بهینه سازی ابعادی ربات دلتا با استفاده از الگوریتم ژنتیک و روش پنالتی پویا

عبدالرضا قره سوفلو1\*، ولی اله پناهی­زاده2، علی رحمانی هنزکی3

 1- دانشجوی مقطع دکتری،مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 163-16785، agharahsofloo@yahoo.com

چکیده

ربات­های موازی علیرغم داشتن مزایایی همچون ظرفیت حمل بار بالا و عملکرد دینامیکی بهتر در سرعت و شتاب­های زیاد، در مقایسه با رباتهای سری، از نظر فضای کار دارای محدودیت می­باشند. در این گروه، ربات دلتا به عنوان یکی از ساده­ترین و چالاک­ترین نوع ربات­ها­ی موازی، کاربرد فراوانی در صنایع بسته­بندی و الکترونیک دارد. یکی از مهمترین جنبه­های طراحی ربات دلتا، تعیین ابعاد ربات دلتا برای فضای کار معین می­باشد. با توجه به تاثیر اندازه­ی هر یک از بازوها و سکوی متحرک در عملکرد دینامیکی آن، تعیین ابعاد بهینه و حداقلی ربات برای یک فضای کار پیشفرض، بسیار اهمیت دارد. پژوهش­های متعددی برای پیدا کردن ابعاد بهینه برای ربات ها موازی از منظرهای مختلف انجام شده است. در این میان، اگر چه بهره­گیری از الگوریتم­های تکاملی یکی از روشهای قدرتمند در بدست آوردن ابعاد بهینه ربات­ها می­باشد ولی معرفی تابع هدف مناسب و ارزیابی قیود حاکم بر مسئله، بسیار اهمیت دارد. در این پژوهش با بهره­گیری از الگوریتم ژنتیک پیوسته و با معرفی و پیاده­سازی یک تابع بعنوان پنالتی پویا، برای دو نمونه از فضای کار متداول، ابعاد بهینه ربات محاسبه می­گردد. نمایش همزمان فضای کار خواسته شده و فضای کار حاصل از ابعاد بهینه­شده، دقت نتایج بدست آمده از الگوریتم و تابع پنالتی معرفی شده را بخوبی تایید می­کند. با توجه به ارزیابی دقیق تخطی­ها از قیود و دقت بالای پاسخ بدست آمده­، در ادامه تاثیر متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده، در فضای کار ربات دلتا مورد مطالعه قرار می­گیرد.

**کلی**د‌واژگ**ان**

ربات­های موازی، ربات دلتا، فضای کار، الگوریتم ژنتیک، پنالتی پویا

Dimensional optimization of Delta robot using Genetic algorithm and dynamic Penalty function

AbdolReza GharahSofloo1\*, Valialah PanahiZadeh2, Ali Rahmani HanZaki3, …

1- PHD Student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran

3-Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran

\* P.O.B. 163-16785 Tehran, Iran, Agharahsofloo@yahoo.com

Abstract

Parallel robots, despite their advantages such as high load capacity and better dynamic performance at high speeds and accelerations, are limited in terms of workspace compared to serial robots. Among this group, Delta Robot, as one of the simplest and fastest parallel robots, has many applications in the packaging and electronics industries. One of the most important aspects of Delta Robot design is determining the dimensions of the Delta Robot for a Prescribed workspace. Due to the effect of the size of each arm and the moving platform on its dynamic performance, determining the optimal and minimum dimensions of the robot for a default workspace is very important. Numerous studies have been conducted to find the optimal dimensions for parallel robots from different aspects. Meanwhile, although the use of evolutionary algorithms is one of the powerful methods in obtaining the optimal dimensions of robots, but defining an appropriate objective function and evaluation of the constraints is very important. In this research, using continuous genetic algorithm and introducing and implementing a function as a dynamic penalty, the optimal dimensions of the robot are calculated for two examples of the common work space of the Delta robot. Representing of the prescribed workspace and optimized workspace, well confirms the accuracy of the results obtained from the algorithm and the introduced penalty function. Afterward, Due to the accurate evaluation of the violations of the constraints and the high accuracy of the results, the effect of each of the design variables on workspace of the Delta robot were studied.

Keywords

Parallel Robots, Delta Robot, Workspace, Genetic Algorithm, Dynamic Penalty

۱-مقدمه

رباتهای موازی دارای مزایای متعدد نسبت به نوع سری می باشند. مواردی از جمله سفتی بیشتر، بازوهای سبک­تر و در نتیجه عملکرد دینامیکی بهتر از جمله­ی مزیت­های این نوع ربات­ها بشمار می­آید. از سوی دیگر، فضای کار کوچکتر در مقایسه با رباتهای سری را می­توان بعنوان بارزترین ضعف آنها بشمار آورد. در این میان، با توسعه­ی روز افزون صنایع در دهه­های اخیر،­ ربات­های موازی جابجایی[[1]](#footnote-1)، که دارای سه درجه آزادی می­باشند، مورد توجه بیشتری، قرار گرفته­اند[[1](#_ENREF_1)]. ربات دلتا[[2]](#footnote-2)، که در اوایل 1980 توسط کلاول ابداع شد، نمونه­­ای موفق و پرکاربرد از این نوع ربات­های سه درجه آزادی چالاک بوده و در صنایع بسته بندی و الکترونیک کاربرد فراوانی دارد[[2](#_ENREF_2), [3](#_ENREF_3)] (شکل ۱). برای این دسته از ربات­ها، فضای کار[[3]](#footnote-3) مربوطه، محدود به نقاط در دسترس عملگر نهایی[[4]](#footnote-4) نصب شده در سکوی متحرک می­باشد. با توجه به فضای کار محدود رباتهای موازی، یکی از رویکردها شامل تعیین ابعاد بهینه­ی ربات با توجه به یک فضای کار پیشفرض، می­باشد. الگوریتم ژنتیک­ که بعنوان یک زیر مجموعه از الگوریتم­های تکاملی بشمار می­آید، مبتنی بر جستجوی ترکیبی و بر اساس نظریه­ تکامل و ژنتیک می­باشد.[[4](#_ENREF_4)]­ با توجه به کارآمدی این روش، در حل مسائل مختلف بویژه مسائل غیر خطی و بهینه­سازی­های دارای متغیرهای متعدد، پژوهش­های مختلفی در زمینه طراحی و تعیین ابعاد بازوها، سکوهای متحرک و ثابت ربات دلتا، از جنبه­های مختلف همچون بهینه­سازی از منظر عملکرد دینامیکی و نیز جنبه­ی سینماتیکی انجام گردیده است. اولین بار مسئله­ی طراحی یک ربات موازی برای فضای کار معین­، توسط گاسلین[[5]](#footnote-5) و بودریو[[6]](#footnote-6) مطرح شد[[5](#_ENREF_5)]. آنها روشی را ارائه کردند که با کمک الگوریتم ژنتیک فضای کار، تا حد امکان با فضای کار پیشفرض منطبق گردد. یونجی یانگ[[7]](#footnote-7) با استفاده از روش جستجوی تصادفی کنترل شده[[8]](#footnote-8)، با بیشینه کردن فضای کار موثر منظم[[9]](#footnote-9) ربات دلتا، تاثیر برخی قیود سینماتیکی را در ابعاد بهینه­ی بدست آمده، مورد مطالعه قرارداد[[6](#_ENREF_6)]. لاریبی[[10]](#footnote-10) و همکاران با توصیف یک تابع هزینه­ی[[11]](#footnote-11) ویژه برای ربات موازی دلتا، روشی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک، جهت تعیین پارامترهای ابعادی، برای یک فضای کار مکعب و چند وجهی ارائه کردند[[7](#_ENREF_7)]. مک کرومیک[[12]](#footnote-12) و همکاران، با درنظرگرفتن فضای کار اطراف ربات دلتا، از طریق الگوریتم ژنتیک و بیشینه کردن آن، همراه با برخی قیود ابعادی در نظر گرفته شده، فضای کار بدون استفاده ربات، را کمینه و ابعاد بهینه را تعیین کردند، در روش ارائه شده توسط آنها فضای کار ربات بصورت یک استوانه در نظر گرفته شد، همچنین تابع هدف بر اساس پنالتی استاتیک بصورت یک مقدار ثابت در الگوریتم ژنتیک پیاده­سازی گردید [[8](#_ENREF_8)].

 لاریبی و همکاران، ابتدا با بررسی هندسه­ی فضای کار ربات دلتا، با استفاده از نرم­افزار کتیا[[13]](#footnote-13) فضای کار یک ربات دلتا را با ابعاد معین، بدست آورده و در ادامه با استفاده از ابزار بهینه­سازی نرم­افزار کتیا بر اساس روش گرادیان مزدوج[[14]](#footnote-14) و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده[[15]](#footnote-15) ابعاد بهینه­ی ربات را برای حجم مدل شده بدست آورده و تاثیر تغییر ابعاد بازوها را با کمک نر­م­افزار بر روی فضای کار بدست آمده بررسی کردند [[9](#_ENREF_9)]. در ادامه، هاشمی دستجردی و همکاران، روشی کاملاً تحلیلی را بر توصیف فضای کار ربات دلتا ارائه کردند. در این روش با استفاده از تحلیل سینماتیک معکوس ربات دلتا، چگونگی محاسبه­ي بزرگترین مکعب محاط در فضای کار ربات دلتا ارائه شد، این روش در تلاش برای ارائه ي مدل تحلیلی فضای کار ربات، همراه با فرض­هایی می­باشد. از جمله­ی این فرض­ها شرط بزرگ بودن بازوهای محرک نسبت به اختلاف قطر دو سکوی متحرک و ثابت را می­توان اشاره کرد. در نهایت با در نظر گرفتن برخی شرایط در هندسه­ی ربات، حجم فضای کار را محاسبه و روش تعیین ابعاد یک مکعب با بیشینه­ی حجم را ارائه می­نماید [[10](#_ENREF_10)].

با توجه به پژوهش­های انجام گرفته در زمینه­ی طراحی ابعادی ربات دلتا، با توجه به پیچیدگی مدل تحلیلی و شرایط مختلف حاکم بر مسئله از یک سو و اهمیت تعیین بهترین ابعاد با بیشترین حجم منطبق بر فضای کار از سوی دیگر، این پژوهش بدون در نظر گرفتن فرض خاصی، از توانمندی الگوریتم ژنتیک در جستجوگری و استخراج بهترین پاسخ بهره می­گیرد. ابتدا با توصیف سینماتیک معکوس ربات دلتا، رابطه­ی فضای کار ربات و متغیرهای طراحی بیان می­گردد. در ادامه برای استخراج ابعاد بهینه­ی ربات با استفاده از الگوریتم ژنتیک، یک تابع هزینه­ی مناسب دارای پنالتی معرفی می­شود. تابع پالتی از نوع پنالتی پویا بوده و متناسب با مقدار تخطی جواب­ها از قیود، تابع هزینه را اصلاح و در نهایت بهترین جواب­ها را در اختیار قرار می­دهد.

۱-۱-ساختار و پیکربندی ربات دلتا

ربات موازی 3-RRR دلتا، دارای ساختار متشکل از یک پایه ی ثابت، سه بازوی یکسان فوقانی و سه بازوی یکسان تحتانی بصورت حلقه­ی متوازی الاضلاع بوده و به یک سکوی متحرک متصل می­باشد. اتصال هر یک از بازوهای محرک ربات نسبت به محل نصب در پایه­ی ثابت ۱۲۰ درجه اختلاف دارند، "شکل 1"، سکوی متحرک در حین حرکت همواره بموازات پایه ثابت بوده و هیچگونه تغییر زاویه­ای ندارد، لذا عملگر نهایی فقط می­تواند در جهت سه محور x وy و zجابجا گردد. با توجه به جرم اندک بازوها و نصب عملگرها بر روی پایه­ی ثابت این ربات توانایی حرکت در سرعت بسیار زیاد در عین دقت را دارد.

1-2- تعریف مسئله و روش کار

در طراحی ربات­های موازی با توجه به نوع ربات عمدتاً فضای کار را بصورت شکل­های منظم مانند مکعب و استوانه در نظر می­گیرند. فضای کار ربات دلتا، بصورت نقاط قابل دسترسی توسط مرکز سکوی متحرک در نظر گرفته می­شود، اگر چه با توجه به وجود قیدهای سینماتیکی همچون محدودیت­ حرکت مفاصل­، فضای کار در دسترس می­تواند کاهش پیدا کند، بنابراین پس از یافتن بهترین ابعاد، در انتخاب فضای کار با اعمال یک ضریب می­توان فضای کار را بر اساس اعمال محدودیت قیدها توسعه داده و مقادیر واقعی­تر برای پارامترهای هندسی ربات بدست آورد.

بهترین پاسخ، از طریق یافتن ابعاد بهینه ربات که بیشترین انطباق را با حجم پیشفرض داشته باشد حاصل می­شود.

|  |
| --- |
| ­ |
| **Fig. 1** The Clavel’s Delta Robot [[11](#_ENREF_11)]  |
| **شكل 1** ربات دلتای کلاول |

 در این مقاله محدودیت­های ناشی از قیود در تابع هزینه بهینه­سازی بکمک الگوریتم ژنتیک بصورت غیر مستقیم و با اعمال ضریبی در حجم پیشفرض، در نظر گرفته می­شود. نتایج حاصل با محاسبه­ی فضای کار ربات بر اساس نتایج بهینه­سازی به روش نمایش مرز فضای کار و مشاهده­ی انطباق آن با حجم پیشفرض با استفاده از محیط کد نویسی نرم­افزار متلب مورد بررسی قرار خواهد گرفت [[12](#_ENREF_12)].

۲- سینماتیک معکوس و فضای کار ربات دلتا

2-1- پاسخ سینماتیک معکوس

سینماتیک معکوس ربات شامل تعیین زوایای زوایای مفاصل محرک بر اساس موقعیت معلوم عملگر نهایی می­باشد. پاسخ سینماتیک معکوس در اینجا شامل یافتن زوایای عملگرها ،*θ1j* که *j=*1,2,3 بر اساس موقعیت معلوم مرکز سکوی متحرک (P) می­باشد. بر اساس نمایش شماتیک ربات دلتا مطابق "شکل 2" ، طول بازوی محرک (فوقانی) *La*، بازوهای متحرک(تحتانی)، *Lb* و شعاع پایه­ی ثابت و متحرک به ترتیب با *rA* و *rB* می­باشد. زوایای عملگرهای متصل به بازوهای متحرک، برای هر یک از بازوها به ترتیب با *θ*1j که در آن$j=1,2,3$ ‌ و دو زاویه­­ی مربوط به بازوهای متحرک نیز برابر $θ\_{2j} , θ\_{3j} (j=1,2,3)$می­باشد. برای نقطه­ی P واقع بر سکوی محرک روابط ذیل برقرار است.[7]

|  |  |
| --- | --- |
| (1) | $$X\_{p}=\cos(α\_{j})(r\_{A}+L\_{A}\cos(θ\_{1j})+L\_{B}\cos(θ\_{3j})\cos(()θ\_{1j}$$$$ +θ\_{2j})-r\_{B})-L\_{A}\sin(α\_{j})\sin(θ\_{3j})$$ |
| (2) | $$Y\_{p}=\sin(α\_{j})(r\_{A}+L\_{A}\cos(θ\_{1j})+L\_{B}\cos(θ\_{3j})\cos(()θ\_{1j}$$$$ +θ\_{2j})-r\_{B})+L\_{B}\cos(α\_{j})\sin(θ\_{3j}) $$ |
| (3) |  $Z\_{p}=L\_{A}\sin(θ\_{1j})+L\_{B}\cos(θ\_{3j})\sin(()θ\_{1j}+θ\_{2j})$ |

با در نظر گرفتن r =RA-RB، روابط (1) تا (3) را میتوان بصورت ذیل نمایش داد:

|  |  |
| --- | --- |
| (4) | $$[(r+L\_{A}\cos(θ\_{1j}))\cos(α\_{j})-X\_{p}]^{2}+[(r+L\_{A}\cos(θ\_{1j}))\sin(α\_{j})-Y\_{p}]^{2}+[-L\_{A}\sin(θ\_{1j})-Z\_{p}]^{2}-L\_{B}^{2}=0$$ |

|  |
| --- |
| ­ |
| **Fig. 2**  The DELTA robot parameters [11] |
| **شكل ۲** نمایش پارامترهای ابعادی ربات دلتا |

برای تعیین زوایای θ1j، رابطه­ی (4) بصورت یک معادله­ی مثلثاتی قابل نمایش می­باشد:

|  |  |
| --- | --- |
| (5) | $$M\_{1j}\cos(θ\_{j})+M\_{2j}\sin(θ\_{j})=M\_{\begin{array}{c}\&3j\\\&\end{array}}$$ |

بطوریکه:

|  |  |
| --- | --- |
| (6) | $$\left\{\begin{array}{c}\&M\_{1j}=-2L\_{A}\cos(α\_{j})X+2L\_{A}.r-2L\_{A}\sin(α\_{j})Y\\\&M\_{2j}=2L\_{A}Z\\\&M\_{3j}=L\_{B}^{2}-L^{2}\_{A}-(X-r\cos(α\_{j}))^{2}\\-(Y-r\sin(α\_{j}))^{2}-Z^{2}\end{array}\right.$$ |

با در نظر گرفتن $t\_{i}=\tan(()\frac{θ\_{1j}}{2})$ آنگاه از رابطه­ی (5) خواهیم داشت:

|  |  |
| --- | --- |
| (7) | $$\left.t\_{1,2}\right)\_{j}=\frac{M\_{1j}\pm \sqrt{\left(M^{2}\_{1j}+M^{2}\_{2j}-M^{2}\_{3j}\right)}}{M\_{1j}+M\_{3j}}$$ |

و در نهایت برای j=1,2,3 مقادیر زوایای عملگرها (پاسخ سینماتیک معکوس) بدست می­آید:

|  |  |
| --- | --- |
| (8) | $$\left.θ\_{1j}\right)\_{1,2}=2ATAN(t\_{1,2})\_{j}$$ |

2-2- فضای کار و حجم پیشفرض

با توجه به رابطه­ی (7) توصیف ریاضی فضای کار، شامل تمام نقاطی است که در شرط رابطه­ی (9) صدق کنند. این نقاط توصیف کننده­ی حجم مشترک سه تیوب مفروض حاصل از هر یک از سه زنجیره سینماتکی ربات می­باشد.

|  |  |
| --- | --- |
| (9) | $$V\_{j}\left(x\_{p},y\_{p},z\_{p}\right)=\left(M^{2}\_{1j}+M^{2}\_{2j}-M^{2}\_{3j}\right)\geq 0$$ |

شرط تساوی در رابطه­ی (9) بیان کننده­ی تمام نقاط واقع بر مرز فضای کار ربات دلتا است . در این مقاله علاوه بر حجم پیشفرض بصورت یک مکعب مربع، حجم مکعب مستطیل شکل نیز با توجه به کاربرد­های جابجایی ربات دلتا مطابق جدول 1 در نظر گرفته شده است.

**جدول 1** حجم­های پیشفرض فضای کار ربات دلتا

**Table 1** Prescribed Volume for Delta Robot Workspace

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| مکعب مستطیل | مکعب مربع | حجم پیشفرض |
| 4 | 2 | طول |
| 2 | 2 | عرض |
| 2 | 2 | ارتفاع |

3- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (GA) یک ابزار قدرتمند مبتنی بر اصول تکامل بیولوژیکی است و در فضاهای مسائل پیچیده و همچنین ناپیوسته با ارزیابی تمامی قیود حاکم بر مسئله، از طریق جستجوگری مناسب، بدنبال استخراج بهترین پاسخ­ها می­باشد [[13](#_ENREF_13), [14](#_ENREF_14)]. اصول کلی روش الگوریتم ژنتیک مبتنی بر گام­های زیر می باشد [[15](#_ENREF_15)]:

۱- مقدار دهی اولیه جمعیت

۲- محاسبه تابع برازش[[16]](#footnote-16)(هزینه) هر یک از اعضای جمعیت

۳- بررسی شرایط خاتمه جستجو و در صورت عدم تحقق شرط خاتمه، اجرای گام ۴ .

۴- انتخاب والدین (هر یک از والدین که برازش بیشتر یا هزینه کمتر دارند احتمال انتخاب بیشتری در بین جمعیت خواهند داشت.)

۵- اعمال عملگر­های ترکیب و جهش بر روی والدین انتخاب شده بمنظور تولید فرزندان و تشکیل جمعیت جدید.

۶- تکرار مرحله­ی ۲

 در روش الگوریتم ژنتیک پیوسته­، ابتدا متغیرهای مسئله از نظر تعداد و نوع آنها تعیین می­گردند و سپس محدوده­­ی جستجوگری الگوریتم برای متغیر­ها تعیین می­شود. هر رشته­ی جواب (کروموزوم) با توجه به نوع متغیرها و محدوده­ی آنها تولید می­شود. با تولید جمعیت جوابها، عملگرهای اصلی بر روی اعضای جمعیت جواب عمل می­کنند. نوع عملگر ترکیب بکار گرفته شده­، از نوع یکنواخت و معیار انتخاب بر اساس کمینه کردن تابع هزینه بر اساس مقدایر ضریب­های مندرج در جدول 2 می ­باشد.

**جدول 2** مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک

**Table 2** Parameters used for Genetic Algorithm

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| تعداد جمعیتNp | درصد جهش mu | ضریب جهش m | ضریب ترکیب α |
| 100 | 0.01 | 0.40 | 0.65 |

3-1- تابع هدف و روش پنالتی

الگوریتم ژنتیک به منظور ارزیابی هر کروموزوم در جمعیت هر نسل، از یک تابع بنام تابع هدف استفاده می­کند. این تابع متناسب با نوع مسئله تعیین می­شود و بایستی در برگیرنده رابطه­ی معنادار بین متغیر­های بهینه­سازی باشد. همچنین بمنظور هدایت جمعیت جوابها برای برقراری قیود حاکم بر مسئله، بخشی بعنوان پنالتی در کنار تابع هدف لحاظ می­گردد. انواع روشهای اعمال پنالتی در مسائل بهینه­سازی شامل دو دسته­ی روش پنالتی ایستا و روش­های پنالتی پویا می­گردد[[11](#_ENREF_11)].

در روش پنالتی ایستا[[17]](#footnote-17)، فاکتور­های پنالتی با توجه به قیدها، در تمام فرایند تکامل ثابت بوده در طول الگوریتم تغییر چندانی نمی­کند. برای قیود نامساوی، هومیفار[[18]](#footnote-18) و همکاران (1994) بخش پنالتی را بفرم تساوی تبدیل و سپس تابع هدف جدید $φ(\vec{x})$ را طبق رابطه­ی (10)، ارائه کردند [[16](#_ENREF_16)].

|  |  |
| --- | --- |
|  (10)  | $$φ\left(\vec{x}\right)=f\left(\vec{x}\right)+\sum\_{i=1}^{m+n}A\_{k,i}×max\left[0,g\_{i}\left(\vec{x}\right)\right]^{2}$$ |

که در آن $g\_{i}\left(\vec{x}\right)$ قیود نامساوی و Ak,i بزرگترین ضریب پنالتی هر مرحله می­باشد.

در روش پنالتی پویا[[19]](#footnote-19)، تابع پنالتی متناسب با تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک بوده و مقدار پنالتی مربوط به هر رشته­ی جواب در هر مرحله در هر تکرار تغییر می­یابد. جوینز[[20]](#footnote-20) و هوک[[21]](#footnote-21) (1994) فرم کلی تابع هدف با پنالتی پویا را بصورت رابطه­ی (11) ارائه کردند[[17](#_ENREF_17)]. در این رابطه پارامترهای α و β ثابت هایی است که متناسب با مسئله تعیین و *gi­* و *hj* مربوط به قیدهای تساوی یا عدم تساوی متناظر با مسئله بهینه سازی می­باشند.

|  |  |
| --- | --- |
| (11) | $$φ\left(\vec{x}\right)=f\left(\vec{x}\right)+(0.5×t)^{α}×SVC\left(β,\vec{x}\right),$$$SVC\left(β,\vec{x}\right)=\sum\_{i=1}^{n}A\_{i}^{β}\left(\vec{x}\right)+\sum\_{j=1}^{m}B\_{j}\left(\vec{x}\right)$,$A\_{i}\left(\vec{x}\right)=\{\begin{matrix}0, if g\_{i}\left(\vec{x}\right)\leq 0 \\\left|g\_{i}\left(\vec{x}\right)\right|, else\end{matrix}$,$$B\_{j}\left(\vec{x}\right)=\{\begin{matrix}0, if -\in \leq h\_{i}\left(\vec{x}\right)\leq \in \\\left|h\_{j}\left(\vec{x}\right)\right|, else\end{matrix}$$ |

فرمانی و همکاران،(2003) چگونگی بکارگیری یک تابع پنالتی دو مرحله­ای را با توجه به یک معیار سنجش میزان غیر ممکن بودن جواب­ها، ارائه کردند. روش ارائه شده مستقل از قابل قبول بودن جمعیت اولیه جوابها بوده و تابع هدف ارائه شده، با توجه به معیارهای تخطی از نوع خود تطبیق[[22]](#footnote-22) بشمار می­آید [[18](#_ENREF_18)] . روش مذکور اگرچه از منظر نتایج ارائه شده قابل توجه است، اعمال پنالتی در دو مرحله حجم محاسبات بالایی را دربر خواهد داشت.

بکارگیری الگوریتم ژنتیک برای مسائل مقید، نیازمند دقت در تعیین درست مقدار پنالتی بر اساس میزان تخطی­ها می­باشد. پنالتی نادرست منجرب هدایت پاسخ­ها به مقدار بهینه­ی محلی و یا پاسخ­های ناممکن شود و در این میان، توابع پنالتی خود تطبیق از نوع پویا که مقادریشان متناسب با تکرار هر نسل اصلاح و سازگار می­گردد، اهمیت زیادی خواهند داشت.

۳-۲-تابع هدف بهینه سازی

در این پژوهش، متغیرهای بهینه سازی ربات دلتا، شامل سه پارامتر ابعادی ربات شامل *r*، اختلاف شعاع پایه­ی ثابت و سکوی متحرک، *La*  طول بازوی محرک فوقانی متصل به پایه­ی ثابت و *Lb* طول بازوی شماتیک متحرک طبق "شکل 2" می­باشند. برای هر یک از حجم­های در نظر گرفته شده مطابق جدول 1، آندسته از متغیرهای بهینه سازی مذکورکه به ازای آنها ، شرط رابطه­ی (9) برقرار باشد، می­توانند بعنوان یک دسته جواب در نظر گرفته شوند و چنانچه شرط برقرار نباشد بدین معنی است که، تمام یا تعدادی از رئوس حجم در نظر گرفته شده، خارج از فضای کار در دسترس ربات قرار دارند.

لاریبی و همکاران، تابع هدف اولیه بهینه­سازی خود را برای ربات دلتا، بصورت رابطه­ی (12) تعریف کردند [7].

|  |  |
| --- | --- |
|  (12) | $$F\_{1}=\left(\sum\_{p=1}^{N}\sum\_{j=1}^{3}\left|V\_{j}\left(x,y,z\right)\_{p}\right|\right)$$ |

 هر یک از مقادیر $V\_{j}\left(x,y,z\right)\_{p}$طبق رابطه­ی (9) برای هر یک از زنجیره­های ربات به ازای *j*=1،2،3 قابل محاسبه هستند. همچنین N در رابطه­ی (12) بیان کننده­ی تعداد نقاط رئوس حجم پیشفرض و برابر 8 می­باشد. آنها برای در نظر گرفتن شرط قیدی رابطه­ی (9) از یک پنالتی ایستا بصورت یک عدد مثبت بزرگ بصورت جمع شونده استفاده کردند.

 استفاده از یک مقدار ثابت بعنوان پنالتی، ریسک دستیابی به پاسخ­های بهینه افزایش یافته و جوابها لزوماً بهترین نخواهند بود. فلذا با توجه به لزوم تناسب پنالتی با مقدار تخطی از قیود، در این پژوهش بمنظور دستیابی به بهترین پاسخ­ها از روش پنالتی پویا استفاده می­گردد. مسئله­ی بهینه سازی در اینجا شامل کمینه کردن تابع هدف می­باشد و در فرایند تولید جمعیت پاسخ­ها، تابع هدف بر اساس یک پنالتی سازگارشونده پویا بر اساس نتایج [17,18] با توجه به طبق رابطه­ی (13) و با توجه به رابطه­ی (11) استفاده می­شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (13) | $$φ\left(\vec{x}\right)=F\_{1}\left(\vec{x}\right)+α\_{iteration}×cv\left(\vec{x}\right)$$ |

ضریب α بعنوان درصد تخطی جمعیت جوابها از کل قیود می­باشد. مقدار $cv$ برای هر نسل بر اساس مقدار تخطی از قیود محاسبه می­گردد. البته در اینجا در محاسبه­ی آن ابتدا تخطی از قیود (m) در هر جمعیت طبق رابطه (14) نرمالیزه می­گردد.

|  |  |
| --- | --- |
| (14) | $$viol\_{j}\left(x\right)=\frac{1}{m}\left(\sum\_{j=1}^{m}\frac{C\left(x\right)\_{j}}{Cmax\_{j}}\right)$$ |

در ادامه برای Np نقطه فضای کار پیشفرض­، مقادیر ماکزیمم و مینیمم تابع هدف با توجه به جمعیت جواب، تعیین می­گردد. و متناسب با درصد تخطی قیود و تعداد تخطی ($\hat{f}\_{i}$) در هر مرحله مقدار پنالتی بصورت یک ضریب برای هر یک محاسبه می­گردد.

|  |  |
| --- | --- |
| (15) | $$cv(x)=\sum\_{i=1}^{Np}viol\_{i}\left(x\right)×\left(\hat{f}\_{i}\right)×f\_{max}$$ |

 تابع هزینه­ی اصلاح شده برای مسئله­ی بهینه سازی طبق رابطه­­ی (13) در بردارنده­ی همزمان مقدار تخطی و درصد تخطی هر نسل ­ می­باشد. خاطر نشان می­شود، بهترین مقدار $F\_{1}\left(\vec{x}\right)$، کمترین مقدار آن با توجه به قیود رابطه­ی (9) است. با توجه به مقادیر در نظر گرفته شده بعنوان پارامترهای الگوریتم ژنتیک در جدول 2، برای حجم پیشفرض مکعب مربع، مطابق جدول 1 و برای تعداد 100 تکرار، نتایج متغیرهای بهینه­سازی شده­ی ربات در جدول 3 و "شکل3" نمایش، داده می­شود.

**جدول 3** پارامترهای بهینه سازی حاصل به ازای H=1

**Table 3**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *La* | *Lb* | r =RA-RB |
| 0.87 | 2.53 | 0.0 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|

|  |
| --- |
| ­ |
| **Fig. 3** Workspace of delta robot for Table 3 |
| **شكل 3** نمایش فضای کار ربات دلتا به ازای مقادیر جدول 3  |

 |
|  |

برای حجم پیشفرض مکعب مستطیل، اجرای الگوریتم ژنتیک بر اساس تابع بهینه­ی ارائه شده، نتایج حاصل برای 100 تکرار طبق جدول 4 و "شکل4" نمایش داده شده است.

**جدول 4** پارامترهای بهینه سازی حاصل به ازای H=1.1

**Table 4**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *L*a | *L*b | r=RA-RB |
| 0.7 | 3.18 | 0.0 |

|  |
| --- |
|  |
|  |
|  |
| ­ |
| **Fig. 4** Workspace of delta robot for Table 4 |

**شكل 4** نمایش فضای کار ربات دلتا به ازای مقادیر جدول 4

فضای کار نمایش داده شده در این پژوهش بدون در نظر گرفتن قیود سینماتیکی مفاصل و لولاهای ربات می­باشد. با توجه به عملکرد ربات دلتا در سرعت و شتابهای زیاد، هر چقدر ابعاد بازوها و نیز اندازه­ی شعاع سکوی متحرک بهینه­تر انتخاب شود­، عملکرد دینامیکی ربات بهتر خواهد بود.

 چنانچه متغیر r کوچکتر انتخاب شود به معنای هم اندازه شدن شعاع­های سکوهای متحرک و ثابت است. اگر چه از منظر تحلیل فضای کار­، کاهش این متغیر موجب افزایش فضای کار بصورت یک مقیاس در تمام جهات می­باشد، با اینحال با توجه به تاثیر فوق­العاده­ی اندازه و جرم سکوی متحرک که محل نصب عملگر نهایی ربات می­باشد، این متغیر بعنوان یکی از متغیر را می­توان مستقل از مسئله­ی بهینه­سازی درنظر گرفت. با در نظر گرفتن r=1 و همچنین H=1 ابعاد بهینه­ی ربات براساس روش ارائه شده مطابق جدول 5 و "شکل 5" قابل مشاهد می­باشد.

**جدول 5** محدوده­ی اصلاح شده متغیرهای بهینه سازی

**Table 5**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *L*a | *L*b | H | r=RA-RB |
| 1.15 | 2.62 | 1.0 | 1 |

یک نمونه از ربات­­های­ تجاری مدل Fanuc M-1iA/0.5A داری ابعادی مطابق جدول 6-i می­باشد. این ربات برای صنعت جابجایی طراحی شده و دارای کورس جابجایی بر اساس معیار مکعب مستطیل محاط به طول 180 سانتی متر می­باشد.

****

**Fig. 5** Workspace of delta robot for Table 5

**شكل 5** نمایش فضای کار ربات دلتا به ازای مقادیر جدول 5

با در نظر گرفتن ابعاد این ربات و پیاده­سازی روش بهینه­سازی ارائه شده، مقادیر بهینه­ شده در جدول 6-ii نمایش داده شده است. بر اساس نمایش حجم فضای کار بر اساس مقادیر بهینه­ سازی مشاهده می­گردد که ابعاد ربات مذکور قابل کاهش به مقادیر بهینه­ی بدست آمده می­باشند.

**جدول 6** متغیرهای بهینه سازی ربات Fanuc M-1iA/0.5A

**Table 6**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *L*a | *L*b | r=RA-RB  |  |
| 100 | 270 | 70 | i |
| 86.89 | 267.28 | 35 | ii |

|  |
| --- |
|  |
|  |
| ­ |
| **Fig. 6** Workspace of Fanuc M-1iA/0.5A delta robot  |
| **شكل 6** نمایش فضای کار ربات دلتا Fanuc M-1iA/0.5A |

۴- نتایج

در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و معرفی یک تابع هدف مناسب همراه با پیاده­سازی روش پنالتی پویا، ابعاد بهینه­ی یک ربات موازی دلتا برای یک فضای کار پیشفرض محاسبه گردید. روش پنالتی پویا با در نظر گرفتن قیود حاکم بر سیستم و با توجه به مقدار تخطی پاسخ­ها ارزیابی مناسبی را انجام داده و در نتیجه پاسخ­های حاصل دارای دقت بسیار مناسبی هستند. با استفاده از نتایج حاصل از بهینه­سازی­ تاثیر ابعاد هندسی ربات دلتا مشخص گردید. بر اساس نتایج بدست آمده کوچکترین ابعاد ربات دلتا برای دو حجم معین مکعب شکل محاسبه و سپس فضای کار بر اساس اندازه­های بدست آمده ترسیم شد. در ادامه ابعاد یک ربات صنعتی نوع دلتا، بر اساس روش ارائه شده مورد بررسی قرارگرفت. نتایج حاصل، نشان دهنده­ی موجود اختلاف مشخص بین ابعاد ربات با ابعاد بهینه می­باشد. نمایش فضای کار حاصل از مقادیر بهینه­ی بدست آمده این ربات دقت روش الگوریتم ژنتیک با تابع هدف اصلاح شده با کمک روش پنالتی پویا را بخوبی نمایش می­دهد .

۵-مراجع

 [1] M. Stock, and K. Miller, *Optimal kinematic design of spatial parallel manipulators: application to linear delta robot.* J. Mech. Des., 2003. 125(2): p. 292-301.

[2] R. Clavel, *Device for the movement and positioning of an element in space*. 1990, US Patents 4,976,582.

[3] Y. Patel, and P. George, *Parallel manipulators applications—a survey.* Modern Mechanical Engineering, 2012. **2**(03): p. 57.

[4] S. Puzzi, and A. Carpinteri, *A double-multiplicative dynamic penalty approach for constrained evolutionary optimization.* Structural and Multidisciplinary Optimization, 2008. 35(5): p. 431-445.

[5] R. Boudreau, and C.M. Gosselin, *The synthesis of planar parallel manipulators with a genetic algorithm.* 1999.

[6] Y. Lou, G. Liu, and Z. Li, *Randomized optimal design of parallel manipulators.* IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2006. **5**(2): p. 223-233.

[7] M. Laribi,­ L. Romdhane, and S. Zeghloul, *Analysis and dimensional synthesis of the DELTA robot for a prescribed workspace.* Mechanism and machine theory, 2007. 42(7): p. 859-870.

[8] E. McCormick, Y. Wang, and H. Lang. *Optimization of a 3-RRR Delta Robot for a Desired Workspace with Real-Time Simulation in MATLAB*. in *2019 14th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*. 2019. IEEE.

[9] B. Aboulissane, L. El Bakkali, and J. El Bahaoui, *Workspace analysis and optimization of the parallel robots based on computer-aided design approach.* Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, 2020. 18(1): p. 079-089.

[10] A.H. Dastjerdi, M.M. Sheikhi, and M.T. Masouleh, *A complete analytical solution for the dimensional synthesis of 3-DOF delta parallel robot for a prescribed workspace.* Mechanism and Machine Theory, 2020. 153: p. 103991.

[11] B. Tessema, and G.G. Yen. *A self adaptive penalty function based algorithm for constrained optimization*. in *2006 IEEE international conference on evolutionary computation*. 2006. IEEE.

[12] A. Gharahsofloo, and A. Rahmani, *An efficient algorithm for workspace generation of delta robot.* 2015.

[13] J.R. Sampson, *Adaptation in natural and artificial systems (John H. Holland)*. 1976, Society for Industrial and Applied Mathematics.

[14] J.K. Parker, A.R. Khoogar, and D.E. Goldberg. *Inverse kinematics of redundant robots using genetic algorithms*. in *1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1989. IEEE Computer Society.

[15] S. Števo, I. Sekaj, and M. Dekan, *Optimization of robotic arm trajectory using genetic algorithm.* IFAC Proceedings Volumes, 2014. 47(3): p. 1748-1753.

[16] A. Homaifar, C.X. Qi, and S.H. Lai, *Constrained optimization via genetic algorithms.* Simulation, 1994. 62(4): p. 242-253.

[17] J.A. Joines, and C.R. Houck. *On the use of non-stationary penalty functions to solve nonlinear constrained optimization problems with GA's*. in *Proceedings of the first IEEE conference on evolutionary computation. IEEE world congress on computational intelligence*. 1994. IEEE.

[18] R. Farmani, and J.A. Wright, *Self-adaptive fitness formulation for constrained optimization.* IEEE transactions on evolutionary computation, 2003. **7**(5): p. 445-455.

1. Translational Parallel Robots [↑](#footnote-ref-1)
2. Delta Robot [↑](#footnote-ref-2)
3. Workspace [↑](#footnote-ref-3)
4. End effector [↑](#footnote-ref-4)
5. C. Gosselin [↑](#footnote-ref-5)
6. Boudreau [↑](#footnote-ref-6)
7. Yunjiang Lou [↑](#footnote-ref-7)
8. controlled random search [↑](#footnote-ref-8)
9. Effective Regular Workspace [↑](#footnote-ref-9)
10. Laribi [↑](#footnote-ref-10)
11. Cost Function [↑](#footnote-ref-11)
12. McCormick [↑](#footnote-ref-12)
13. Catia [↑](#footnote-ref-13)
14. Conjugate Gradient [↑](#footnote-ref-14)
15. Simulated Annealing [↑](#footnote-ref-15)
16. Fitness Function [↑](#footnote-ref-16)
17. Static Penalty [↑](#footnote-ref-17)
18. Homaifar,A. [↑](#footnote-ref-18)
19. Dynamic Penalty [↑](#footnote-ref-19)
20. Joines, J, A. [↑](#footnote-ref-20)
21. Houck, C,R. [↑](#footnote-ref-21)
22. Self-Adaptive [↑](#footnote-ref-22)