باشد در نتیجه رابطه ۱۰ یا همان انرژی مصرفی نیز مقداری بهینه می شود. باید گفته شود هدف از بهینه کردن انرژی رسیدن به مقداری بهینه نمی باشد بلکه قرار گرفتن در محدوده ای بهینه می باشد. در قسمت بعد حل سینماتیک معکوس با استفاده از الگوریتم ژنتیک

۴. بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی

به منظور اثبات کارآمد بودن روش جدید نتایج بدست آمده در نرم افزار Matlab شبیه سازی شده است، که در زیر به بررسی آنها پرداخته می شود.

۴.۱. بررسی وضعیت حرکت ربات در صفحه

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم، وضعیت های مختلف یک ربات صفحه ای با ۱۳ درجه آزادی در حین طی مسیر مشخص (شکل ۶) نشان داده شده است. مشخصات ربات و پارامترهای الگوریتم ژنتیک در جدول ۱ آمده است. در بقیه موارد نیز مشخصات ربات و الگوریتم مانند جدول ۱ می باشد مگر آنکه صریحا ذکر گردد.

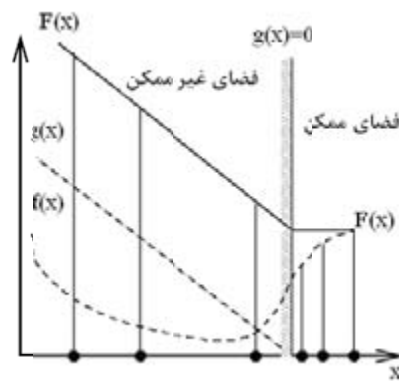


شکل ۶: بررسی نحوه حرکت ربات با ۱۳ درجه آزادی بر روی مسیر مشخص جدول ۱: پارامترهای مهم الگوریتم

وزن هر لینک	۱ کیلو گرم
طول	۱ سانتی متر
میزان دوران مفاصل	۲ درجه
تعداد جواب های اتفاقی اولیه	۱۰۰۰
نوع جواب اولیه	باینری
عملگر انتخاب	انتخاب مسابقه ای
عملگر ترکیب	ترکیب یک نقطه ای
احتمال ترکیب	۰/۹
میزان دفعات تکرار الگوریتم ژنتیک	۱۵
زمان در نظر گرفته شده برای حرکت مفاصل	۰/۲ ثانیه
سرعت پردازش	۰/۶ ثانیه
خطا	کمتر از ۳ میلی متر
گشتاور مجاز	کمتر از ۲ نیوتن متر

f_{max} مقدار برازندگی تمام حل های گروه اول (گروهی که جواب ها تمام قیدها را برآورده می سازد) محاسبه شده و بیشترین مقدار آن به عنوان f_{max} معرفی می گردد.

در شکل ۵ توضیح بیشتری در این مورد داده شده است. این شکل شامل ۶ حل که با دایره های پر رنگ نشان داده شده است، می باشد. فضای حل نیز به دو دسته قابل قبول (فضایی که در آن تمام قیدها برآورده می گردند) و فضای غیر ممکن (فضایی که حتی یک قید برآورده نمی گردد) تقسیم بندی می شوند. $g(x) = 0$ تفکیک کننده این فضا می باشد. تابع برازندگی ۳ حل سمت راست این خط $F(x)$ و تابع برازندگی سه حل سمت چپ مجموع $g(x)$ و مقدار ثابت f_{max} می باشد.



شکل ۵: بررسی چگونگی تعیین برازندگی [13]

فرایند انتخاب نیز از روش زیر صورت می گیرد.

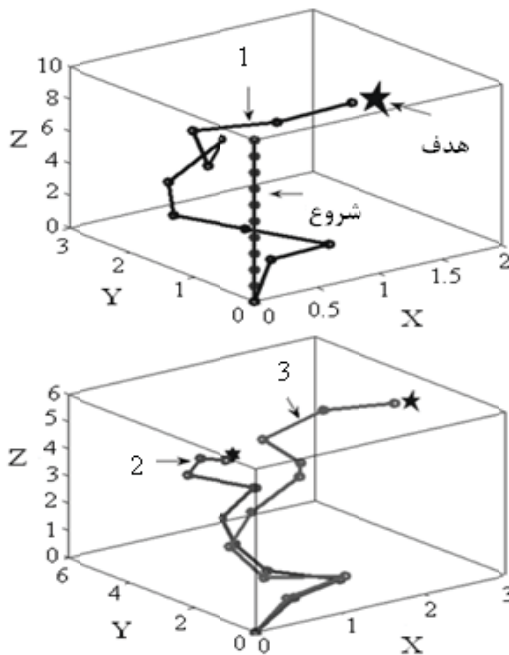
- ۱- هر جواب ممکن (جوابی که تمام قید ها را برآورده می سازد) از هر جواب غیر ممکن بهتر است.
 - ۲- بین دو جواب ممکن حل با برازندگی کمتر انتخاب می گردد. زیرا هدف کمینه کردن می باشد.
 - ۳- بین دو جواب غیر ممکن نیز جوابی انتخاب می گردد که مقدار برازندگی آن عدد کوچکتری باشد.
- از عملگر ترکیب یک نقطه ای برای ترکیب دو کروموزوم و ایجاد کروموزوم جدید استفاده شده است.

۵.۳. انتخاب حل با بهترین گشتاور

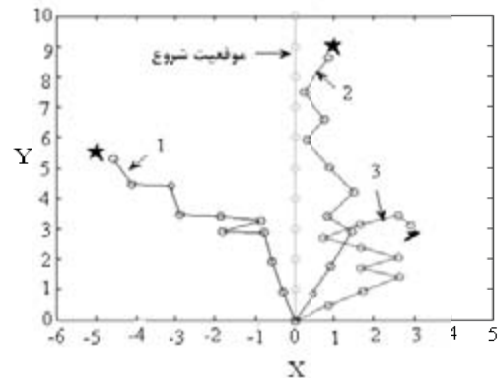
در مرحله قبل تمامی جواب هایی که در آنها فاصله سر ربات از هدف از عدد مجازی کوچکتر (این عدد توسط طراحی تعیین می شود) انتخاب شده است. در این مرحله با توجه به رابطه ۳ گشتاور تمامی این حل ها محاسبه شده و حل با کمترین گشتاور به عنوان جواب انتخاب می شود. دلیل آنکه گشتاور به طور مستقیم در تابع هدف وارد نگردید آن است که امکان نرسیدن ربات به هدف وجود دارد. این مطلب در روش [12] بررسی شده است.

۲.۴. راستای انتهای موثر در رسیدن به هدف

یکی از مزایای این روش قابلیت تعیین جهت انتهای موثر در رسیدن به هدف با دوران مشخص می باشد. این مهم می تواند به صورت قیدی به الگوریتم ژنتیک وارد گردد.



شکل ۸: بررسی حرکت ربات با ۲۰ درجه آزادی برای رسیدن به اهداف تعیین شده در فضا می باشد.



شکل ۷: بررسی جهت های مختلف رسیدن به هدف

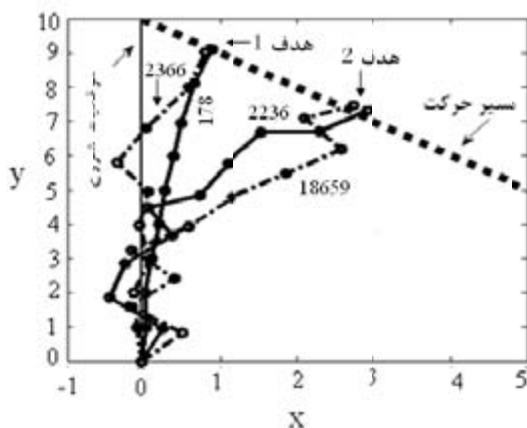
در شکل ۷ برای سومین حرکت خواسته شده است که از بالا به هدف برسد و برای موارد بعدی خواسته شده تا از پایین به هدف مشخص برسند.

۳.۴. بررسی عملکرد الگوریتم در فضای سه بعدی

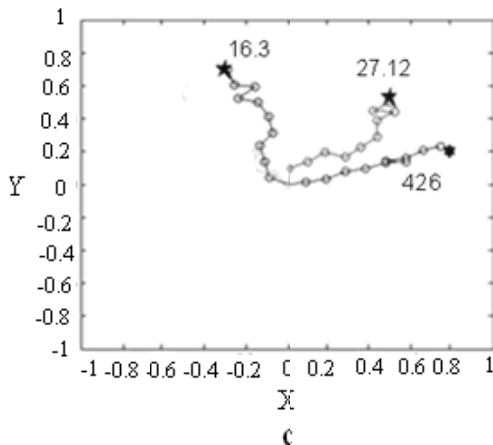
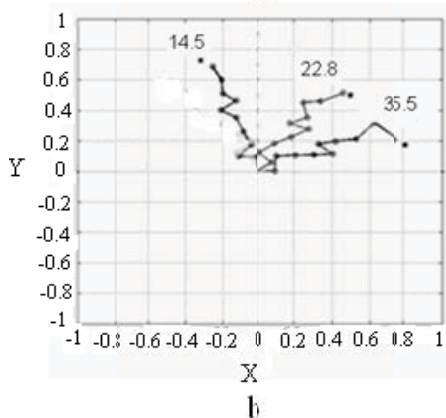
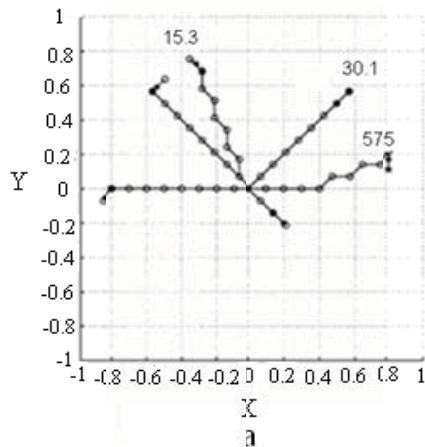
برای بررسی حرکت در فضا، رباتی با فواصل ۲ درجه آزادی که حرکت آنها در راستای محورهای X و Y جدای از هم می باشد، در نظر گرفته شده است. برای این حالت تعدادی نقطه به عنوان هدف که با * مشخص شده، در فضا در نظر گرفته شده است و هدف حرکت ربات از موقعیت شروع و رسیدن این اهداف می باشد به گونه ای که عملکرد ربات بهینه (بخش ۳.۲) و قیدهایی وارد به آن ارضا گردند (بخش ۴.۲). به منظور وضوح بیشتر حالت های مختلف ربات در ۲ شکل مختلف ترسیم گردیده است. در شکل ۸ موقعیت های مختلف ربات با شماره های ۱ تا ۳ نشان داده شده اند. مشخص است سر ربات با فاصله بسیار کم به اهداف از پیش تعیین شده رسیده است. برای این حالت زمان حل ۱/۴ ثانیه و میزان خطا کمتر از ۲ میلی می باشند. خطاهای حالت های ۱ تا ۳ به ترتیب ۰/۱۹، ۰/۱۴، ۰/۲ میلی متر می باشد.

۴.۴. بررسی بهینه شدن انرژی

جهت بررسی بهینه شدن انرژی وضعیت حرکت ربات دو حالت بهینه شدن انرژی (خطوط پر رنگ) و عدم بهینه شدن (خط چین) رسم و همچنین انرژی مصرفی آنها محاسبه شده است (اعداد نوشته شده در کنار هر شکل). همان گونه که مشخص است در حالت بهینه شدن انرژی، ربات مسیر کمتری را طی می کند.



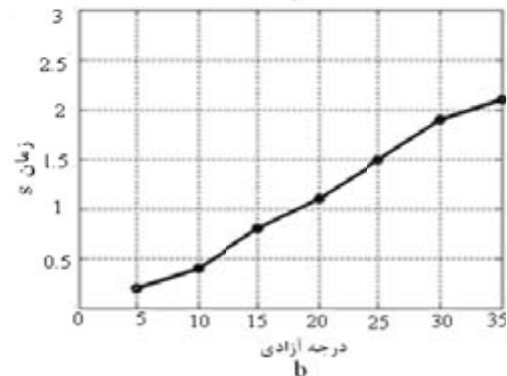
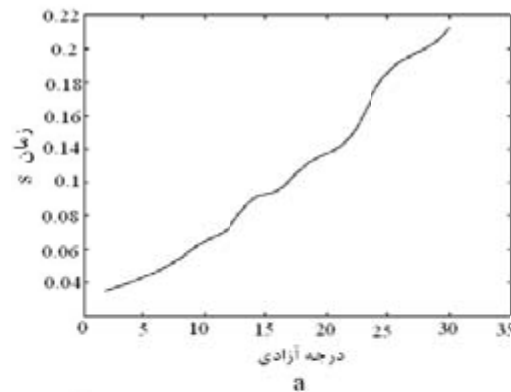
شکل ۹: بررسی بهینه بودن گشتاور



شکل ۱۱: مقایسه وضعیت حرکتی ربات ۱۰ درجه آزادی (● نشان دهنده موقعیت مفاصل و * نشان دهنده موقعیت هدف می باشد). (a) نحوه حرکت ربات طبق روش WSDF و (b) نحوه حرکت ربات به روش جدید با بهینه کردن عملکرد ربات (c) نحوه حرکت ربات بدون بهینه کردن عملکرد ربات

۵.۴. بررسی زمان حل و مقایسه با روش WSDF

همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است به لحاظ زمان روش چیریک جیان بر روش جدید برتری دارد. اما یکی از مزایای این روش تعیین زوایا به گونه ای است که حرکت ربات بلادرنگ باشد. در روش چیریک جیان صحبتی در مورد بلادرنگ بودن حرکت ربات نشده است.



شکل ۱۰: بررسی زمان حل (a) روش WSDF (b) روش جدید

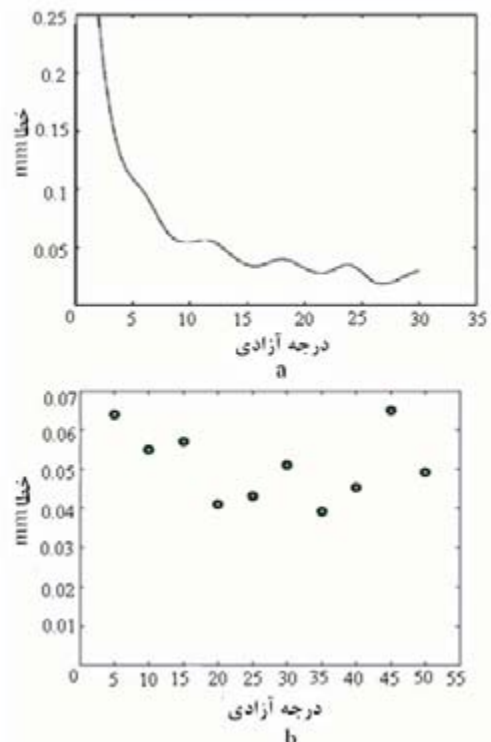
۶.۴. بررسی بهینه شدن گشتاور و مقایسه با روش WSDF

برای اثبات قابلیت روش جدید این روش با روش WSDF مقایسه گردیده است. این روش بر مبنای استفاده از تابع چگالی فضای کاری می باشد (تابعی با ابعاد 6×6 در صورتی که بازو در حالت فضایی باشد).

در شکل ۱۱-a، همانطور که مشخص است در اکثریت مواقع سر ربات با هدف برخورد کرده و از آن عبور می نماید. سر ربات نمی بایست به هدف برخورد کند زیرا در صورت صلب بودن هدف امکان آسیب رسیدن به ربات وجود دارد. برای اثبات بهینه بودن گشتاور در روش جدید با فرض $M = 1kg$ و $l = 0.1m$ گشتاور تمامی حل ها محاسبه شده مقدار آنها بر روی هر کدام از حالت ها نوشته شده است. همانطور که مشخص است در حالتی که عملکرد ربات بهینه می گردد بازو با گشتاور کمتری به هدف می رسد (شکل ۱۱-b).

۷.۴. بررسی خطا و مقایسه با روش WSDF

خطا که همان میزان فاصله سر ربات تا هدف می باشد با افزایش درجه آزادی افزایش می یابد. نتایج حاصل از بررسی میزان خطا در روشهای گذشته (به غیر از روش WSDF) نیز گویای این مطلب است. یکی از مزایای این روش عدم افزایش خطا با افزایش درجه آزادی و یا طول لینک ها می باشد. دلیل این مطلب آن است که در پروسه انتخاب جواب های قابل قبول توسط الگوریتم ژنتیک، جواب هایی انتخاب می شوند که فاصله آنها از هدف مقدار معلومی باشد (به عنوان مثال سر ربات در ۱ سانتی متری هدف باشد). این مطلب با تغییر در شرایط ربات مانند درجه آزادی و نوع مفصل تغییر نمی کند. با توجه به شکل 12-a مشخص است که برخلاف بسیاری از روشهای دیگر با افزایش تعداد مدول ها میزان خطا کاهش می یابد. با بررسی شکل 12-b می توان نتیجه گرفت که میزان خطا وابسته به درجه آزادی نبوده (به عنوان مثال خطا در ۳۵ درجه آزادی از خطا در ۵ درجه آزادی کمتر می باشد) و مقدار آن نیز بسیار کم می باشد. اما نکته مهم آن است که میزان آن از مقدار معلومی (فاصله در نظر گرفته شده برای رسیدن سر ربات به هدف) افزایش نمی یابد.



شکل ۱۲: بررسی خطا (a) نمودار خطای روش WSDF (b) نمودار خطای روش جدید

۸.۴. بررسی وابسته نبودن روش جدید به نوع مفاصل

تنها وابستگی الگوریتم جدید به نوع مفاصل به تعیین مختصات انتهای ربات می باشد. تعیین مختصات سر ربات نیز با استفاده از روش های معمول سینماتیک مستقیم ربات مانند دناویت هارتبرگ قابل حل می باشد. لذا تغییر نوع مفصل تنها باعث تغییر در نحوه محاسبه تابع برازندگی (فاصله سر ربات از هدف) می شود. در شکل های ۶ و ۷ مسئله سینماتیک معکوس برای ۲ نوع ربات صفحه ای و فضایی با مفاصل ۲ و ۱ درجه آزادی حل گردیده است. روش های دیگر تنها برای نوع خاصی از مفصل حل شده اند و وابسته به نوع مفاصل هستند.

۹.۴. قابلیت بکارگیری قیدهای دیگر

یکی دیگر از مزایای این روش قابلیت اضافه کردن قیدهای مختلف به دلیل توانایی بالای الگوریتم ژنتیک در بکارگیری قیدها و روش بکار گرفته شده در تعیین زوایای بهینه مفاصل می باشد

۵. نتیجه گیری

در این مقاله روشی جدید، سریع و کارآمد برای حل سینماتیک معکوس و بهینه کردن عملکرد بازوهای مکانیکی با درجه آزادی بالا ارائه شد. روش حل شامل انتخاب بهینه زاویه دوران جهت حداقل کردن حرکت ربات که سبب بهینه شدن انرژی و بلادرنگ شدن آن می شود، حل سینماتیک معکوس ربات و استخراج جواب های ممکن با در نظر گرفتن قیدهای وارده به آن توسط الگوریتم ژنتیک و در نهایت انتخاب حل با کمترین گشتاور می باشد. خطای پایین، عدم وابسته بودن الگوریتم به نوع مفاصل، سرعت بالا، قابلیت حرکت ربات به صورت بلادرنگ، قابلیت حل سینماتیک معکوس ربات های صفحه ای و فضایی، قابلیت ارضا نمودن تعداد زیادی قید، بهینه کردن عملکرد ربات و قابلیت رسیدن به هدف از جهات مختلف از جمله مزایای این روش می باشد. با توجه به آنکه می توان عدم برخورد به مانع را نیز یک قید در نظر گرفت کار آینده در این زمینه اضافه کردن این قابلیت به الگوریتم می باشد.

مراجع

- [1] Sofge D, G.Chinag, *Design, implementation and cooperative coevolution of autonomous/teleported control system for a serpentine robotic manipulator.*
- [2] Nakamura, Y., *Advanced robotics redundancy and optimization*, Addison-Wesley Pub. Company, 1991, Reading.
- [3] Ma S, Hirose S., Nenchev D. N., *Improving local torque optimization techniques for redundant mechanisms*, Journal of Robotic Systems, Vol. 8, No. 1, pp. 75, 1991.
- [4] www.voronoi.com and www.snakerobots.com .

- [9] Gravange A and Woodfine R, *mine-sniffing robotic snakes and eels*, IEEE Int Conf on Robotics and Automation, 2000.
- [10] Suthakorn J, Chirikjian G S, *A new inverse kinematic algorithm for binary manipulators with many actuators*, Advanced Robotics, Vol. 15, No. 2, pp. 225– 244 2001
- [11] Fromherz M P J, Hogg Tad, Shang Y, Jackson W B, *Towards constraint-based actuation allocation for hyper-redundant manipulators*, Published in IJCAI-01 Workshop on Modelling and Solving Problems with Constraints, Aug. 2001.
- [12] Deb.k , *An introduction to genetic*
- [5] Sastry S and Kohn M, *Milli Robotics for remote minimally invasive surgery*, Robotics and Automation systems, 1997.
- [6] Paljug R , Ohm T and Hayati S, *The JPL serpentine robot : a 12 DOF system for inspection* ,IEEE International Conference on Robotics and Automation, ,1995.
- [7] Paap k .l, Christaller T and Kirchner F, *A robot snake to inspect broken building* , IEEE Int,Conf on Intelligent Robots and systems, 2000.
- [8] Wolf A, Brown H.B, Casciola R, Costa A, Shammass E and Choset H , *A mobile hyper redundant mechanism for search and rescue tasks* ,*International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas , Nevada, 2003.