مجله مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1395، دوره 16، شماره 6، ص‌ص 149-158

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

طراحی و ساخت ربات موازی چهارشاخه با فضای کاری عاری از تکینگی با استفاده از الگوریتم زنبورعسل و هوش ازدحامی

مهدی زمانی فکری[1*]، مجتبی زارعی[2]، مهدی طالع ماسوله[3]، مجتبی یزدانی[4]

1- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان، بهبهان
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تهران، تهران
3- استادیار، مهندسی مکاترونیک، آزمایشگاه تعامل انسان و ربات دانشگاه تهران، تهران
4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه یوتا، سالت لیک سیتی
* بهبهان صندوق پستی 6361713198، zamanifekri@behbahaniau.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 01 بهمن 1394
پذیرش: 24 اسفند 1394
ارائه در سایت: 30 خرداد 1395

کلید واژگان:
ربات موازی
تکینگی
ربات چهار شاخه
کلونی زنبورعسل
هوش ازدحامی ذرات (PSO)

چکیده

در این مقاله ربات موازی چهار درجه آزادی چهار شاخه شبیه‌سازی می‌شود. ابتدا مدل ریاضی که بر اساس آن ربات موازی چهار شاخه مدل شده نشان داده شده است و سپس بهینه‌سازی این ربات موازی بر اساس فضای کاری عاری از تکینگی سینماتیکی مرتبه دوم انجام می‌شود. نوآوری این مقاله در استفاده از دو الگوریتم جستجوی سراسری برای یافتن فضای کاری عاری از تکینگی است. ابتدا مسأله برای الگوریتم زنبورعسل مصنوعی حل شده و سپس این روش با روش هوش ازدحامی ذرات مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با هر دو روش می‌توان پارامترهای طراحی ربات را به دست آورد، درحالی‌که از پیچیدگی‌هایی که از ویژگی ذاتی این نوع بهینه‌سازی است پرهیز کرد. مقایسه دو الگوریتم جستجو نشان‌دهنده آن است که روش هوش ازدحامی ذرات سریع‌تر از الگوریتم کلونی زنبورعسل عمل می‌کند. فضای جستجو برای این الگوریتم‌ها، حجمی متشکل از سطحی به ابعاد 500 mm در 500 mm است که در راستای عمود از ارتفاع 500 mm تا 1000 mm تغییر می‌کند. همچنین از نکات مهم این مقاله دوران مجری نهایی حول محور عمود تا 90 درجه چرخش است که قابلیت مهمی در ساختار و انعطاف عملکردی ربات دارد. پس از شبیه‌سازی، ربات موازی به کمک نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی مدل می‌شود. در نهایت ربات موازی چهار شاخه طراحی شده در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات دانشگاه تهران ساخته شده است.

Optimal design and fabrication of a 4-DOF quattrotaar parallel robot with singularity-free workspace by ABC and PSO algorithms

Mehdi Zamani Fekri[*1], Mojtaba Zarei[2], Mehdi Tale Masouleh[3], Mojtaba Yazdani[4]

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Behbahan, Iran.
2- Department of Mechatronic Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Human and Robot interactive Laboratory, University of Tehran, Tehran, Iran
4- Department of Mechanic Engineering, University of Utah, Salt Lake City, U.S.A
* P.O.B. 6361713198, Behbahan, Iran, zamanifekri@behbahaniau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 21 January 2016
Accepted 14 March 2016
Available Online 19 June 2016

Keywords:
Parallel Robot
Singularity
Quattrotaar Robot
Artificial Bees colony
Particle Swarm Optimization

ABSTRACT

Simulation of the four degree of freedom parallel robot (Quattrotaar) is subjective of this paper. The mathematical model of the parallel robot is obtained too. The workspace is optimized for Non-singular kinematic type-2. Artificial Bees Colony algorithm and Particle Swarm Optimization algorithm as overall exploring algorithms are implemented and the results are compared to each other. In spite of any intrinsic complexity of the optimization problems, the result shows the capability of both methods for this robot parameters design. Comparison of the results indicates the Particle Swarm Optimization algorithm runs faster than Artificial Bees Colony algorithm. The exploring volume consists of a plan with 500 mm x 500 mm dimension which move in a vertical direction from 500 mm to 1000 mm. One of the important hints of the paper is a 90-degree rotation of end effector around vertical axis Z. This rotation is caused more flexibility and dexterity for the robot. A 3-D model of Quattrotaar parallel robot is created by Computer Aided Design software and finally Quattrotaar is fabricated in Human and Robot Interaction Laboratory (Taarlab).

1- مقدمه

حرکت شونفلایز[1] شامل سه حرکت انتقالی و یک حرکت دورانی حول یک محور ثابت است [1]. ربات‌هایی با چنین خاصیتی به‌شدت در صنایع امروزی موردنیاز هستند [2]. فرایندهایی مانند بسته‌بندی محصولات و گذاشتن یا برداشتن قطعات نیاز به‌سرعت و شتاب زیاد دارد. معمولا در این فرایندها ویژگی‌هایی مانند اندازه کوچک جسم، سبکی وزن و پراکندگی در جانمایی وجود دارد. ازاین‌رو، حرکت ربات‌ها در راستای افق باید انعطاف‌پذیر بوده و

[1] Schonflies

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Zamani Fekri, M. Zarei, M. Tale Masouleh, M. Yazdani, Optimal design and fabrication of a 4-DOF quattrotaar parallel robot with singularity-free workspace by ABC and PSO algorithms, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 149-158, 2016 (in Persian)

برای حرکت در راستای عمود نیز از سختی کافی و مناسب برخوردار باشد. همچنین حرکت خروجی باید امکان چرخش‌هایی به‌اندازه کافی بزرگ و انعطاف‌پذیر را فراهم کند. به همین دلیل ربات‌هایی با حرکت شونفلایز به‌طور گسترده در صنایع استفاده می‌شوند.آن‌ها موضوع تحقیق‌های بسیاری بوده‌اند و مکانیزم های زیادی نیز برای این منظور طراحی و استفاده شده است.

ربات دلتا[1] را می‌توان یکی از موفق‌ترین و پرکاربردترین انواع ربات‌های موازی دانست که توسط کلاول معرفی شد [3]. فضای کاری زیاد، سرعت عملکرد بالا و ساختار فشرده از ویژگی‌های ربات دلتا است. این ربات اساسا یک ربات با سه درجه آزادی انتقالی[2] است ولی به کمک یک لینک اضافی و مفصل‌های دورانی می‌توان امکان ایجاد یک درجه آزادی دورانی نیز برای آن فراهم کرد. ایده استفاده از یک بازوی متوازی‌الاضلاع برای ساخت چنین رباتی مزایای زیادی داشت. به‌طوری‌که با استفاده از این متوازی‌الاضلاع‌ها اولا مجری نهایی می‌تواند نسبت به لینک متصل به پایه دو درجه آزادی داشته باشد و دیگر اینکه این متوازی‌الاضلاع‌ها مجری نهایی را در یک موقعیت دورانی ثابت نگه می‌دارند و امکان هرگونه دوران را از آن می‌گیرند. بدین ترتیب امکان ایجاد سه درجه آزادی انتقالی در فضا برای ربات ایجاد می‌شود. به کمک لینک اضافی و مفصل دورانی یک درجه آزادی دورانی برای مجری نهایی فراهم می‌گردد. ربات دلتا سرآغاز دوران استفاده صنعتی از ربات‌هایی با ساختار فشرده و سریع است.

ربات دلتا از ساختار مفصلی (UPU) استفاده می‌کرد که در عمل طول عمر ضعیفی داشت[4]. برای رسیدن به‌سرعت های بالاتر و برطرف کردن معایب ربات دلتا مکانیزم موازی H4 توسط پیروت و همکاران معرفی شد [5]. ربات H4 یک مکانیزم موازی چهار عضوی است که همه مزیت‌های ربات دلتا را دارد و از یک ساختار طراحی شده خاص برای مجری نهایی استفاده می‌کند [6]. این ساختار در واقع سازه‌ای دوپارچه است که دوران خروجی با حرکت نسبی بین دو صفحه کاسته یا افزوده می‌شود؛ بنابراین محدودیت‌های ساختار UPU ربات دلتا حذف شده و سرعت عملکرد را بهبود می‌دهد. نمونه مشهور صنعتی این دسته از ربات‌ها، ربات ساخته شده توسط شرکت آدپت[3] معروف به کواترو[4] است. این شرکت ادعا می‌کند که این ربات، سریع‌ترین ربات صنعتی موجود در دنیا (با حداکثر سرعت 10 متر بر ثانیه و حداکثر شتاب 150 متر بر مجذور ثانیه) است. ربات H4 دارای ساختار پیچیده‌ای است که در حین استفاده می‌تواند مشکلاتی را به وجود آورد و سبب بالا رفتن هزینه‌ها شود، بنابراین هنوز هم آن‌ها موضوع تحقیقات زیادی هستند.

سالگادو و همکاران دسته دیگری از مکانیزم‌های موازی با ساختار یکپارچه و با چهار بازو ارائه کردند [7]. ساخت نمونه‌هایی که در آن‌ها مفصل دورانی یا بازوی کشویی[5] فعال داشته باشند [8]، دارای محدودیت ذاتی درحرکت دورانی است. همچنین تداخل بازوها، دوران مجری نهایی را محدود می‌کند.

ساختار مکانیزم موازی یکپارچه‌ای توسط کیم و همکاران [9] ارائه شده است که دوران خروجی آن تا حدود $\pm 90°$ است که برای کاربردهای معرفی شده کافی به نظر می‌رسد.در سال 2013 لی و همکاران مکانیزم موازی چهار درجه آزادی دیگری را ارائه کردند [10] که مقدار دوران خروجی آن تا حدود $\pm 30°$ محدود بود. اخیرا آقای زی و همکاران در سال 2015 ربات X4 را که یک ربات موازی است [4] معرفی کردند که علاوه بر آنکه توانایی چرخش تا $\pm 90°$ را در فضای کاری دارد، می‌تواند با شتاب بیشینه $120\ m/s^2$ و بیشینه سرعت $8\ m/s$ حرکت کند. این ربات تنها رباتی است که مجری نهایی آن به‌صورت بندبند نیست و ساختار یکپارچه‌ای دارد. در این ربات، هر یک از چهار شاخه ربات توسط یک مفصل دورانی به مجری نهایی متصل می‌شود. مزیت ربات X4 ساختار ساده این ربات نسبت به نمونه‌های دیگر است. برخلاف انواع دیگر ربات‌های هم‌رده، این ربات به دلیل یکپارچه بودن مجری نهایی، دارای ساده‌ترین مجری نهایی است. همین امر ساخت این ربات را آسان می‌کند.

با مرور کارهای انجام شده برای بهینه‌سازی ربات‌های موازی می‌توان آن‌ها را به دودسته تقسیم کرد [11]. دسته اول یافتن طراحی بهینه متغیرهای ربات موازی است به‌نحوی‌که فضای کاری بیشینه شود [12-16]. دسته دوم بهینه‌سازی‌ها تحلیل ابعادی ربات و تلاش برای یافتن و تعیین مناسب‌ترین فضای کاری برای آن است [17-22].

مرلت به مسأله بهینه‌سازی پارامترهای طراحی نوع گو-استوارت برای ربات‌های موازی توجه کرد که فضای کاری به شکل داده معلوم بود و سه حالت مجموعه نقاط، مسیر و حجم را در نظر گرفت [12]. دو تحقیق در سال 1997 برای بهینه‌سازی ربات سه درجه آزادی ارائه شد. در تحقیق اول بیشینه کردن حجم فضای کاری بازوها بدون در نظر گرفتن کیفیت آن انجام شد و در دومین تحقیق مطالعه بهینه‌سازی برای حجم کلی با بیشینه کردن شاخص‌های سراسری فضای کاری ربات انجام شد [13]. گاسلین نیز بعضی از پارامترهای ربات صفحه‌ای RPR را با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای به دست آوردن نزدیک‌ترین فضای کاری به فضای خواسته شده تعیین کرد [14]. برای ربات دلتا نیز بهینه‌سازی سینماتیکی انجام شد که تعادلی بین قابلیت دسترسی ربات و شاخص‌های کارایی اعمال می‌کرد [15]. مطالعه‌ای بر مبنای تحلیل وقفه[6] برای ربات‌های موازی سه درجه آزادی انجام شد. در این روش دو معیار در نظر گرفته شده و با تحلیل فضای کاری بزرگ‌ترین فضای مانوری درون آن پیدا می‌شود [16].

بهینه‌سازی فضای کاری ربات موازی بررسی و شرایطی که نقاط ایزوتروپیک فضای کاری برای آن وجود دارد، محاسبه و نشان داده شد که پس از بهینه‌سازی، متغیرهای طراحی بالاترین شاخص کلی را دارند [17]. سنتز ابعادی فضای کاری از پیش تعیین شده‌ی ربات موازی دلتا با روشی مبنی بر الگوریتم ژنتیک توسط لربیی پیشنهاد شد [18]. پس از آن نیز بهینه‌سازی ربات دلتا انجام شد. در این تحقیق با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه روشی برای بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شد [19]. همچنین برای مکانیزم موازی صفحه‌ای 3-RPR بر اساس تفاوت در شاخص‌هایی شامل حساسیت سینماتیکی، فضای کاری و مکان هندسی نقاط تکینه بهینه‌سازی انجام شد [20]. برای مکانیزم موازی صفحه‌ای 3-RPR اندازه فضای کاری بیضی‌شکل عاری از نقاط تکینه با استفاده از بهینه‌سازی محدب انجام شد [21].

ساختارهای ساده و کارآمد ربات‌های موازی به دلایل زیر به‌سرعت موردتوجه صنایع مختلف قرار گرفت:

تحریک از طریق موتورهای متصل به پایه: برخلاف ربات‌های سری، در ربات دلتا و اکثر ربات‌های موازی دیگر، موتورها و عملگرها به پایه متصل هستند. این مزیت باعث می‌شود تا راه‌اندازی و ساخت ربات بسیار راحت‌تر

[1] Delta
[2] Translational
[3] Adept
[4] Quattro
[5] Prismatic
[6] Interrupt

صورت گیرد چراکه استفاده از موتورهای بزرگ و سنگین خللی در سرعت و شتاب ربات ایجاد نکرده و در ضمن اتصال موتور به پایه ثابت بسیار راحت‌تر از اتصال آن به یک لینک متحرک است.

ساختار سبک: تمامی عملگرها در ربات دلتا به پایه متصل هستند، همین امر باعث می‌شود تا این ربات ساختار بسیار سبکی داشته باشد.

سرعت و شتاب بالا: به دلیل ساختار سبک و عدم وجود محدودیت شدید وزنی برای موتورهای ربات دلتا، سرعت و شتاب این ربات بسیار بالا است به‌طوری‌که تاکنون شتاب 12 برابر شتاب جاذبه در مدل‌های صنعتی برای این ربات گزارش شده است.

سختی و دقت بالا: به دلیل آنکه در این ربات اتصال پایه به مجری نهایی توسط سه لینک مجزا فراهم شده است، این ربات نسبت به نمونه‌های سری مشابه توانایی ایجاد سختی و دقت بالا در عین سبکی و چالاکی را دارد.

رویکرد این تحقیق بررسی و ساخت ربات موازی چهار شاخه است. ابتدا ربات موازی چهار شاخه شبیه‌سازی می‌شود. نوآوری این مقاله در استفاده از دو الگوریتم کلونی زنبورعسل[1] و هوش ازدحامی ذرات[2] است که فضای کاری عاری از نقاط تکینه را تعیین می‌کند. علاوه بر کارایی این روش‌ها و انعطاف‌پذیری بسیار مناسب در حل مسأله‌هایی در این خصوص از سادگی مناسبی هم برخوردارند و از پیچیدگی‌های زیادی که می‌تواند در این‌گونه مسائل به‌طور ذاتی به وجود آید اجتناب شود. ربات موازی چهار شاخه شبیه‌سازی و به شکل سه‌بعدی طراحی شده است. شکل 1 مدل طراحی شده‌ی آن را نشان می‌دهد. درنهایت این ربات در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات دانشگاه تهران[3] ساخته شده است. شکل 2 این مدل ساخته شده را نشان می‌دهد.

در این مقاله ابتدا در بخش دوم مرور کلی بر کارکرد دو الگوریتمی که اینجا در بهینه‌سازی استفاده می‌شود آمده است سپس در بخش سوم تعریف مسأله و مدل ریاضی که برای مدل‌سازی مکانیزم استفاده می‌شود شرح داده می‌شود. در بخش چهارم قیدهایی که برای مسأله مطرح شده نیاز است و به کار می‌رود بیان می‌شود. بخش پنجم نیز بهینه‌سازی مسأله با استفاده از دو روش بیان شده قبلی انجام می‌شود. در بخش ششم به فرایند ساخت ربات و برخی از نکات مهم در طراحی و ساخت آن اشاره می‌شود. بالاخره در بخش ششم نتایج و بحث‌های مربوطه آمده است.

2- بهینه‌سازی

مسائل طراحی بهینه از نوع مسائل بهینه‌سازی مقید غیرخطی است. معمولا دودسته الگوریتم برای حل این‌گونه مسائل استفاده می‌شود. یکی روش تقریب سری[4] است و دیگری روش تبدیلی[5] است؛ اما مسأله بهینه‌سازی یک مسأله غیرخطی مقید چند مدلی است که هیچ معادله تحلیلی صریحی ندارد؛ بنابراین دو الگوریتم فوق که بر مبنای گرادیان است برای این‌گونه مسائل مناسب نیست زیرا بردارهای گرادیان به‌آسانی در مسأله بهینه‌سازی محاسبه نمی‌شوند. همچنین با توجه به آنکه الگوریتم‌هایی بر مبنای گرادیان به ناگزیر به نقطه کمینه محلی همگرا می‌شوند؛ بنابراین لازم است الگوریتم بهینه‌سازی یافت که به‌سرعت به نقطه بیشینه سراسری همگرا شود [11].

با استفاده از الگوریتم PSO بزرگ‌ترین فضای کاری عاری از تکینگی را برای یک ربات 3-RPR به دست آوردند [22]. دو الگوریتمی هوش ازدحامی

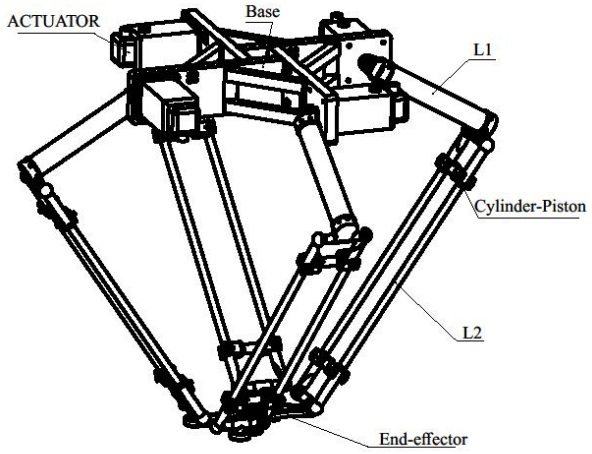

Fig. 1 CAD model of the Quattrotaar

شکل 1 مدل طراحی شده ربات موازی چهار شاخه

ذرات و کلونی زنبورعسل که در این مقاله برای فرایند بهینه‌سازی مورداستفاده قرار می‌گیرد ازجمله الگوریتم‌های جستجوی سراسری هستند.

2-1- الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی

در الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی، فضایی که متغیرها می‌سازند همان دشت گل‌هاست که باید بهترین نقطه آن پیدا شود. همچنین مقدار تابع هدف در اینجا همان مقدار شهد گل‌ها است. در مسائلی که شامل یافتن کمینه می‌شوند هر چه مقدار تابع هزینه در یک نقطه کمتر باشد، آن نقطه غنی‌تر است و برعکس. همچنین در این روش نقاطی که به‌صورت اتفاقی برای تخمین مقدار تابع هزینه در محلی خاص مورداستفاده قرار می‌گیرند در حکم زنبورهایی هستند که در دشت گل‌ها در جستجوی بهترین منبع شهد گل هستند.

در این روش سه دسته زنبور (به‌عبارت‌دیگر عوامل جستجوگر برای نقطه بهینه) وجود دارد که در ادامه به توضیح شرح وظیفه هر یک پرداخته می‌شود. دسته اول زنبورهای کارگر هستند که در ابتدای هر بار اجرای برنامه به‌صورت اتفاقی و یکنواخت درون فضای متغیرها پخش می‌شوند. دسته دوم زنبورهای ناظر هستند که بر اساس شایستگی نقاط بررسی شده در همسایگی این نقاط پخش می‌شوند. دسته سوم نیز زنبورهای دیده‌بان هستند. یکی از پارامترهای کنترل این الگوریتم پارامتر حد مجاز[6] است که مرتبط با زنبورهای دیده‌بان است. منطق حاکم برای این زنبورها به این صورت است که اگر تعداد جستجوهای بی‌نتیجه (بدون بهبود در مقدار کمینه یافته شده برای تابع هزینه) در همسایگی نقطه‌ای از مقدار حد مجاز بیشتر شود، آنگاه زنبور کارگر مرتبط با آن نقطه به زنبور دیده‌بان تبدیل می‌شود و آن منبع اصطلاحا ترک می‌شود. زنبورهای دیده‌بان به‌صورت تصادفی و یکنواخت درون فضای کاری پخش شده و شروع به جستجو می‌کنند. تعداد زنبورهای ناظر و کارگر باهم برابر است و یکی از پارامترهای کنترل مهم این روش همین تعداد است.

پارامتر دیگر کنترل این روش تعداد تکرارها است. برای استفاده از این الگوریتم در مسأله یافتن مقدار بهینه فضای کاری ربات دلتا، تابع هزینه به‌صورت رابطه (1) تعریف شد:

$$J(N) = \frac{1}{N+1} \quad (1)$$

[1] ABC
[2] PSO
[3] Taarlab (Human and Robot interaction laboratory)
[4] Sequential Approximation Method
[5] Transformation Method
[6] Limit Value

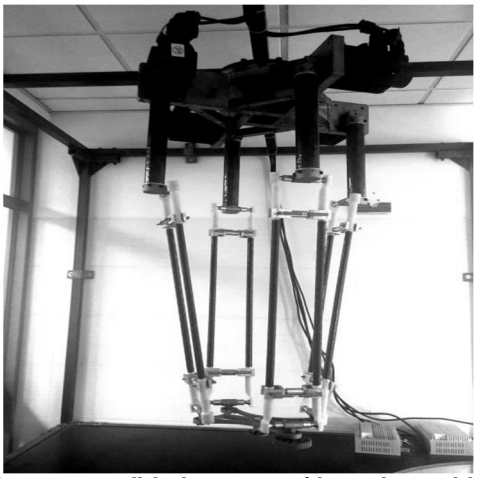

Fig. 2 Quattrotaar parallel robot prototype fabricated in Taarlab

شکل 2 نمونه آزمایشگاهی ربات موازی چهار شاخه ساخته شده در آزمایشگاه تعامل انسان (ربات ساخته شده در تارلب)

که در آن N برابر تعداد نقاطی از فضا است که در فضای کاری ربات توسط روش عددی که در ادامه شرح داده خواهد شد، یافته شده‌اند؛ بنابراین هرچه N بزرگ‌تر باشد مقدار تابع هزینه کمتر می‌شود، لذا هدف مسأله پیدا کردن بزرگ‌ترین فضای کاری برای ربات است. همچنین تعداد کل زنبورهای کلونی برابر 20 عدد، تعداد تکرارها برابر 20 بار و مقدار حد مجاز برابر 10 در نظر گرفته شد.

2-2- الگوریتم هوش ازدحامی ذره

این الگوریتم از نوع سامانه‌های نامتمرکز خودسامان ده می‌باشند که بر اساس رفتار گروهی موجودات در طبیعت الهام گرفته شده است. پرندگان و ماهی‌ها که دارای بهره هوشی قابل‌توجهی نیستند می‌توانند به‌نوعی میان خود ارتباط‌هایی داشته باشند. هر ماهی یا پرنده می‌تواند رفتارهای ساده‌ای را انجام دهد که در نهایت به رفتارهای پیچیده گروهی آن‌ها در طبیعت می‌انجامد.

این روش یک الگوریتم جستجوی سراسری است بنابراین توانایی مناسبی برای حل مسائلی دارد که باید جستجو در یک فضای کاری صورت گیرد. اساس این روش توزیع ذرات در کل فضا است. هرکدام از این ذرات فضای پیرامون خود را برای یافتن هدف موردنظر (در اینجا کمینه کردن تابع هدف) به‌صورت محلی جستجو می‌کند. در مرحله بعد با توجه به ارتباطی که این ذرات با هم دارند، به سمت مکانی که بهترین پاسخ ممکن را دارد تمرکز می‌کنند.

در این تحقیق تعداد تکرارها 20 در نظر گرفته شده و تعداد ذرات جستجوگر فضا نیز 20 عدد است. همچنین به‌منظور تعیین ضرایب مربوط به تصحیح مسیر و سرعت همگرایی روش کندی به‌کاررفته است [23]. برای آنکه همه جستجوها در فضای کاری تعیین شده اتفاق بی افتد و به خارج از دامنه موردنظر کشیده نشود الگوریتم با استفاده از خاصیت آیینه‌ای تصحیح شد.

3- تعریف مسأله

ساختار ربات در شکل 2 نشان داده شده است. این ربات دارای چهار مفصل فعال است که به موتورها وصل می‌شوند و عضو مربوطه را درون صفحه‌ای که از مرکز پایه می‌گذرد دوران می‌دهد. هر یک از این عضوها با مفصل کروی به متوازی‌الاضلاعی وصل شده که از دیگر سو نیز با مفصل کروی به مجری نهایی متصل است. این متوازی‌الاضلاع‌ها باعث می‌شوند تا مجری نهایی هیچ‌گونه دورانی نداشته باشد و همیشه در وضعیتی موازی افق باقی بماند.

برای آنکه ربات بتواند شرایط واقعی را شبیه‌سازی کند لازم است که قیدهایی روی آن اعمال شود. اولین قید به دامنه حرکت زاویه اولین بازوی ربات مربوط است. این زاویه به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که بازوی ربات تا حد امکان بیرون از منطقه زیر صفحه پایه ربات باشد تا از تداخل بازوها در هنگام کار اجتناب شود؛ بنابراین این زاویه از 135 درجه تا 360 درجه تعریف شده است (θ_{i1}). همچنین زاویه حرکتی بازوی دوم ربات (θ_{i2}) نیز بین 0 تا 160 درجه محدود شده است.

با توجه به اینکه ساختار مفصل‌های ربات کروی است، به دلیل کاهش خطر باز شدن مفصل‌ها و درستی کارکرد آن‌ها، زاویه‌ای که می‌توانند نسبت به صفحه عمود بر صفحه پایه و بازوی اول داشته باشد (θ_{i3}) ، حداکثر تا 60 درجه محدودشده است.

همچنین برای به دست آوردن فضای کاری عاری از نقاط تکینگی نوع دوم (سینماتیکی) [24] تنها شرایطی که دترمینان ماتریس ژاکوبین غیر صفر باشد در نظر گرفته شده است. آخرین محدودیت نیز مربوط به دامنه عمودی حرکت در راستای Z است که از پایین‌ترین موقعیت (-1) تا بالاترین وضعیت (-0.5) اجازه حرکت داده شده است.

3-1- مسأله سینماتیک معکوس:

به‌منظور پیدا کردن فضای کاری ربات به‌صورت عددی، ابتدا می‌بایستی مسأله سینماتیک معکوس ربات حل شود، به این معنا که با داشتن موقعیت مجری نهایی، کلیه زوایای مفاصل فعال به دست آیند. به این منظور یکی از شاخه‌های چهارگانه ربات به‌صورت شکل 3 در نظر گرفته می‌شود. در این شکل، متوازی‌الاضلاع با خط میانی آن معادل‌سازی شده است. مختصات اصلی با زیر وند b نشان داده شده است. صفحه P_1 شامل عضو A_1B_1 بوده که از مبدأ می‌گذرد و نقطه D_1 نیز تصویر C_1 درون صفحه P_1 است. همچنین فاصله مراکز مختصات تا محل اتصال شاخه به پایه و مجری نهایی به ترتیب برابر R و r می‌باشند. اگر بردار مکان مرکز مجری نهایی در مختصات متصل به پایه به‌صورت رابطه (2) در نظر گرفته شود:

$$E = [x\ y\ z] \quad (2)$$

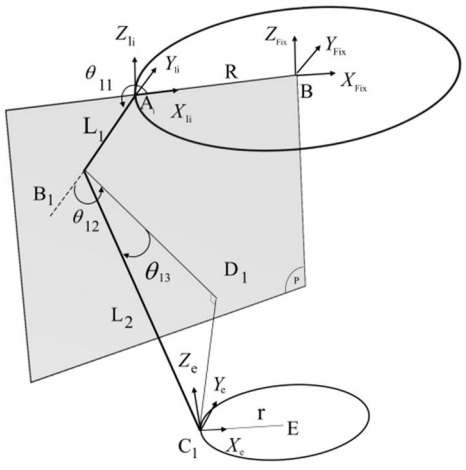

Fig. 3 One limb of Quattrotaar

شکل 3 یک شاخه از ربات موازی چهار شاخه

آنگاه مختصات نقاط A_i و C_i مطابق رابطه (3) عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} A_1 &= [R\ 0\ 0] & A_2 &= [0\ R\ 0] \\ A_3 &= [-R\ 0\ 0] & A_4 &= [0\ -R\ 0] \\ C_1 &= [x + r\cos(\varphi) & y + r\sin(\varphi) & z] \\ C_2 &= [x + r\cos(\varphi+\zeta) & y + r\sin(\varphi+\zeta) & z] \\ C_3 &= [x - r\cos(\varphi) & y - r\sin(\varphi) & z] \\ C_4 &= [x - r\cos(\varphi+\zeta) & y - r\sin(\varphi-\zeta) & z] \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن ζ زاویه بین راستای محل اتصال عضوهای دوم متقابل روی مجری نهایی و φ زاویه‌ای است که مکان راستای اتصال عضوها روی مجری نهایی نسبت به محور افق می‌سازند. شکل 4 این زاویه‌ها را نشان می‌دهد. همچنین بردارهای یکه نرمال صفحه‌های حاوی عضوهای A_iB_i که i=1,2,3,4 است، به‌صورت رابطه (4) به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} n_1 &= [0\ \ 1\ \ 0] \\ n_2 &= [-1\ 0\ 0] \\ n_3 &= [0\ -1\ 0] \\ n_4 &= [1\ \ 0\ \ 0] \end{aligned} \quad (4)$$

با توجه به اینکه هر سه این صفحات از مبدأ می‌گذرند، می‌توان معادلات این صفحات را به‌صورت رابطه (5) به دست آورد:

$$P_i = n_i^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \qquad i = 1,2,3,4 \quad (5)$$

با استفاده از معادله صفحه و مختصات نقطه C_i در فضا می‌توان طول C_iD_i که درواقع فاصله نقطه C_i از صفحه P_i است را به‌صورت رابطه (6) محاسبه کرد:

$$d_i = \frac{n_i^T . C_i}{|n_i|} \quad (6)$$

با داشتن طول C_iD_i که همان d_i است، می‌توان رابطه (7) نوشت:

$$\theta_{i3} = \sin^{-1}\left(\frac{d_i}{L_2}\right) \qquad i = 1,2,3,4 \quad (7)$$

برای به دست آوردن سایر زوایا، مختصات نقطه D_i در دستگاه X_i و Y_i و Z_i به دست می‌آید. به این منظور ابتدا باید مختصات نقطه D_i را در دستگاه اصلی بیان کرده و سپس به دستگاه جدید منتقل شود. مختصات D_i از رابطه (8) به دست می‌آید:

$$D_i = C_i - d_i n_i \quad (8)$$

برای انتقال این مختصات به دستگاه i که در آن محور Z_i به سمت بالا بوده و محور X_i در امتداد مبدأ دستگاه اصلی قرار می‌گیرد، با استفاده از یک دوران و یک انتقال در جهت X_i می‌توان رابطه (9) نوشت:

$$(D_i)_i = \begin{bmatrix} \cos\propto_i & -\sin\propto_i & 0 \\ \sin\propto_i & \cos\propto_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (D_i)_b + \begin{bmatrix} R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad i = 1,2,3,4 \quad (9)$$

که در آن α از رابطه (10) به دست می آید:

$$\propto_1 = 0°, \propto_2 = 90°, \propto_3 = 180°, \propto_4 = 270° \qquad i = 1,2,3,4 \quad (10)$$

روشن است که مؤلفه‌ای از D_i که در جهت محور Y_i قرار دارد برابر صفر می‌شود. برای به دست آوردن سایر زوایا، صفحه P_i را مطابق شکل 5 در نظر گرفته می‌شود. در این تصویر برای طول عضوها رابطه (11) برقرار است:

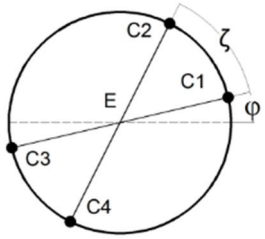

Fig. 4 Definition of φ and ζ angles

شکل 4 تعریف زاویه‌های φ و ζ

$$\begin{cases} l_{i1} = L_1 \\ l_{i2} = L_2 \cos\theta_{i3} \end{cases} \qquad i = 1,2,3,4 \quad (11)$$

برای به دست آوردن زاویه θ_{i1} می‌توان از رابطه ثابت بودن طول l_{i2} به‌صورت رابطه (12) استفاده کرد:

$$(x - l_{i1}\cos\theta_{i1})^2 + (z - l_{i1}\sin\theta_{i1})^2 = {l_{i2}}^2 \qquad i = 1,2,3,4 \quad (12)$$

که در آن x و z از رابطه 9 به دست می‌آیند. معادله بالا در نهایت به فرم رابطه (13) حل می‌شود:

$$\theta_{i2} = \tan^{-1}\left(\frac{z}{x}\right) \mp \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{x^2 + z^2 - T^2}}{T}\right)$$
$$T = \frac{(x^2 + z^2 + l_1^2 - l_2^2)}{(2l_1)} \qquad i = 1,2,3,4 \quad (13)$$

در نتیجه دو جواب به دست می‌آید. برای فاصله گرفتن شاخه‌های ربات از یکدیگر، جوابی که در آن دو عبارت با یکدیگر تفریق شده‌اند در نظر گرفته می‌شود. زاویه θ_{i2} زاویه خارجی مثلث $A_iB_iD_i$ است، بنابراین مقدار آن برابر رابطه (14) خواهد بود :

$$\theta_{i1=}q_{i1+}q_{i2} \quad (14)$$

در نهایت با دو بار استفاده از قضیه کسینوس‌ها، مقدار θ_{i2} به‌صورت رابطه (15) به دست می‌آید:

$$\theta_{i3} = \cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{x^2 + z^2 + {l_1}^2 - {l_2}^2}}{2l_1}\right) \mp \cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{x^2 + z^2 + {l_1}^2 - {l_2}^2}}{2l_2}\right) \quad (15)$$

می‌توان ثابت کرد که درصورتی‌که مختصاتی، درون فضای کاری ربات نباشد، به ازای این مختصات، حداقل یکی از زوایای به‌دست آمده فرم مختلط به خود می‌گیرد. این شرط برای بررسی اینکه آیا یک نقطه از فضا درون فضای کاری ربات هست یا خیر به کار گرفته شده است. به این ترتیب فضای اطراف ربات به‌صورت نقطه‌هایی در نظر گرفته شدند و برای هر یک از این نقاط مسأله سینماتیک معکوس حل گردید. اگر جواب‌های به‌دست آمده فرم مختلط نداشتند، نقطه مورد نظر درون فضای کاری ربات قرار دارد. درنهایت دسته معادلات فوق به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی شدند که یک نمونه از خروجی آن در شکل 6 نشان داده شده است.

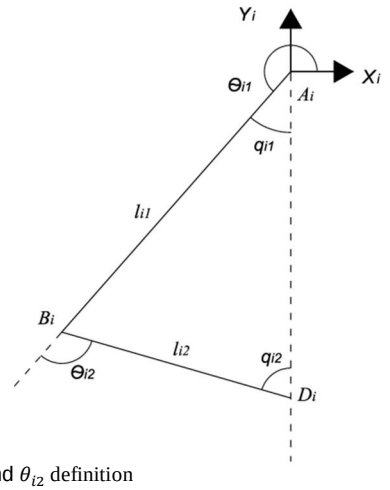

Fig. 5 $\theta_{i1}$and θ_{i2} definition

شکل 5 تعریف زوایای θ_{i2} و θ_{i1}

4- قیود مسأله

در واقعیت برای به دست آوردن فضای کاری یک ربات باید قیدهای مسأله را نیز در نظر گرفت. به‌منظور به دست آوردن فضای کاری بهینه ربات، قیود زیر برای مسأله در نظر گرفته شدند.

قیدهای مربوط به حداکثر زاویه مفاصل از رابطه (16) عبارتند از:

$$\begin{matrix} 135 \le \theta_{i1} \le 360 \\ 0 \le |\theta_{i2}| \le 160 \\ 0 \le |\theta_{i3}| \le 60 \end{matrix} \quad (16)$$

رابطه (17) قید عدم وجود تکینگی را نشان می دهد:

$$\det(\mathrm{J}) \neq 0 \quad (17)$$

در رابطه (17) J ماتریس ژاکوبین ربات است.

قید حداقل و حداکثر فاصله مجری نهایی از پایه مطابق رابطه (18) است:

$$0.5 \le z \le 1 \quad (18)$$

قید قرار گرفتن مجری نهایی در پایین‌ترین سطح نسبت به شاخه‌های ربات (برای جلوگیری از برخورد شاخه‌ها به سطح کار) با رابطه (19) نشان داده می‌شود:

$$\theta_{i1} + \theta_{i2} \le 360 \quad (19)$$

در نهایت مسأله بهینه‌سازی فضای کاری ربات باوجود قیدهای ذکرشده و ابعاد رابطه (20) توسط الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی به دست آمد. هدف از بهینه‌سازی پیدا کردن طول‌های بهینه برای عضوهای ربات L_1 و L_2 است.

$$\begin{cases} R = 0.3 \\ r = 0.15 \end{cases} \quad (20)$$

همچنین با استفاده از الگوریتم هوش ازدحامی با همان قیود و شرایط قبل یک‌بار دیگر طول عضوها محاسبه و نتایج باحالت قبل مقایسه شد.

5- طراحی بهینه و مشخصه‌های فضای کار

اگر $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}$ که در آن $i = 1,2,3,4$ مجموعه‌ی از زاویه‌ها باشند که مجری نهایی ربات را به فضای سه‌بعدی $\mathcal{S}$ منتقل می‌کند که در آن مطابق رابطه (21):

$$\mathcal{S} \subset \Re 3 \quad (21)$$

هدف از بهینه‌سازی یافتن پارامترهایی از ربات موازی آن است که فضای تعریف شده $\mathcal{S}$ در فضای سه‌بعدی دکارتی مطابق رابطه (22) بیشینه شود:

$$\mathcal{S} \equiv \max \begin{Bmatrix} x|\ X_{\min} \le x \le X_{\max} \\ y|\ Y_{\min} \le y \le Y_{\max} \\ z|\ Z_{\min} \le z \le Z_{\max} \end{Bmatrix} \quad (22)$$

به‌طوری که قیود رابطه (23) را نیز پوشش دهد:

$$\begin{matrix} 135 \le \theta_{i1} \le 360 \\ 0 \le |\theta_{i2}| \le 160 \\ 0 \le |\theta_{i3}| \le 60 \end{matrix} \quad (23)$$

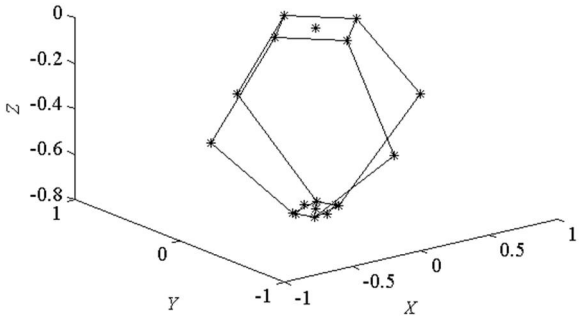

Fig. 6 Parallel robot (Quatrotaar)

شکل 6 شبیه‌سازی ربات موازی چهار شاخه

یکی از مواردی که در انعطاف‌پذیری ربات در شرایط کاری نقش تعیین‌کننده‌ای دارد، میزان دوران مجری نهایی ربات است؛ بنابراین این ربات موازی برای دوران تا 90 درجه $(-\pi/4 \le \theta \le \pi/4)$ در همه‌ی فضای کاری طراحی شد که به‌طور عمده‌ای توانایی مهارتی مجری نهایی را بهبود می‌دهد.

مورد دیگری که تأثیر آن در فضای کاری ربات بررسی شد، زاویه ζ یعنی زاویه‌ای است که دوشاخه انتهایی مقابل را دوبه‌دو با یک خط فرضی به هم وصل می‌کند. شکل 4 این زاویه را نشان می‌دهد. این زاویه از دو نقطه نظر بررسی شد. ابتدا تأثیر آن بر پیکره‌بندی ربات و سپس اثر آن بر تشکیل نقاط تکینه در فضای جستجوی کاری بررسی شد. با توجه به آنکه الگوریتم‌هایی که استفاده شد از نوع الگوریتم‌های جستجوی سراسری بود، شاخص Ψ را که تعداد نقاط مناسب فضای کاری به‌کل تعداد نقاط جستجو شده است تعریف می‌شود. نتایج تأثیر این زاویه در شاخص Ψ در جدول 1 آورده شده است. مشاهده می‌شود بهترین وضعیت برای بیشینه کردن نقاط مطلوب کاری در زاویه‌های 20 تا 30 درجه است، اما مورد دیگر که در این طراحی باید موردتوجه قرار می‌گرفت، فضای حرکتی مناسب برای مکانیزم موازی این ساختار است. بازوها در موقعیت‌های متفاوت باید فضای مناسبی را داشته باشند تا به یکدیگر برخورد نکنند؛ بنابراین زاویه 60 درجه برای این طرح انتخاب شد که مقدار مناسبی هم از شاخص تعریف شده دارد.

ابتدا حل مسأله با اجرای الگوریتم کلونی زنبورعسل انجام شد، برای پیدا کردن مقادیر بهینه متغیرهای جستجو یعنی طول‌های دو عضو ربات، نتایج زیر حاصل شدند.

در شکل 7 مقدار تابع هزینه برای 20 بار تکرار نشان داده شده است. در شکل 8 نیز مقدار طول عضوهای اول و دوم است که به ازای هر بار تکرار الگوریتم یافت شده‌اند. در نهایت، الگوریتم به مقادیر زیر همگرا شده است.

$$\begin{cases} L_1 = 0.6076 \\ L_2 = 0.7328 \end{cases}$$

در شکل 9 نیز فضای کاری بهینه حاصله به ازای طول‌های به‌دست آمده از بهینه‌سازی و قیدهای شرح داده شده در قسمت‌های قبل مشاهده می‌شود. همچنین این مسأله برای روش جستجوی هوش ازدحامی ذرات نیز بررسی شد و نتایج زیر به دست آمد. مقدار تابع هزینه در شکل 10 آمده است. مقادیر به‌دست‌آمده برای طول عضوهای ربات نیز در شکل 11 نشان داده شده است. مقادیر عددی نهایی طول عضوها به ترتیب زیر است:

$$\begin{cases} L_1 = 0.6162 \\ L_2 = 0.7396 \end{cases}$$

فضای کاری ربات موازی چهار شاخه نیز در شکل 12 نشان داده شده است. همچنین جدول 2 مقادیری را نشان می‌دهد که از دو الگوریتم جستجو برای ربات موازی چهار شاخه به‌دست‌آمده‌اند. تشابه قابل قبول مقادیر با مقایسه مقادیر معلوم می‌شود.

6- ساخت ربات چهار شاخه

پس از طراحی ربات و به دست آوردن متغیرهای طراحی ربات چهار شاخه به‌طور کامل در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات ساخته شد. در این فرایند تا حدی که ممکن بود مواد و قطعات به‌گونه‌ای طراحی و ساخته شدند که کمینه وزن را داشته باشند و بتوانند با استحکام مناسبی در شتاب‌های و سرعت‌های بالای عملکردی ربات داشته باشند تا با ایجاد نسبت بار به وزن بالاتر عملکرد ربات را بهبود بخشند. با توجه به عملکرد ربات در سرعت و شتاب‌های بالا استفاده از مواد آلیاژی و الیافی مانند آلومینیوم آنودایز شده و

جدول 1 تأثیر زاویه ζ بر شاخص ψ

Table 1 Angle effect ζ to ψ index.

Z درجه	15	20	30	45	60	90
شاخص ψ	0.920	0.923	0.923	0.915	0.908	0.899

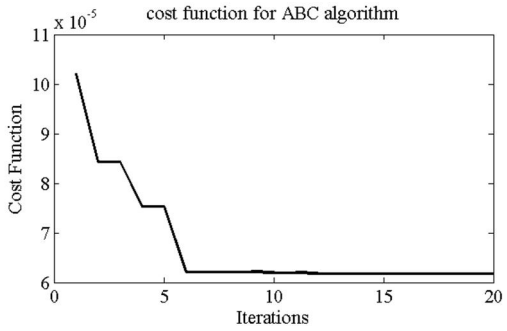

Fig. 7 cost function for ABC algorithm

شکل 7 مقدار تابع هزینه درروش الگوریتم زنبورعسل

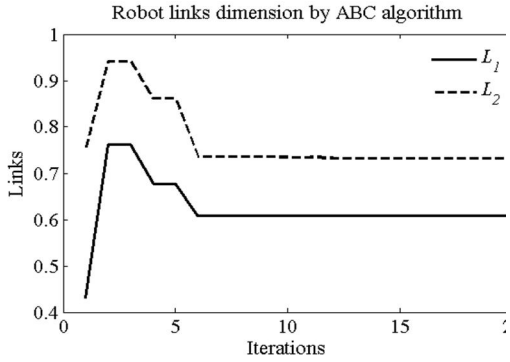

Fig. 8 Robot links dimension by ABC algorithm

شکل 8 مقادیر طول عضوهای ربات درروش الگوریتم زنبورعسل

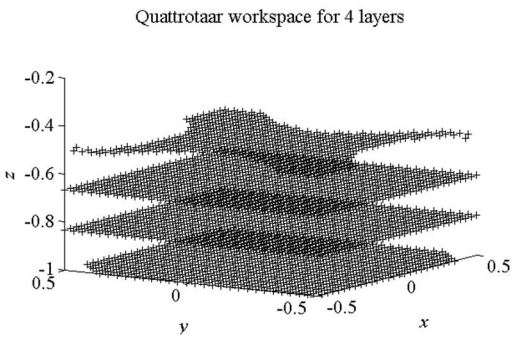

Fig. 9 Optimum work space by ABC algorithm

شکل 9 فضای کاری بهینه ربات برای حل به روش زنبورعسل

فیبر کربن در عین افزایش استحکام بدنه و قطعات ربات، باعث کاهش وزن و درنتیجه بهبود این مهم می‌گردد. برخی از مراحل مهمی که در ساخت ربات انجام شده به ترتیب زیر است:

6-1- استفاده از فیبر کربن

با توجه به آنکه اساس طراحی این ربات به‌کارگیری در شتاب‌ها و سرعت‌های بالا است کاهش وزن ربات همزمان با استحکام و سختی بالای قطعات برای افزایش شتاب‌گیری بسیار اهمیت دارد، بنابراین در طراحی این ربات هم عملگرها که وزن قابل‌توجهی دارند روی پایه ثابت وصل شده است تا از اعمال بار آن بر ساختار ربات اجتناب شود و هم عضوها به جای مواد متداول فیبر

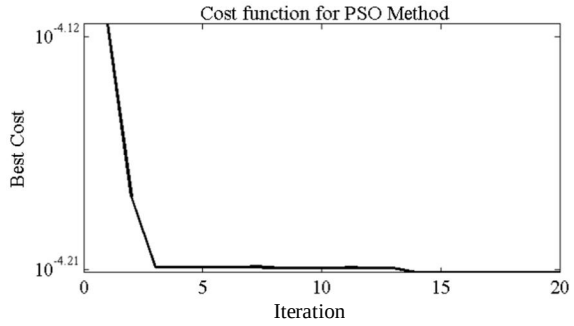

Fig. 10 Cost function for PSO Method

شکل 10 مقدار تابع هزینه درروش PSO

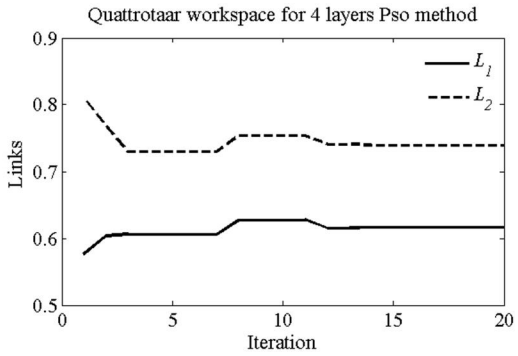

Fig. 11 Robot link dimension by PSO algorithm

شکل 11 مقادیر طول عضوهای ربات درروش PSO

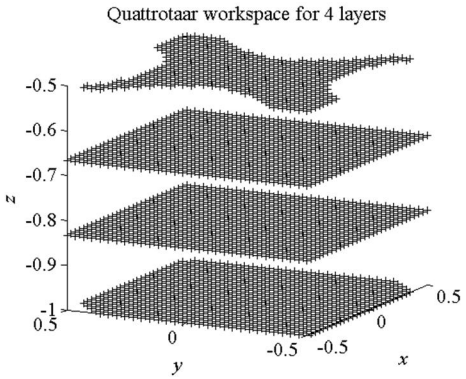

Fig. 12 Optimum workspace for PSO algorithm

شکل 12 فضای کاری بهینه ربات برای حل به روش PSO

جدول 2 مقایسه طول بازوهای ربات با دو روش ABC و PSO

Table 2 Robot links comparison for ABC and PSO method

بازو	ABC	PSO	اختلاف
L_1	0.6076	0.6162	0.008
L_2	0.7328	0.7396	0.0068

کربن طراحی و استفاده شد که علاوه بر آنکه وزن را به مقدار بسیار زیادی کاهش داد از استحکام بسیار مناسبی هم برخوردار است. شکل 13 عضوهای ربات که از فیبر کربن ساخته شده‌اند را نشان می‌دهد.

6-2- جانمایی یاتاقان‌ها و کوپلینگ متصل به موتور

موتورهای الکتریکی متصل به ربات باید سرعت عمل بالایی داشته باشند که این موضوع به دلیل شتاب بالای طراحی شده ربات است. برای حفاظت فیزیکی از اعمال بارهای وارده بر موتورها که ممکن است خواسته یا ناخواسته اعمال شود، مکانیزم یاتاقان مناسب این موضوع استفاده شد تا مانع از

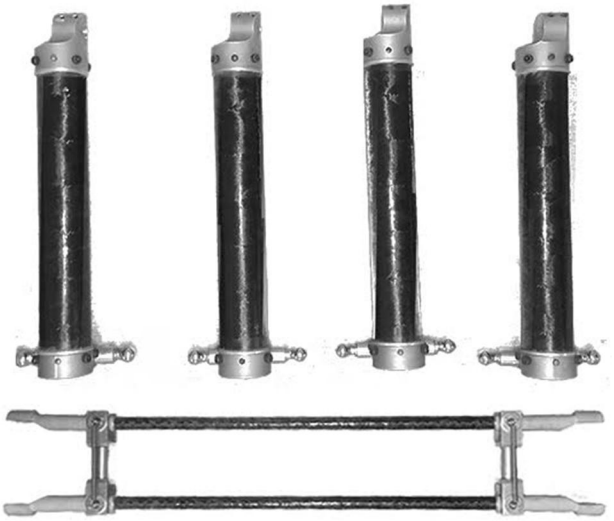

Fig 13 Robot Limbs material of Carbon fiber first limb(above) second limb(down)

شکل 13 عضوهای ربات از جنس فیبر کربن اولین عضو (بالا) دومین عضو (پایین)

آسیب‌دیدگی به ربات و موتورهای ربات شود. شکل 14 این اتصال را نشان می‌دهد.

3-6- افزودن فنر برای اعمال نیروی نگه‌دارنده به اتصالات کروی

از آنجا که اتصالات استفاده شده در این ربات از نوع کروی است برای اعمال فشار لازم به نشیمن‌گاه‌ها از مجموعه‌ای از فنرهای فشاری استفاده شد تا نیروی لازم برای نگهداری عضوها و اتصالات را کنار هم تأمین کند. هرچند که در طراحی فنرها به این نکته توجه شده است که اعمال نیروها باعث افزایش نیروهای اصطکاکی و مسائل مربوط به آن نشود. همچنین اضافه شدن این فنرها باعث کاهش لقی‌های لینک‌های متحرک شده که خود زمینه‌ساز افزایش دقت ربات برای انجام عملیات مختلف است. شکل 15 فنر مونتاژ شده را نشان می‌دهد.

4-6- اضافه کردن دوران مجری نهایی تا 180 درجه چرخش

از آنجا که انعطاف‌پذیری دسترسی به فضای کاری اهمیت زیادی دارد با جاسازی مکانیزم چرخنده‌ای مقدار چرخش مجری نهایی را از 90 درجه به 180 درجه افزایش داده شد. این مقدار توانایی مهارتی حرکتی بسیار مناسبی را می‌تواند برای ربات در فضای کاری تعریف شده تأمین کند. شکل 16 این مکانیزم را نشان می‌دهد.

5-6- طراحی سیلندر و پیستون راهنمای بین دو عضو موازی

یکی از قطعات مهم در طراحی ساختار ربات استفاده از مکانیزمی است که بتواند پیکره‌بندی طراحی شده برای ربات را در همه شرایط کارکردی حفظ کرده و تضمین کند. در نهایت پس از تلاش‌هایی که برای این موضوع به عمل آمد ساختار کارآمدی از نوع سیلندر و پیستون به‌عنوان راهنمای بین دو عضو موازی ربات طراحی و استفاده شد تا پیکره‌بندی حرکت موازی دو عضو را همواره در شرایط کارکردی تأمین کند. با استفاده از این طراحی لینک‌های متوازی‌الاضلاع همیشه در داخل یک صفحه حرکت کرده و از صفحه خود خارج نمی‌شوند. علت استفاده از حالت سیلندر و پیستونی برای ایجاد امنیت مکانیکی برای قطعات دیگر در صورت خارج شدن سیستم از حالت عملکردی است. در واقع این سیلندر و پیستون‌ها در صورت تغییر در فاصله بین

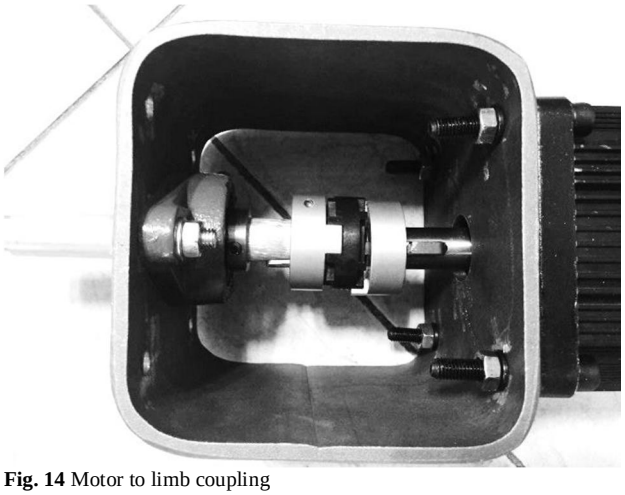

Fig. 14 Motor to limb coupling

شکل 14 کوپلینگ استفاده شده برای اتصال موتور به عضو ربات

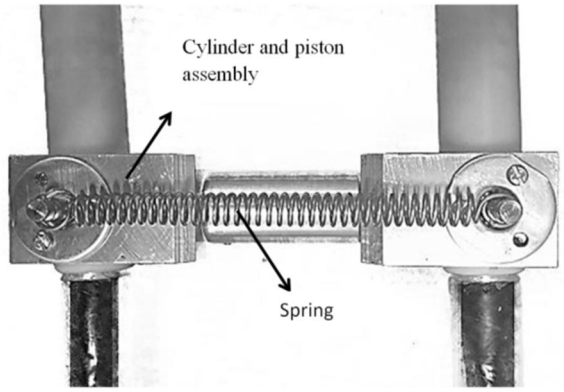

Fig 15 Assemble of cylinder and piston on robot limbs

شکل 15 سیلندر و پیستون راهنمای نصب شده بین دو عضو موازی

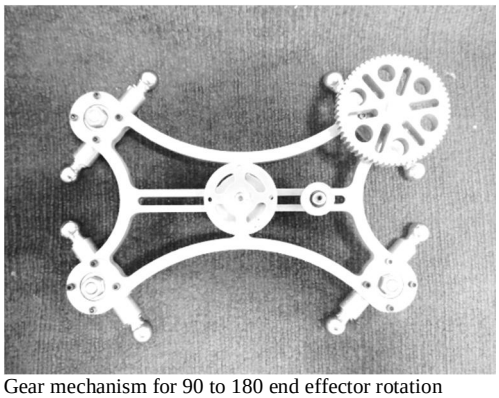

Fig 16 Gear mechanism for 90 to 180 end effector rotation

شکل 16 مکانیزم چرخ‌دنده‌ای تبدیل حرکت 90 درجه به 180 درجه

لینک‌های موازی در متوازی‌الاضلاع مقاومت چندانی از خود نشان نداده و درنتیجه لینک‌ها و اتصالات تحت تنش شدید قرار نخواهند گرفت که این امر باعث جلوگیری از افزایش استهلاک قطعات متحرک و در معرض آسیب می‌شود. شکل 15 نصب این مجموعه را روی عضوهای ربات نشان می‌دهد.

6-6- طراحی اتصالات تفلونی بین عضو اول و دوم و مجری نهایی

چگونگی اتصال عضوها که از فیبر کربنی ساخته شده‌اند، یکی از مواردی بود که در این مکانیزم ربات نیاز به طراحی مناسب و کارآمدی داشت. همان‌طور

که از شکل ربات ساخته شده معلوم است برخی از قطعات مربوط به انتهای عضوها و اتصالات مربوط به فنرها از جنس آلیاژ آلومینیوم طراحی و ساخته شده است. در این بین قطعه واسطی که دو عضو را به هم وصل می‌کند و عضو دوم را به مجری نهایی متصل می‌کند، از نظر ابعادی باید چنان باشد که بدون برخورد عضوها به یکدیگر در همه فضای کاری دامنه حرکتی را به شکل مطمئنی تضمین کند و از سویی دارای استحکام مناسب و قابل‌اطمینانی باشد. در این مرحله پس از طراحی ابعادی از تفلون به‌عنوان ماده‌ی مناسب این واسط استفاده شد (شکل 17). یکی از مزایایی که انتخاب تفلون دارد وزن مناسب (کم) آن است که در کارکرد کلی ربات که ملزم به کمینه وزن هستیم اهمیت زیادی می‌تواند داشته باشد. همچنین با توجه به حرکت با اصطکاک کمتر کره‌های فلزی بر روی تفلون نسبت به فلزات دیگر، استفاده از تفلون در ساختار اتصالات کروی به‌عنوان محفظه گردش کره منجر به کاهش اصطکاک و درنتیجه کارایی بهتر ربات گردیده است.

7- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، بهینه‌سازی فضای کاری عاری از تکینگی ربات چهار درجه آزادی توسط روش الگوریتم زنبورعسل مصنوعی و هوش ازدحامی ذرات که از جدیدترین روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر توده‌ها است، ارائه شد. از نتایج مشخص شد که برای فضای کاری مکعب شکل به ابعاد هندسی 500 mm × 500 mm × 500 mm (ارتفاع 500 mm تا 1000 mm) بهینه‌ترین ابعاد طول مکانیزم موازی که بیشینه نقاط مطلوب فضای کاری (نقاط عاری از تکینگی و قیود حرکتی) را داشته باشند از هر دو روش دارای تقریب مناسبی از دقت است. نکته قابل‌توجه آنکه نتایج برای زاویه دوران 90 درجه عمود بر راستای افق درحرکت شونفلایز به‌دست‌آمده است که انعطاف‌پذیری بسیار مناسبی به ربات در فضای کاری موردنظر می‌دهد. این انعطاف‌پذیری می‌تواند ویژگی مؤثری در کاربردهای عملی باشد. استفاده از این روش‌ها ابزاری کارا در حل چنین مسائل پیچیده‌ای است که پاسخ‌های مناسب و قابل قبولی را می‌دهد. یکی دیگر از مزایای این روش‌ها آن است که به‌سادگی با تعیین حدود فضای کاری برای هر مسأله بخصوص می‌توان به‌سرعت مسأله را با آن حدود و قیدهای مربوطه تطبیق داد. درمجموع با مقایسه نتایج مقاله باکارهای قبلی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش جستجوی سراسری مانند زنبورعسل مصنوعی یا روش PSO در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی رایج برای پیدا کردن فضای کاری بهینه ازجمله روش الگوریتم ژنتیک، دارای پیچیدگی‌های کمتر، تعداد پارامترهای کنترل محدودتر و بازدهی بهتر و یا مساوی است. از نقطه نظر سرعت همگرایی در میان دو روش کلونی زنبورعسل و PSO عملکرد روش PSO سریع‌تر بوده و در زمان کمتری به همگرایی می‌رسد. هرچند که این موضوع به متغیرهای زیاد سخت‌افزاری و نرم‌افزاری زیادی بستگی دارد ولی نتایج نشان داد در شرایط تقریبا یکسان در یک دستگاه 5 هسته‌ای زمان اجرا با 20 تکرار در الگوریتم برای روش PSO 10″ :57′ :57(57 دقیقه 10 ثانیه) و برای روش ABC 58″ :60′ (60 دقیقه و 58 ثانیه) زمان لازم است.

Fig 17 PTFE connetions between limbss

شکل 17 اتصالات تفلونی بین عضوهای ربات

8- تشکر و قدردانی

به این وسیله از دانشگاه آزاد واحد بهبهان که از طرح "طراحی یک ربات صفحه‌ای موازی افزونه با سه درجه آزادی با هدف استفاده در خط تولید وسایل الکترونیکی" حمایت کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

9- مراجع

[1] A. Ancuta, F. o. Pierrot, Design of lambda-quadriglide: A new 4-DOF parallel kinematics mechanism for Schönflies motion, *in ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Canada, Montréal, Aug 15-18, 2010.

[2] S. Amine, M. T. Masouleh, S. Caro, P. Wenger, C. Gosselin, Singularity conditions of 3T1R parallel manipulators with identical limb structures, *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 4, No. 1, pp. 011011, 2012.

[3] R. Clavel, Delta, A fast robot with parallel geometry, *18th internatinals symposium industrial robots*, Switzerland, Lausanne, April 26-28, 1988

[4] F. Xie, X.-J. Liu, Design and Development of a High-Speed and High-Rotation Robot With Four Identical Arms and a Single Platform, *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 7, No. 4, pp. 041015, 2015.

[5] F. Pierrot, O. Company, H4: a new family of 4-dof parallel robots, in Advanced Intelligent Mechatronics, *Proceedings. IEEE/ASME International Conference on*, USA, Atlanta, Sep 19-23,1999.

[6] O. Company, S. Krut, F. Pierrot, Internal singularity analysis of a class of lower mobility parallel manipulators with articulated traveling plate, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-11, 2006.

[7] O. Salgado, O. Altuzarra, V. Petuya, A. Hernández, Synthesis and design of a novel 3T1R fully-parallel manipulator, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 130, No. 4, pp. 042305, 2008.

[8] O. Altuzarra, B. Şandru, C. Pinto, V. Petuya, A symmetric parallel Schönflies-motion manipulator for pick-and-place operations, *Robotica*, Vol. 29, No. 06, pp. 853-862, 2011.

[9] S. M. Kim, W. Kim, B.-J. Yi, Kinematic analysis and optimal design of a 3T1R type parallel mechanism, *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*, Japan, Kobe, May 12-17, 2009

[10] Z. Li, Y. Lou, Y. Zhang, B. Liao, Z. Li, Type synthesis, kinematic analysis, and optimal design of a novel class of Schönflies-Motion parallel manipulators, *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, Vol. 10, No. 3, pp. 674-686, 2013.

[11] Y. Wan, G. Wang, S. Ji, J. Liu, A survey on the parallel robot optimization, *in Intelligent Information Technology Application, IITA'08. Second International Symposium on*, China, Shanghai, Dec 20-22, 2008.

[12] J.-P. Merlet, Designing a parallel manipulator for a specific workspace, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 16, No. 4, pp. 545-556, 1997.

[13] R. E. Stamper, L.-W. Tsai, G. C. Walsh, Optimization of a three DOF translational platform for well-conditioned workspace, *in Robotics and Automation, Proceedings., IEEE International Conference on*, USA, Albuquerque, April 20-25, 1997.

[14] R. Boudreau, C. Gosselin, The synthesis of planar parallel manipulators with a genetic algorithm, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 121, No. 4, pp. 533-537, 1999.

[15] M. Stock, K. Miller, Optimal kinematic design of spatial parallel manipulators: *application to linear delta robot, Journal of Mechanical Design*, Vol. 125, No. 2, pp. 292-301, 2003.

[16] D. Chablat, P. Wenger, F. Majou, J.-P. Merlet, An interval analysis based study for the design and the comparison of three-degrees-of-freedom parallel kinematic machines, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 23, No. 6, pp. 615-624, 2004.

[17] L.-W. Tsai, S. Joshi, Kinematics and optimization of a spatial 3-UPU parallel manipulator, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 122,

No. 4, pp. 439-446, 2000.
[18] M. Laribi, L. Romdhane, S. Zeghloul, Analysis and dimensional synthesis of the DELTA robot for a prescribed workspace, *Mechanism and machine theory*, Vol. 42, No. 7, pp. 859-870, 2007.
[19] E. Courteille, D. Deblaise, P. Maurine, Design optimization of a delta-like parallel robot through global stiffness performance evaluation, in Intelligent Robots and Systems, *IROS. IEEE/RSJ International Conference on*, USA, Sant. Louis, Oct 10-15, 2009.
[20] M. H. Saadatzi, M. T. Masouleh, H. D. Taghirad, C. Gosselin, P. Cardou, On the optimum design of 3-RPR parallel mechanisms, *in Electrical Engineering* (*ICEE*), *19th Iranian Conference on*, Iran, Tehran, May 17-19, 2011.
[21] M. Ahamdi Mousavi, M. Tale Masouleh, A. Karimi, On the maximal singularity-free ellipse of planar 3- parallel mechanisms via convex optimization, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 30, No. 2, pp. 218-227, 2014.
[22] G. Abbasnejad, H. Daniali, S. Kazemi, A new approach to determine the maximal singularity-free zone of 3-RPR planar parallel manipulator, *Robotica*, Vol. 30, No. 06, pp. 1005-1012, 2012.
[23] D. Bratton, J. Kennedy, Defining a standard for particle swarm optimization, *in Swarm Intelligence Symposium,. SIS 2007. IEEE*, Hawaii, Honolulu, April 1-5, 2007.
[24] C. Gosselin, J. Angeles, Singularity analysis of closed-loop kinematic chains, *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, Vol. 6, No. 3, pp. 281-290, 1990.