

Determination of Optimal Wrench-closure Configuration of Reconfigurable Cable-driven Parallel Robots to Move on a Given Trajectory

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Abbasnejad Gh.¹ PhD,
Tale-Masouleh M.*¹ PhD

How to cite this article

Abbasnejad Gh, Tale-Masouleh M. Determination of Optimal Wrench-closure Configuration of Reconfigurable Cable-driven Parallel Robots to Move on a Given Trajectory. Modares Mechanical Engineering. 2019 ;19(5):1085-1093.

¹Machine Intelligence & Robotics Department, Electrical & Computer Engineering Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Electrical and Computer Engineering School, University of Tehran, North Kargar Avenue, Tehran, Iran.

Phone: +98 (21) 61118413

Fax: -

t.masouleh@ut.ac.ir

Article History

Received: May 19, 2018

Accepted: November 22, 2018

ePublished: May 01, 2019

ABSTRACT

Because of the fact that cable-driven parallel robot possess limited moment resisting/exerting capabilities and relatively small orientation workspaces, in this paper, a method for determination of optimal configuration of reconfigurable cable-driven parallel robots is presented to improve their performance. In such robots, actuators can move the cable attachment points on the base with respect to the motion of the end-effector in its trajectory. In the determined configuration, any external wrench on the end-effector can be balanced, using cable forces for all poses near to a pose of the robot. The largest wrench-closure circular zone centered at an arbitrary point of a trajectory for a given range of orientation around a reference orientation of the end-effector is computed. Taking the area of such zone into account and with the aim of enlarging them, the optimal configuration of the robot is determined. The optimal configuration is found by appropriately changing the position of the moving attachment points on the base of the robots. By applying this procedure on a number of points on a given trajectory iteratively, proper actuation schemes are obtained. In this paper, this method is utilized for reconfigurable planar cable-driven parallel robots and the quality of their actuation schemes is compared with the robots with fixed cable attachment points on base.

Keywords Parallel Robot; Cable-Driven; Planar; Trajectory; Wrench-Closure

CITATION LINKS

[1] Modeling, optimal path planning and tracking control of a cable driven redundant parallel robot [2] Path planning of cable driven parallel robots in the presence of dynamic obstacles via potential field using computed torque control method [3] An experimental study on the vision-based control and identification of planar cable-driven parallel robot [4] Improvement of end-effector orientability capability in a serial-parallel cable robot [5] Applying evolutionary algorithms in multi objective optimization of planar cable-driven parallel robots [6] Direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots with n cables [7] Real solutions of the direct geometrico-static problem of under-constrained cable-driven parallel robots with 3 cables: A numerical investigation [8] Analysis of the wrench-closure workspace of planar parallel cable-driven mechanisms [9] On the design of adaptive cable-driven systems [10] Sophia-3: A semiadaptive cable-driven rehabilitation device with a tilting working plane [11] Tension distribution shaping via reconfigurable attachment in planar mobile cable robots [12] On the analysis of large-dimension reconfigurable suspended cable-driven parallel robots [13] Optimum kinematic design of a planar cable-driven parallel robot with wrench-closure gait trajectory [14] Orientation workspace and stiffness optimization of cable-driven parallel manipulators with base mobility [15] On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots [16] Analysis of the workspace of tendon-based Stewart platforms [17] Manipulability of a planar wire driven haptic device [18] A new approach to determine the maximal singularity-free zone of 3-RPR planar parallel manipulator [19] Determination of maximal singularity-free zones in the workspace of planar three-degree-of-freedom parallel mechanisms [20] Singularity-free workspace analysis of general 6-UPS parallel mechanisms via convex optimization [21] Determination of the maximal singularity-free workspace of 3-DOF parallel mechanisms with a constructive geometric approach [22] Optimal design and fabrication of a 4-DOF quattrotaar parallel robot with singularity-free workspace by ABC and PSO algorithms [23] The mechanical interference-free workspace of the planar parallel robots using geometric approach [24] Particle swarm optimization [25] Kinematic analysis and path planning of a new kinematically redundant planar parallel manipulator

تعیین پیکربندی بهینه با نیرو- گشتاور بسته ربات‌های موازی کابلی قابل انطباق برای حرکت بر مسیر داده‌شده

قاسم عباس‌نژاد PhD

گروه هوش ماشین و رباتیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مهدی طالع‌ماسوله PhD

گروه هوش ماشین و رباتیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

با توجه به یکی از معایب ربات‌های کابلی موازی در توانایی محدود تحمل گشتاور و فضای کاری دورانی نسبتاً کوچک، در این مقاله روشی برای تعیین پیکربندی بهینه ربات‌های کابلی موازی قابل انطباق با پایه‌های متحرک برای بهترکردن عملکرد این ربات‌ها ارائه می‌شود. در این ربات‌ها، مکان پایه‌های متحرک اتصال کابل‌ها با توجه به حرکت مجری نهایی بر مسیر آن توسط عملگرها تغییر داده می‌شوند. در پیکربندی تعیین‌شده، هر گشتاور- نیروی اعمالی بیرونی، با نیروهای اعمالی توسط کابل‌ها برای تمام موقعیت‌های مجری نهایی در نزدیکی موقعیتی از آن متعادل می‌شود. بزرگ‌ترین محدوده دایره‌ای گشتاور- نیروی بسته به مرکز یک نقطه دلخواه از مسیر برای یک محدوده مشخص دوران حول یک دوران مرجع محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن مساحت این ناحیه‌ها و با هدف بزرگ‌ترکردن آنها، پیکربندی بهینه با تغییر مناسب مکان پایه‌های متحرک اتصال کابل‌ها تعیین می‌شود. با اعمال این روش در تعدادی از نقاط در یک مسیر خاص، به‌طور تکراری، طرح‌های عملیاتی مناسب به دست می‌آید. در این مقاله این روش برای ربات‌های موازی صفحه‌ای کابلی قابل انطباق با پایه‌های متحرک، اعمال و کیفیت طرح‌های راه‌اندازی آنها با ربات‌هایی با پایه‌های ثابت مقایسه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: ربات موازی، کابلی، صفحه‌ای، مسیر حرکت، گشتاور- نیرو بسته

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۰۱

* نویسنده مسئول: m.t.masouleh@ut.ac.ir

۱- مقدمه

ربات‌های موازی کابلی، نوعی از ربات‌های موازی هستند که در آنها از کابل‌ها به‌عنوان عملگر برای حرکت یک یا چند عضو صلب استفاده می‌شود. ربات‌های موازی کابلی مزیت‌های شناخته‌شده‌ای که ربات‌های موازی در مقایسه با ربات‌های سری دارند، از جمله وزن کمتر عضوهای در حال حرکت، ظرفیت بار بزرگ‌تر نسبت به وزن ربات، عملکرد دینامیک پویاتر و غیره را تقویت می‌کنند و در عین حال، مزایای منحصربه‌فرد دیگری مانند امکان عملیات در فواصل زیاد، وزن کمتر، هزینه‌های ساخت و نگهداری کمتر، سهولت سرهم‌بندی و جداسازی و حمل و نقل بالا را به دست می‌دهند. به دلیل همین مزیت‌ها، ربات‌های موازی کابلی اخیراً مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در پژوهشی^[1] مدل‌سازی دینامیک، طراحی مسیر بهینه و کنترل یک ربات افزونه کابلی مورد مطالعه قرار گرفته و الگوریتمی برای جلوگیری از برخورد ربات با موانع در فضای کاری معرفی شده است. در پژوهش دیگری^[2]، تحلیل سینماتیک و دینامیک ربات‌های موازی کابلی صفحه‌ای در فرم کلی بررسی شده است و این معادلات برای یک ربات چهارکابلی صفحه‌ای در محیط شبیه‌سازی مکانیکی صحنه‌گذاری شده‌اند. در یک مطالعه^[3] کاربرد کنترل موقعیت ربات کابلی صفحه‌ای بر پایه بینایی مطالعه شده است. در مطالعه دیگری^[4]، مدلی مرکب از ربات موازی صفحه‌ای به همراه یک بازوی ۲ درجه آزادی ارائه شد که

زنجره سینماتیک سری اضافه‌شده به زنجره موازی کابلی، منجر به هم‌افزایی در این مدل مرکب می‌شود. در یک پژوهش^[5] با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی، طراحی بهینه چندهدفه ربات‌های کابلی ارائه شد. با توجه به این که در ربات‌های کابلی، کابل‌ها همیشه باید در حالت کششی قرار داشته باشند، وسعت فضای کاری کنترل‌پذیر ربات به‌عنوان معیاری برای طراحی بهینه ربات انتخاب شده است.

در ربات‌های موازی کابلی، زمانی که فقط تعدادی از درجات آزادی مجری نهایی کنترل شوند، به‌عنوان مقید ناکامل^[6] تعریف می‌شوند. در عوض، در این ربات‌ها وقتی تمام درجات آزادی مجری نهایی با کابل‌ها کنترل می‌شوند، مقید کامل^[7] نامیده می‌شوند. در این حالت با توجه به این واقعیت که کابل‌ها تنها قادر به تحمل نیروی کششی هستند، معمولاً به تعداد کابل‌های بیشتر از درجات آزادی مجری نهایی نیاز است. علاوه بر این، توانایی کابل‌ها برای ایجاد نیرو- گشتاور مورد نیاز در تمام درجات آزادی به مقدار زیادی بستگی به موقعیت مجری نهایی دارد. در نتیجه، رابطه بین موقعیت ربات و نیرو- گشتاور قابل اعمال در مجری نهایی یک مساله اساسی در ربات‌های کابلی موازی است. این مساله منجر به تعریف‌های متفاوتی از فضای کاری ربات‌های موازی کابلی می‌شود. یکی از این تعاریف رابطه بین موقعیت و نیرو- گشتاور در مجری نهایی، فضای کاری نیرو- گشتاور بسته است که یک ابزار قدرتمند برای طراحی در ربات‌های موازی کابلی را به دست می‌دهد. فضای کاری نیرو- گشتاور بسته مجموعه‌ای از موقعیت‌های مجری نهایی است که در آنها هر نیرو- گشتاور اعمالی را می‌توان با نیروهای کششی در کابل‌ها متعادل کرد. روشی جامع برای محاسبه این فضای کاری در یک پژوهش^[8] ارائه شده است. با استفاده از این روش، فضای کاری نیرو- گشتاور بسته با دوران ثابت مجری نهایی را می‌توان به‌طور دقیق به‌عنوان زیرمجموعه محدودی از سطوح با مرزهای تشکیل‌شده از منحنی‌های درجه دوم محاسبه نمود. در نتیجه، فضای کاری نیرو- گشتاور را می‌توان به‌عنوان فضای اشتراک محاسبه‌شده برای دوران‌های مختلف مجری نهایی در نظر گرفت. اما محاسبه هندسه دقیق فضای کاری می‌تواند پیچیده و زمان‌بر و شامل جزئیات غیرضروری برای هدف طراحی ربات‌های موازی کابلی باشد.

در عوض با صرف نظر از قسمت‌های کوچک از فضای کاری، تقریبی از هندسه و اندازه فضای کاری را می‌توان با هندسه‌های کوچک همچون دایره به دست آورد که منجر به محاسبه آسان و سریع فضای کاری می‌شود. این ساده‌سازی به‌خصوص زمانی که محاسبات تکراری اندازه فضای کاری مطلوب بوده، مورد علاقه است. با استفاده از یک روش ساده، ناحیه دایره‌ای اطراف یک نقطه دلخواه از فضای کاری از ربات محاسبه می‌شود. خصوصیت این ناحیه این است که تا زمانی که مجری نهایی در آن قرار دارد، برای یک محدوده دورانی از مجری نهایی ربات در ترکیب‌بندی نیرو- گشتاور بسته باقی می‌ماند. اما به‌عنوان ضعف ربات‌های موازی کابلی، در موقعیت‌ها و محدوده‌های دورانی از مجری نهایی، اندازه این ناحیه کوچک است یا وجود ندارد. قرارگیری ربات در ترکیب‌بندی نیرو- گشتاور برای محدوده‌های دورانی مجری نهایی حول یک دوران مطلوب و نزدیک مسیر حرکت آن دارای اهمیت است. از نظر ریاضی، این مساله را می‌توان به‌عنوان وجود ناحیه نیرو- گشتاور بسته برای تمام نقاط از مسیر حرکت آن تفسیر نمود. واضح است که بزرگ‌ترکردن این ناحیه‌ها منجر به یک ربات با ترکیب‌بندی نیرو- گشتاور بسته برای موقعیت‌هایی از مجری نهایی

در نظر گرفتن ربات انطباق‌پذیر، چگونگی پیدا کردن یک ترکیب‌بندی بهینه بیان می‌شود که برای یک نقطه اختیاری، بزرگ‌ترین این ناحیه را به دست دهد.

با تکرار این محاسبات برای تعدادی از نقاط بر یک مسیر حرکت مجری نهایی، چگونگی حرکت پایه‌های متحرک ربات برای قرارگیری ربات در ترکیب‌بندی بهینه با بزرگ‌ترین ناحیه نیرو-گشتاور بسته در طول مسیر حرکت مجری نهایی به دست می‌آید. در مقایسه با کارهای قبلی، در این مقاله برای اولین بار ترکیب‌بندی بهینه ربات انطباق‌پذیر صفحه‌ای با چهار پایه متحرک برای افزایش ناحیه نیرو-گشتاور بسته در طول مسیر حرکت مجری نهایی، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. افزایش تعداد پایه‌های متحرک در این ربات‌ها منجر به افزایش پیچیدگی محاسبه ترکیب‌بندی بهینه آنها می‌شوند. با توجه به این افزایش پیچیدگی، حل موثر مساله بهینه‌سازی مستلزم استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کاراتری بوده که به عنوان یکی از نوآوری‌های این مقاله به آن پرداخته شده است.

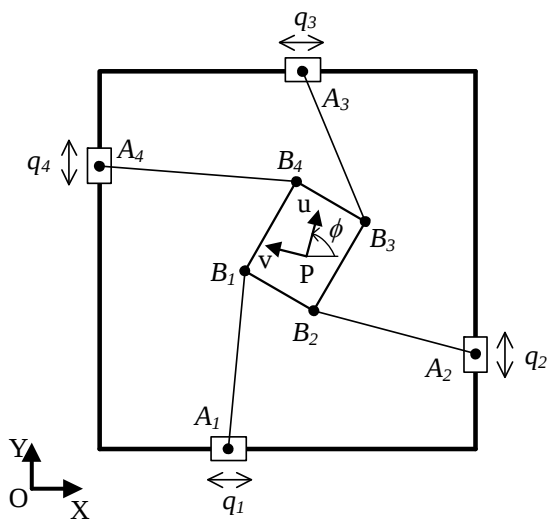
۲- مدل ریاضی ربات موازی کابلی

در این بخش برای تحلیل فضای کاری ربات موازی کابلی، مدل ریاضی آن ارائه می‌شود. ابتدا تحلیل سینماتیک این ربات شامل رابطه بین تغییر طول کابل‌ها و تغییر موقعیت مجری نهایی ارائه می‌شود. در ادامه، چگونگی محاسبه سطح مرزی نیرو-گشتاور بسته این ربات و در بخش آخر، محاسبه ناحیه دایره‌ای نیرو-گشتاور بسته در فضای کاری آورده می‌شود.

۲-۱- تحلیل سینماتیک ربات موازی کابلی

در اینجا ربات موازی کابلی انطباق‌پذیر با چهار کابل مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همان گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، کابل i ام برای ۴ کابل از یک طرف متصل به مجری نهایی در نقاط $A_i = [b_{i1} \ b_{i2}]^T$ و از طرف دیگر به نقاط A_i متحرک بر چارچوب پایه‌ها متصل هستند، به طوری که:

$$\begin{aligned} A_1 &= [a_{11} \ a_{12}]^T + [q_1 \ 0]^T \\ A_2 &= [a_{21} \ a_{22}]^T + [0 \ q_2]^T \\ A_3 &= [a_{31} \ a_{32}]^T + [q_3 \ 0]^T \\ A_4 &= [a_{41} \ a_{42}]^T + [0 \ q_4]^T \end{aligned} \quad (1)$$



شکل ۱) مدل شماتیک ربات قابل انطباق با چهار کابل

در مساحت بزرگ‌تر اطراف مسیر حرکت ربات می‌شود که می‌تواند هدف طراحی باشد. با در نظر گرفتن افزایش اندازه ناحیه نیرو-گشتاور برای تعداد به اندازه کافی از موقعیت‌های مجری نهایی و در مسیر حرکت آن به عنوان هدف بهینه‌سازی، طراحی یک ربات مورد بررسی قرار می‌گیرد. اما در بسیاری از موارد، چنین طرح‌هایی از ربات‌های معمول موازی کابلی با پایه‌های ثابت، نتیجه مطلوب طراحی را به دست نمی‌دهند. در نقطه مقابل، در ربات‌های موازی کابلی با پایه‌های متحرک ساختار هندسی ربات با تغییر مکان نقاط اتصال کابل‌ها به پایه‌ها، قابل تنظیم است و فضای کاری بزرگ‌تری را نتیجه می‌دهد. ربات‌های موازی کابلی قابل انطباق اخیراً مورد توجه قرار گرفته‌اند. در پژوهشی^[9] مفهوم سیستم‌های کابلی قابل انطباق برای قاعده‌مند کردن یک روش طراحی جدید معرفی شد. براساس یک جداسازی کلی یا جزیی بین وضع قرارگیری کابل‌ها و موقعیت مجری نهایی، این روش اجازه دستیابی به یک راه‌حل طراحی را می‌دهد که بعضی از شاخص‌های عملکرد محلی همچون معیار کشش کابل‌ها یا مهارت ربات‌های کابلی را کمینه یا بیشینه می‌کند. در یک مطالعه^[10]، رابط لامسه‌ای صفحه‌ای با عملکرد کابلی برای توانبخشی بازو (سوفیا-۳) به عنوان اولین کاربرد ربات‌های کابلی موازی قابل انطباق معرفی شد. سوفیا-۳ یک ربات موازی کابلی مقید کامل با ۲ درجه آزادی و شامل سه کابل با نقطه اتصال یکسان در مجری نهایی است. دو کابل با قرقره‌های ثابت جمع می‌شوند، در حالی که کابل سوم به یک قرقره متحرک متصل است که به ربات اجازه دستیابی به قابلیت نیروی خوب علی‌رغم تعداد کم کابل‌ها را می‌دهد. در مطالعه دیگری^[11] یک چارچوب تجزیه و تحلیل برای ربات‌های قابل انطباق ارائه شد. روش ارائه‌شده، بهبود توزیع کشش کابل‌ها را با تصحیح پیکربندی این سیستم‌ها براساس معیار کشش در فضای کاری بررسی می‌کند. در پژوهشی^[12] نوع جدیدی از ربات‌های موازی کابلی قابل انطباق معلق با ابعاد بزرگ به عنوان وسیله‌ای برای انتقال قطعات بزرگ و سنگین در یک فضای کاری گسترده معرفی شد. در پژوهش دیگری^[13] یک روش نظام‌مند برای حل مساله یافتن ترکیب‌بندی بهینه برای این ربات، ارائه و نشان داده شد که قابلیت انطباق ربات ارائه‌شده عملکرد بهتری از لحاظ فضای کاری، انعطاف‌پذیری و مصرف قدرت به دست می‌دهد. همچنین استفاده از ربات‌های انطباق‌پذیر با پایه‌های متحرک که منجر به افزونگی سینماتیک می‌شود، برای بهبود عملکرد آن معرفی شد^[14]. در این مقاله نیز از شاخص معیار کشش کابل‌ها برای ارزیابی کیفیت فضای کاری استفاده شد.

علی‌رغم تحقیقات انجام‌شده در زمینه بهبود عملکرد ربات‌های موازی کابلی، روش‌های ارائه‌شده ناحیه‌هایی از فضای کاری که در آن ربات قادر به اعمال هر نیرو-گشتاوری بر مجری نهایی تنها با نیروی کششی در تمام کابل‌ها باشد را به دست نمی‌دهند. این مساله بدین دلیل حایز اهمیت است که در بسیاری از مواقع در عمل، مجری نهایی در یک ربات از مسیر تعیین‌شده منحرف می‌شود. در این موارد، طراح باید از حداکثر میزان مجاز انحراف از مسیر آگاهی داشته باشد. همچنین رباتی که در آن انحراف بیشتر از مسیر امکان‌پذیر باشد، دارای عملکرد بهتری بوده و برای طی مسیر مناسب‌تر است.

بدین منظور در این مقاله ابتدا برای هر نقطه اختیاری از یک مسیر داده‌شده، محاسبه ناحیه دایره‌ای نیرو-گشتاور بسته ارائه می‌شود که در آن برای یک محدوده دورانی از مجری نهایی امکان اعمال هر نیرو-گشتاوری با نیروی کششی در کابل‌ها باشد^[15]. با

$$\exists z \in \ker(M) \text{ such that } z > 0 \quad (6)$$

حال متغیرهای z_{0i} را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$z_{0i} = (-1)^{i+1} \det(M_i) \quad i = 1, 2, \dots, 4 \quad (7)$$

به طوری که M_i زیر ماتریس M است و با حذف i امین ستون ماتریس M به دست می‌آید. در یک مطالعه [8] نشان داده شده که وقتی شرط لازم در رابطه ۵ برقرار باشد، شرط کافی، رابطه ۶، هم‌ارز با رابطه زیر است:

$$z_0 > 0 \text{ or } z_0 < 0 \quad (8)$$

where

$z_0 = [z_{01} \ z_{02} \ z_{03} \ z_{04}]^T$
این رابطه تا حد زیادی، ارزیابی برقراری شرط کافی نیرو-گشتاور بسته را آسان می‌کند. در هر حال، تنها مساله مورد نظر در این روابط، علامت z_{0i} ، عناصر بردار z_0 تعریف شده در رابطه ۷ است.

۲-۲- سطح مرزی نیرو-گشتاور بسته ربات موازی کابلی با چهار کابل

برای یک موقعیت از مجری نهایی، ربات موازی کابلی با چهار کابل نشان داده شده در شکل ۱ در ترکیب بندی نیرو-گشتاور بسته قرار دارد، اگر و فقط اگر شرط لازم در رابطه ۵ برقرار شود و تمام توابع z_{0i} دارای علامت یکسان باشند. از این شرط، مرز ناحیه نیرو-گشتاور بسته می‌تواند به عنوان تمام نقاط در فضای کاری ربات مربوط به ترکیب بندی‌هایی تعریف شود که در آن حداقل یکی از توابع z_{0i} برابر صفر و مابقی آن توابع دارای علامت یکسان باشند. بنابراین $z_{0i} = 0$ مرز ممکن ناحیه نیرو-گشتاور بسته را توصیف می‌کند.

برای یک هندسه ثابت، هر یک از رابطه‌های z_{0i} توابعی از متغیرهای x, y, ϕ, q_i هستند. با ثابت در نظر گرفتن دوران مجری نهایی، $\phi = C$ و نیز مقدار ثابت حرکت خطی نقاط اتصال کابل‌ها،

q_i هر یک از این توابع به روابط چندجمله‌ای درجه ۲ بر حسب x, y ، موقعیت خطی نقطه P مجری نهایی تبدیل می‌شوند. همان گونه که در نمودار ۱ نشان داده شده است، از نظر هندسی، این توابع یک گروه از منحنی‌ها در صفحه $x-y$ هستند که در واقع، مرز ناحیه نیرو-گشتاور بسته را توصیف می‌کنند. در پژوهشی [8] توضیح داده شده که این منحنی‌ها دارای مطابقت نزدیکی با مرز ناحیه عاری از تکیگی در ربات‌های موازی صفحه‌ای هستند. به طور مشابه، در این مکانیزم‌ها مرز ناحیه عاری از تکیگی برای دوران ثابت مجری نهایی می‌تواند با توابع درجه ۲ توصیف شود. در هر دوی این موارد، اگر یک محدوده از دوران مجری نهایی در نظر گرفته شود، این منحنی‌ها را می‌توان با سطوح منحنی در مختصات $\phi - y - x$ توصیف نمود. شکل ۲ نمونه‌ای از این سطوح مرزی را برای یک ربات موازی کابلی صفحه‌ای با ۴ کابل را نشان می‌دهد. همان گونه که در مطالعات مختلف [18-23] آورده شده است، با کمک سطوح مشابه عاری از تکیگی مکانیزم‌های موازی، یک ناحیه با هندسه مشخص محاط در ناحیه عاری از تکیگی را می‌توان محاسبه نمود. برای مثال در پژوهشی [23] یک روش براساس الگوریتم بهینه‌سازی هوش ازدحامی برای محاسبه شعاع یک هندسه دایره‌ای محاط در فضای کاری عاری از تکیگی یک مکانیزم صفحه‌ای ۳ درجه آزادی معرفی شد. در ادامه به کارگیری این روش

در رابطه ۱، متغیرهای q_i مربوط به حرکت خطی نقاط اتصال کابل‌ها بر چارچوب پایه است. برای تحلیل ربات، دستگاه مختصات ثابتی با محورهای مختصات Y, X در نقطه O زمین و دستگاه مختصات متحرکی با محورهای مختصات V, U در نقطه P به مجری نهایی متصل است. طول کابل ρ_i ، به عنوان فاصله بین نقاط A_i و B_i در یک ترکیب بندی از ربات تعریف می‌شود. موقعیت خطی مجری نهایی نسبت به چارچوب پایه با برداری از نقطه O به P تعریف و به صورت $x = [x \ y]^T$ نشان داده می‌شود، در حالی که دوران مجری نهایی با متغیر ϕ نشان داده شده است که به عنوان زاویه بین محورهای مختصات X و U تعریف می‌شود. دوران مجری نهایی نسبت به چارچوب پایه با ماتریس دوران به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (9)$$

a_i بردار از نقطه O به A_i در دستگاه متصل به زمین و b_i بردار از نقطه P به B_i در دستگاه متصل به مجری نهایی تعریف می‌شوند. با استفاده از ماتریس دوران تعریف شده در رابطه ۹، بردار b_i در دستگاه مختصات متصل به زمین به صورت $r_i = B_i - P = Rb_i$ تعریف می‌شود و نیز بردار s_i را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$s_i = B_i - A_i = x + Rb_i - a_i \quad (10)$$

فرض بر این است که بر مجری نهایی، یک نیروی صفحه‌ای در نقطه P و یک گشتاور در امتداد محور عمود بر صفحه آن اعمال شده و با متغیر $\mathcal{L}_e$ نشان داده شده است. بردار پلوکر نرمال خط مربوط به کابل i ام با $\mathcal{L}_i/\rho_i$ نشان داده شده، به طوری که $s_i \times r_i = -[s_i; r_i]$ نیرو-گشتاور اعمال شده توسط کابل i ام بر مجری نهایی با $(\tau_i/\rho_i)\mathcal{L}_i$ است که در آن τ_i نیروی مثبت عددی نشان دهنده اندازه نیروی کششی کابل‌ها است. اگر نیرو-گشتاور $\mathcal{L}_e$ با مجموع نیرو-گشتاورهای اعمالی از کابل‌ها متعادل شود، رابطه ماتریسی زیر برقرار است:

$$\underbrace{[\mathcal{L}_1 \ \mathcal{L}_2 \ \mathcal{L}_3 \ \mathcal{L}_4]}_M \underbrace{\begin{bmatrix} \tau_1/\rho_1 \\ \tau_2/\rho_2 \\ \tau_3/\rho_3 \\ \tau_4/\rho_4 \end{bmatrix}}_t - \mathcal{L}_e = 0 \quad (11)$$

ماتریس M وابسته به پارامترهای موقعیت x و دوران ϕ مجری نهایی و همچنین متغیرهای q_i مربوط به حرکت خطی نقاط اتصال کابل‌ها بر چارچوب پایه است. با استفاده از این مدل ریاضی در یک ترکیب بندی نیرو-گشتاور بسته از ربات، برای هر نیرو-گشتاور اعمالی $\mathcal{L}_e$ ، حداقل یک بردار $t \geq 0$ وجود دارد، به طوری که $Mt = \mathcal{L}_e$ است. در اینجا $v \geq 0, v > 0, v < 0$ نشان دهنده این بوده که تمام عناصر v کوچک‌تر از صفر، بزرگ‌تر از صفر و بزرگ‌تر مساوی صفر است. در مطالعات مختلف [15-17] نشان داده شده که شرط لازم برای این ترکیب بندی از ربات به صورت زیر است:

$$\text{rank}(M) = 3 \quad (12)$$

که دلالت بر این دارد که ماتریس M مرتبه کامل است. اما این شرط برای اطمینان از نیروی کششی در تمام کابل‌ها که لزوماً به علت ویژگی ذاتی کابل‌ها باید در نظر گرفته شود، کفایت نمی‌کند. به همین دلیل یک شرط کافی به صورت زیر نیز لازم است:

از طرف دیگر، ناحیه دایره‌ای یک تقریب ساده از ناحیه دقیق نیرو-گشتاور بسته به‌عنوان اشتراک این ناحیه‌ها برای دوران‌های مختلف مجری نهایی است. از آنجایی که هندسه دقیق این ناحیه ممکن است غیرمعمول باشد، محاسبه اندازه آن می‌تواند مشکل و چالش‌برانگیز باشد. در اینجا یک الگوریتم ساده برای جایابی این دایره ارائه می‌شود.

این مساله می‌تواند به جایابی ناحیه دایره‌ای با بزرگ‌ترین شعاع به مرکز نقطه C_0 و محاط در ناحیه نیرو-گشتاور بسته ساده‌سازی شود. به این منظور، برای یک دوران ثابت مجری نهایی، نقطه‌ای بر منحنی مرز ناحیه نیرو-گشتاور بسته از ربات موازی کابلی انطباق‌پذیر با ۴ کابل با کمترین فاصله نسبت به نقطه C_0 را می‌یابیم. برای یک مقدار ثابت $\emptyset$ ، این کار معادل جست‌وجو برای دو متغیر x و y بوده که با یکی از روابط $z_{0i} = 0$ محدود شده، به‌طوری که دارای کمترین فاصله نسبت به C_0 است.

با بسط این مساله برای محدوده‌ای از دوران مجری نهایی، نقطه‌ای بر سطح مرز ناحیه نیرو-گشتاور بسته از ربات با کمترین فاصله نسبت به نقطه C_0 را می‌یابیم. به‌طور مشابه برای یک محدوده دوران $[\emptyset \emptyset]$ این کار معادل جست‌وجو برای سه متغیر x ، y و $\emptyset$ بوده که با یکی از روابط $z_{0i} = 0$ محدود بوده و دارای کمترین فاصله نسبت به C_0 است. در واقع، از نظر ریاضیاتی، این مساله منجر به حل یک مساله بهینه‌سازی تعریف‌شده به‌صورت زیر است:

$$\min d_{\min}^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$$

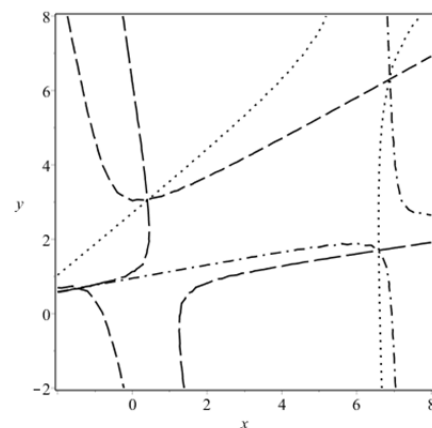
While:

(۹)

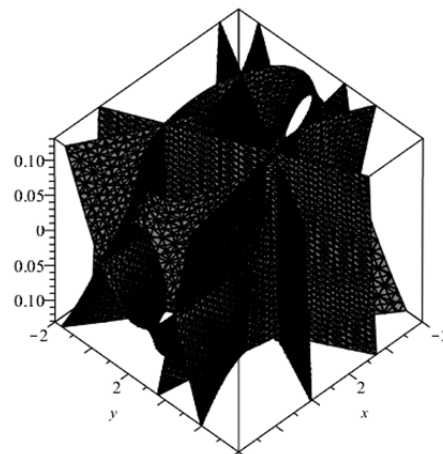
$$\exists i \in \{1, 2, \dots, 4\}: z_{0i} = 0$$

برای حل این مساله، بهینه‌سازی غیرخطی از تابع $fmincon$ نرم‌افزار MATLAB استفاده می‌شود. از آنجایی که این مساله بهینه‌سازی به نسبت ساده است، معمولاً الگوریتم به‌سرعت و بعد از چند تکرار در یک رایانه به مشخصات پردازنده ۳.۶ GH و حافظه ۸GB به جواب بهینه همگرا می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که در مختصات $x - y - \emptyset$ یا مختصات C_0 یک دایره به مرکز C_0 یک استوانه با شعاع $d_{\min}$ از رابطه ۹ به دست می‌آید که برخوردی با هیچ یک از منحنی‌ها یا سطوح مرزی نیرو-گشتاور ندارد. به‌طور مشخص تضمین می‌شود تا زمانی که نقطه مرجع P داخل ناحیه دایره‌ای محاسبه‌شده قرار گیرد، برای هر دوران مجری نهایی در محدوده دوران $[\emptyset \emptyset]$ ربات همواره در ترکیب‌بندی نیرو-گشتاور بسته باقی می‌ماند. نمونه دایره محاسبه‌شده و استوانه معادل آن در نمودار ۲ و شکل ۳ نشان داده شده است. در بسیاری از کاربردهای ربات‌های موازی کابلی، مجری نهایی دستخوش دوران گسترده‌ای در طول مسیر حرکت خود می‌شود. معمولاً ربات‌های موازی کابلی با پارامترهای هندسی اختیاری مختلف نشان می‌دهند که فضای کاری نیرو-گشتاور بسته برای این محدوده بزرگ دوران بسیار کوچک است یا وجود ندارد. به عبارت دیگر، پیدا کردن یک دسته پارامترهای هندسی ربات با این ویژگی که برای هر موقعیت مجری نهایی و هر دورانی از آن در این محدوده وسیع ربات در ترکیب‌بندی نیرو-گشتاور بسته باقی بماند، دشوار است. به‌عنوان مثال در یک مسیر اختیاری نشان‌داده‌شده در نمودار ۳، مجری نهایی ربات موازی کابلی در محدوده $[-10 \ 10] \text{ deg}$ دوران می‌یابد. با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی ثابت در جدول ۱،

برای محاسبه یک ناحیه دایره‌ای محاط با سطوح نیرو-گشتاور بسته مورد بررسی قرار می‌گیرد.



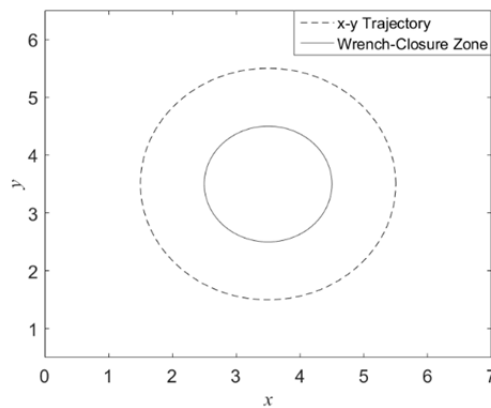
نمودار (۱) نمونه منحنی مرز ناحیه نیرو-گشتاور بسته یک ربات موازی کابلی صفحه‌ای با ۴ کابل برای یک دوران ثابت مجری نهایی



شکل (۲) نمونه سطح مرز ناحیه نیرو-گشتاور بسته یک ربات موازی کابلی صفحه‌ای با ۴ کابل برای یک محدوده دوران مجری نهایی

۳-۲- محاسبه ناحیه دایره‌ای نیرو-گشتاور بسته

مجری نهایی ربات موازی کابلی انطباق‌پذیر در شکل ۱، انتظار می‌رود که یک مسیر در فضای کاری را طی کند. با در نظر گرفتن یک موقعیت دلخواه از نقطه مرجع P بر مجری نهایی، $C_0 = [x_0 \ y_0]$ ، ناحیه دایره‌ای نیرو-گشتاور بسته به‌عنوان دایره‌ای به مرکز نقطه C_0 تعریف می‌شود، به‌طوری که تا زمانی که نقطه مرجع P در این دایره باشد و برای هر مقدار دوران مجری نهایی در یک محدوده مشخص $[\emptyset_0 - \delta \emptyset \emptyset_0 + \delta \emptyset]$ ، هر نیرو-گشتاور خارجی اعمال‌شده بر مجری نهایی را بتوان با نیروهای کششی در کابل‌ها متعادل نمود. $\emptyset_0$ دوران مورد انتظار مجری نهایی است و وقتی نقطه P بر نقطه C_0 قرار گرفته و $\delta \emptyset$ یک انحراف ثابت از دوران مجری نهایی است که با حفظ پیکربندی نیرو-گشتاور بسته قابل دستیابی است. مرکز ناحیه دایره‌ای C_0 به‌عنوان موقعیت مرکزی، دوران مرکزی و انحراف دورانی نامیده می‌شود. با قرارگیری یک دایره در ناحیه نیرو-گشتاور بسته، می‌توان از حرکت محدود مجری نهایی حول نقطه C_0 در تمام جهات با حفظ پیکربندی نیرو-گشتاور بسته اطمینان حاصل نمود.



نمودار (۴) مسیر حرکت ربات و ناحیه نیرو-گشتاور بسته

۳- محاسبه ترکیب‌بندی بهینه ربات کابلی موازی انطباق‌پذیر در مسیر حرکت مجری نهایی

تا به اینجا با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی داده شده یک ربات موازی کابلی، یافتن یک ناحیه دایره‌ای نیرو-گشتاور بسته به مرکز C_0 برای یک محدوده دوران مجری نهایی، آورده و محاسبه شعاع آن با حل یک مساله بهینه‌سازی توضیح داده شد. اما با در نظر گرفتن کل دوران مجری نهایی این محدوده برای یک ترکیب‌بندی اختیاری ربات معمولاً کوچک است یا وجود ندارد. در عوض در این بخش، ناحیه دایره‌ای به صورت نقطه‌ای در مسیر حرکت ربات و برای محدوده دوران محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- محاسبه ناحیه دایره‌ای نیرو-گشتاور بسته در هر نقطه از مسیر حرکت

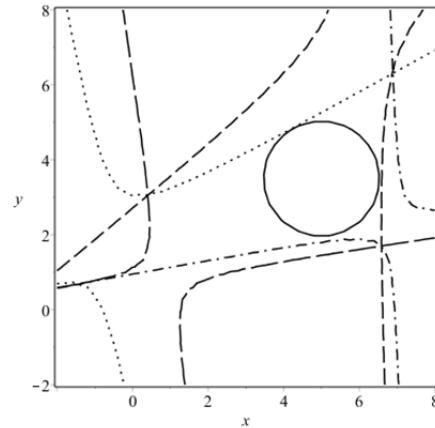
همان گونه که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود، معمولاً در هر نقطه از مسیر حرکت ربات، دوران مشخصی از مجری نهایی مورد انتظار است. در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که محاسبه ناحیه نیرو-گشتاوری که در آن مجری نهایی قابلیت دوران در محدوده دورانی مربوط به کل مسیر را داشته باشد، غیرضروری است.

در عوض، محاسبه ناحیه نیرو-گشتاور بسته در اطراف هر نقطه از مسیر حرکت ربات با قابلیت دوران محدود حول دوران مورد انتظار مجری نهایی در آن نقطه از اهمیت بالاتری برخوردار است. به بیان دیگر، این مساله را می‌توان به عنوان محاسبه شعاع ناحیه نیرو-گشتاور بسته در رابطه ۹ برای یک موقعیت C_0 نقطه مرجع P در مسیر حرکت آن و برای انحراف کوچک دوران مجری نهایی $\delta\theta$ ، از دوران مورد انتظار مجری نهایی در آن نقطه از مسیر تعریف نمود.

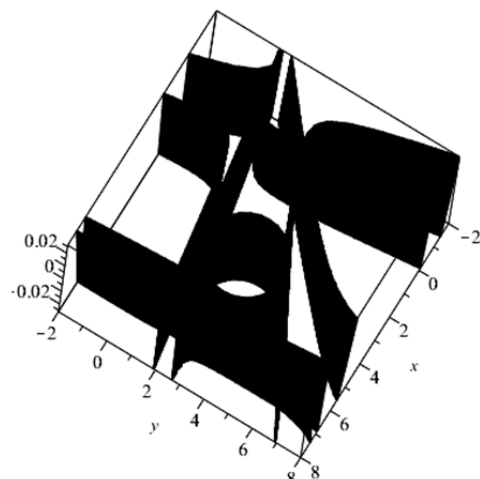
برای مثال در مسیر حرکت ربات نشان داده شده در نمودار ۳، موقعیت نقطه مرجع P و دوران مورد انتظار مجری نهایی در صفر درصد از مسیر حرکت $C_0 = [5 \ 3 \ 5]^T m$ و 0deg است.

حال با در نظر گرفتن انحراف دوران $\delta\theta = 3 \text{deg}$ ، شعاع ناحیه نیرو-گشتاور بسته را می‌توان با استفاده از رابطه ۹ و فرض $C_0 = [5 \ 3 \ 5]^T m$ و محدوده دوران $\left[0 - \frac{3}{2} 0 + \frac{3}{2}\right] \text{deg}$ محاسبه نمود که مقدار آن برای پارامترهای هندسی ربات در جدول ۱، $d_{\min} = 1 \ 392745 m$ به دست می‌آید. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که محاسبات مشابهی برای هر موقعیت دیگری از مجری نهایی بر مسیر حرکت آن قابل انجام است. به طور کلی‌تر، شعاع ناحیه نیرو-گشتاور بسته برای یک انحراف دوران مربوط به گروهی از موقعیت‌های مجری نهایی ربات بر مسیر حرکت آن را می‌توان با استفاده از رابطه ۹ به دست آورد. این محاسبات برای پارامترهای هندسی ربات در جدول ۱ در ۵۰ نقطه از مسیر حرکت

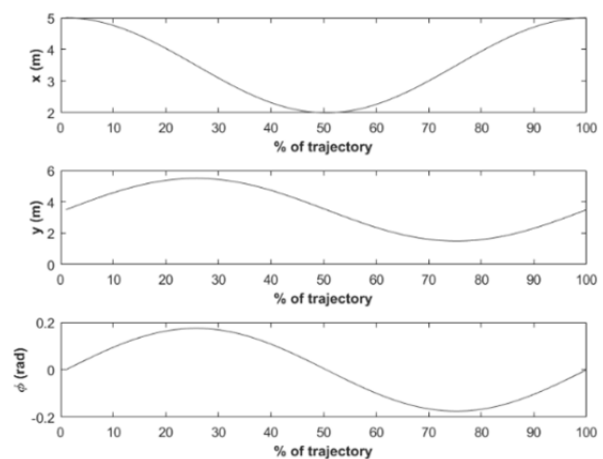
برای این محدوده دورانی، شعاع ناحیه دایره‌ای نیرو-گشتاور بسته به مرکز $C_0 = [3 \ 5 \ 3]^T m$ با استفاده از رابطه ۹ $d_{\min} = 0 \ 908259 m$ به دست می‌آید. با مقایسه این مسیر حرکت و ناحیه نیرو-گشتاور بسته محاسبه شده در نمودار ۴ مشخص است که مسیر حرکت ربات کاملاً خارج از ناحیه نیرو-گشتاور بسته قرار دارد.



نمودار (۵) نمونه منحنی مرز ناحیه نیرو-گشتاور بسته یک ربات موازی کابلی صفحه‌ای با ۴ کابل برای یک دوران ثابت مجری نهایی



شکل (۶) نمونه سطح مرز ناحیه نیرو-گشتاور بسته یک ربات موازی کابلی صفحه‌ای با ۴ کابل برای یک محدوده دوران مجری نهایی



نمودار (۷) نمونه مسیر حرکت ربات موازی کابلی با ۴ کابل

گرایش به سمت نقطه بهینه محلی و عبارت سوم نشان‌دهنده گرایش به سمت نقطه بهینه است.

۳-۳- گسترش ناحیه دایره‌ای نیرو-گشتاور بسته

به‌طور مشخص، مساله تعریف‌شده در رابطه ۹ به پارامترهای هندسی ربات شامل مختصات نقاط اتصال کابل‌ها به مجری نهایی و پایه بستگی دارد. این پارامترها همچنین به‌عنوان ورودی مساله تعریف‌شده در رابطه ۹ برای تعیین شعاع ناحیه نیرو-گشتاور بسته است. برای ورودی‌های مختلف این رابطه مقادیر متفاوتی از شعاع ناحیه نیرو-گشتاور بسته برای مقادیر مشخص C_0 ، ϕ_0 و $\delta\phi$ مربوط به مجری نهایی نتیجه می‌دهد. اما در این ربات پارامترهای بهینه‌ای مورد علاقه است که به‌ازای آنها رابطه ۹ بزرگ‌ترین ناحیه دایره‌ای $\max(d_{\min})$ را نتیجه دهد، همان گونه که در الگوریتم جدول ۲ آمده است.

برای مقادیر مشخص C_0 ، ϕ_0 و $\delta\phi$ از مجری نهایی، این پارامترهای بهینه را می‌توان با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی هوش ازدحامی و حل رابطه ۹ به‌طور تکراری به دست آورد. ابتدا یک دسته پارامترهای مربوط به نقاط اتصال کابل‌ها به زمین به‌صورت تصادفی، انتخاب و با استفاده از رابطه ۹، مقدار ارزیابی مربوطه آنها ($d_{\min}$) محاسبه می‌شوند. آن گاه این پارامترها براساس تکنیک بهینه‌سازی هوش ازدحامی برای افزایش مقدار $d_{\min}$ بروز می‌شوند.

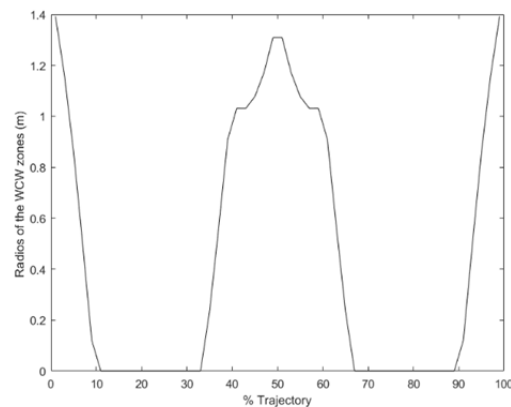
جدول ۲) الگوریتم گسترش ناحیه دایره‌ای نیرو-گشتاور بسته

1: Require:
• The center position C_0 , the center orientation ϕ_0 , orientation deviation $\delta\phi$
• Number of Particle N_p and Number of Iteration N_I in PSO algorithm
2: $k = 1$
3: For $h = 1:N_p$ then
4: $w_h(k) \leftarrow$ Random vector of coordinate of cable attachment points on base $A_i, i = 1.2 \dots 4$
5: End For
6: For $k = 1:N_I$ then
7: For $h = 1:N_p$ then
8: $d_h \leftarrow$ Evaluate the fitness function $d_{\min}$ corresponding to $w_h(k)$ in Equation (4)
9: Update $w_h^{\text{best}}(k)$
10: End For
11: Update $w_h^{\text{best}}(k)$
12: Update the position vector $w_h^{\text{best}}(k), h = 1.2 \dots N_p$ according to equation (5)
13: End For

۳-۴- پارامترهای بهینه ربات موازی کابلی انطباق‌پذیر در مسیر حرکت

همان گونه که در بخش‌های قبلی بحث شد، ربات‌های با پارامترهای هندسی ثابت، عملکرد نامناسب کنترلی در طول مسیر حرکت مجری نهایی دارند. اما در این بخش، عملکرد سینماتیک ربات موازی کابلی انطباق‌پذیر شکل ۱ مورد بررسی قرار می‌گیرد. عموماً در ربات‌های موازی، اضافه‌کردن انطباق‌پذیری می‌تواند منجر به مزایایی از جمله جلوگیری از تکنیکی، بزرگ‌ترکردن فضای کاری و افزایش عملکرد شود [25]. به‌طور مشابه، در ربات موازی کابلی انطباق‌پذیر نیز به‌دلیل افزایش افزونگی، توانایی ربات به‌طور عمده بهبود می‌یابد و از عدم توانایی در کنترل مجری نهایی در مسیر حرکتش جلوگیری می‌شود [10-12]. بر این اساس، همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده، فرض می‌شود که چهار نقطه اتصال کابل‌ها در پایه $A_1 \oplus A_2 \oplus \dots \oplus A_4$ ، متحرک است و توسط موتورهای خطی

مجری نهایی در نمودار ۳ انجام گرفته و در نمودار ۵، شعاع این ناحیه‌ها به‌ازای هر یک از این نقاط نشان داده شده است. همان گونه که در این نمودار نشان داده شده، در فواصل ۱۰ تا ۳۰٪ و ۶۵ تا ۹۰٪ مسیر حرکت، شعاع ناحیه‌های نیرو-گشتاور بسته صفر است. این واقعیت نشان می‌دهد که رباتی با پارامترهای هندسی ثابت در جدول ۱ قادر به کنترل مجری نهایی در اطراف مسیر حرکت نشان‌داده‌شده در نمودار ۳ نیست.



نمودار ۵) شعاع ناحیه‌های نیرو-گشتاور بسته برای ربات با پارامترهای داده‌شده در جدول ۱

جدول ۱) پارامترهای هندسی ربات موازی کابلی استفاده‌شده برای نمودار ۱ و شکل ۲

شماره کابل	مختصات اتصال به زمین	مختصات اتصال به مجری نهایی
۱	$[0 \ 0]^T$	$[-0.4 \ -0.7]^T$
۲	$[0 \ 7]^T$	$[0.4 \ -0.7]^T$
۳	$[7 \ 7]^T$	$[0.4 \ 0.7]^T$
۴	$[0 \ 7]^T$	$[-0.4 \ 0.7]^T$

۳-۲- بررسی اجمالی روش بهینه‌سازی هوش ازدحامی

روش بهینه‌سازی هوش ازدحامی تکنیکی است که از رفتار اجتماعی حیوانات همانند پرندگان و مورچه‌ها الهام گرفته شده است [25]. یک دسته از N_p ذره برای جست‌وجو در فضای جست‌وجوی درجه D مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر ذره در فضای جست‌وجو براساس موقعیت بهینه مواجه‌شده توسط خود آن ذره یا ذرات همسایه آن حرکت می‌کند.

موقعیت مطلوب مربوط به آن است که بهترین مقدار ارزیابی را به دست می‌دهد. الگوریتم شامل تصحیح سرعت و موقعیت هر ذره به‌صورت تکراری به‌شکل زیر است:

$$\Delta w_h(k+1) = \psi \Delta w_h(k) + C_1 R_1 [w_h^{\text{best}}(k) - w_h(k)] + C_2 R_2 [w_G^{\text{best}}(k) - w_h(k)] \quad (10)$$

$$w_h(k+1) = w_h(k) + \Delta w_h(k+1)$$

به‌طوری که k شماره تکرار، w_h موقعیت فعلی ذره h ، w_h^{best} بهترین موقعیت دست‌یافته توسط آن ذره تاکنون، w_G^{best} بهترین موقعیت کلی به‌دست‌آمده توسط هر ذره در کل دسته، Δw_h میزان افزایش موقعیت ذره، ψ وزن اینرسی، C_1 و C_2 ثوابت شتاب مثبت و R_1 و R_2 اعداد تصادفی در بازه $[0 \ 1]$ است. عبارت اول در رابطه ۱۰ نماینده وزن سرعت فعلی ذره، عبارت دوم نشان‌دهنده

با تغییر پارامترهای ربات آورده شد. برای رباتی با پایه‌های ثابت، این ناحیه‌های دایره‌ای در یک مسیر حرکتی مجری نهایی می‌تواند وجود نداشته باشد و در نتیجه، ربات قادر به کنترل مجری نهایی نباشد. با در نظر گرفتن پایه‌های اتصال کابل‌های متحرک نشان داده شد که ناحیه‌های دایره‌ای گشتاور نیرو را می‌توان گسترش داد و قابلیت ربات در کنترل مجری نهایی را بهبود بخشید. البته این امر نیازمند تعیین حرکت بهینه پایه‌ها است. بدین منظور، با استفاده از یک تکنیک بهینه‌سازی، چگونگی محاسبه طرح‌های پیاده‌سازی ارایه شد که منجر به بهبود عملکرد ربات‌های انطباق‌پذیر در مقایسه با ربات‌های با پایه‌های ثابت می‌شود. همچنین کارایی این تکنیک با پیاده‌سازی برای یک نمونه ربات صفحه‌ای با چهار کابل نشان داده شد. مطالعه این ربات به دلیل کاربردهای آن در جابه‌جایی اجسام در فضای کاری بزرگ و محدوده دورانی بیشتر و انجام عملیات با سرعت‌های بالاتر دارای اهمیت است. به علاوه روش ارایه‌شده و نتایج این مقاله برای طراحی و تحلیل ربات‌های انطباق‌پذیر برای توانبخشی در کارهای آتی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. همچنین در آینده از روش ارایه‌شده در این مقاله در طراحی و بهینه‌سازی ربات موازی کابلی فضایی انطباق‌پذیر با ۶ درجه آزادی و تعداد پایه‌های متحرک بیشتر به منظور بهبود عملکرد آن استفاده خواهد شد.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: قاسم عباس‌نژاد (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ مهدی طالع‌ماسوله (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

۵- پی‌نوشت

x	موقعیت خطی مجری نهایی نسبت به چارچوب پایه
R	ماتریس دوران مجری نهایی نسبت به چارچوب پایه
L_e	برداری پلور خط در جهت نیروی اعمالی بر مجری نهایی
L_i	برداری پلور خط مربوط به کابل i ام
M	ماتریس ترانزفورد ژاکوبین

t بردار نیروی کابل‌ها

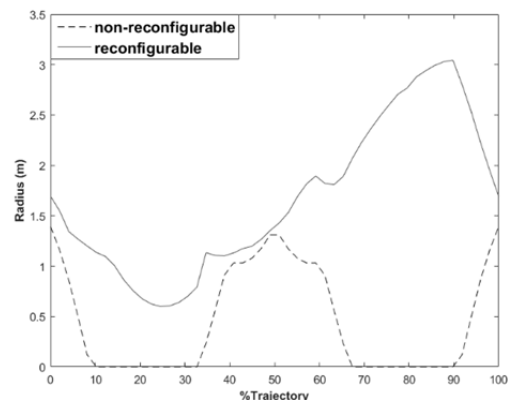
علامه یونانی

ϕ	دوران مجری نهایی
ρ_i	طول کابل‌ها
T_i	اندازه نیروی کششی در کابل‌ها

منابع

- 1- Ghanbari M, Moosavi M, Moosavian SA, Zarafshan P. Modeling, optimal path planning and tracking control of a cable driven redundant parallel robot. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(4):67-77. [Persian]
- 2- Aflakiyan A, Tale Masouleh M, Bayani H, Sadeghian R. Path planning of cable driven parallel robots in the presence of dynamic obstacles via potential field using computed torque control method. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(4):109-118. [Persian]
- 3- Bayani H, Tale Masouleh M, Kalhor A. An experimental study on the vision-based control and identification of planar cable-driven parallel robot. Robotics and Autonomous Systems. 2016;75(Part B):187-202.
- 4- Bamdad M, Taheri F. Improvement of end-effector orientability capability in a serial-parallel cable robot.

جابه‌جا می‌شوند. در این ربات، جابه‌جایی A_1 در جهت x برابر با q_1 ، جابه‌جایی A_2 در جهت y برابر با q_2 ، جابه‌جایی A_3 در جهت x برابر با q_3 و جابه‌جایی A_4 در جهت y برابر با q_4 است. اگرچه افزونگی می‌تواند به بهبود عملکرد ربات بیانجامد، اما به علت افزایش تعداد متغیرهای مستقل، کنترل ربات را مشکل‌تر می‌کند. در اینجا عملکرد ربات انطباق‌پذیر در اطمینان از ترکیب‌بندی نیرو-گشتاور بسته، طی مسیر حرکت مجری نهایی با ربات با پایه‌های ثابت مقایسه می‌شود. افزونگی در این ربات، جواب سینماتیک معکوس مساله را از تعداد محدود جواب‌ها به تعداد زیاد افزایش می‌دهد. در نتیجه، برای انتخاب یکی از این جواب‌ها نیاز به استفاده از یک روش مشخص است. برای حل این مساله در پژوهشی^[25] روشی برای محاسبه طرح راه‌اندازی ربات موازی انطباق‌پذیر معرفی شد. با استفاده از این روش و کمک تکنیک بهینه‌سازی هوش ازدحامی طرح‌ریزی نقطه‌به‌نقطه مسیر برای ربات موازی کابلی انطباق‌پذیر براساس بهینه‌سازی محلی شعاع ناحیه نیرو-گشتاور بسته برای هر موقعیت از مجری نهایی در مسیر حرکت آن به دست می‌آید. همچنین برای جلوگیری از سرعت‌های زیاد موتورها نسبت تغییرات جابه‌جایی موتورها به مقادیر مشخصی محدود می‌شوند. برای به دست آوردن طرح راه‌اندازی، مسیر حرکت مجری نهایی به $N_c = 50$ قسمت تقسیم می‌شود و برای هر قدم پیشروی در مسیر حداکثر جابه‌جایی موتورها ۰.۵m در نظر گرفته می‌شود. با این فرضیات، شعاع ناحیه نیرو-گشتاور بسته در طول مسیر حرکت ربات با در نظر گرفتن افزونگی و محاسبه ترکیب‌بندی بهینه در هر نقطه از مسیر در نمودار ۶ نشان داده شده و با محاسبات مشابه برای ربات با پایه‌های ثابت مقایسه صورت گرفته است.



نمودار ۶) مقایسه شعاع ناحیه نیرو-گشتاور بسته در ربات انطباق‌پذیر و ربات با پایه‌های ثابت

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله، برای بهبود عملکرد ربات‌های کابلی موازی، استفاده از ربات‌های کابلی قابل انطباق با پایه‌های متحرک معرفی شد. ابتدا سینماتیک این ربات‌ها مورد بررسی قرار گرفت و روابط ریاضی حاکم بر سینماتیک این ربات‌ها استخراج شد. با تعریف فضای کاری نیرو-گشتاور بسته و استفاده از این روابط، شرایط ریاضی مربوط به ترکیب‌بندی نیرو-گشتاور بسته توضیح داده و با کمک این روابط، سطوح مرزی نیرو-گشتاور بسته محاسبه شد. در ادامه، محاسبه ناحیه دایره‌ای نیرو-گشتاور بسته داخل مرز نیرو-گشتاور با حل یک مساله بهینه‌سازی، ارایه و چگونگی گسترش این ناحیه

- kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots. *Journal of Robotic Systems*. 1998;15(10):581-597.
- 16- Verhoeven R. Analysis of the workspace of tendon-based Stewart platforms [Dissertation]. Duisburg: Duisburg Essen University; 2004.
- 17- Gallina P, Rosati G. Manipulability of a planar wire driven haptic device. *Mechanism and Machine Theory*. 2002;37(2):215-228.
- 18- Abbasnejad G, Daniali HM, Kazemi SM. A new approach to determine the maximal singularity-free zone of 3-RPR planar parallel manipulator. *Robotica*. 2012;30(6):1005-1012.
- 19- Li H, Gosselin CM, Richard MJ. Determination of maximal singularity-free zones in the workspace of planar three-degree-of-freedom parallel mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*. 2006;41(10):1157-1167.
- 20- Karimi A, Tale Masouleh M, Cardou P. Singularity-free workspace analysis of general 6-UPS parallel mechanisms via convex optimization. *Mechanism and Machine Theory*. 2014;80:17-34.
- 21- Farzaneh Kaloorazi MH, Tale Masouleh M, Caro S. Determination of the maximal singularity-free workspace of 3-DOF parallel mechanisms with a constructive geometric approach. *Mechanism and Machine Theory*. 2015;84:25-36.
- 22- Zamani Fekri M, Zarei M, Tale Masouleh M, Yazdani M. Optimal design and fabrication of a 4-DOF quattrotaar parallel robot with singularity-free workspace by ABC and PSO algorithms. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(6):149-158. [Persian]
- 23- Anvari Z, Varshovi-Jaghargh P, Tale Masouleh M. The mechanical interference-free workspace of the planar parallel robots using geometric approach. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(4):101-110. [Persian]
- 24- Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*, 27 November-1 December, 1995, Perth, Australia. Piscataway: IEEE; 1995.
- 25- Ebrahimi I, Carretero JA, Boudreau R. Kinematic analysis and path planning of a new kinematically redundant planar parallel manipulator. *Robotica*. 2008;26(3):405-413.
- Modares Mechanical Engineering. 2015;15(7):336-344. [Persian]
- 5- Taghirad H, Khalilpour A, Aliyari M, Tale Masouleh M. Applying evolutionary algorithms in multi objective optimization of planar cable-driven parallel robots. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;14(5):44-54. [Persian]
- 6- Abbasnejad G, Carricato M. Direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots with n cables. *IEEE Transactions on Robotics*. 2015;31(2):468-478.
- 7- Abbasnejad G, Carricato M. Real solutions of the direct geometrico-static problem of under-constrained cable-driven parallel robots with 3 cables: A numerical investigation. *Meccanica*. 2012;47(7):1761-1773.
- 8- Gouttefarde M, Gosselin CM. Analysis of the wrench-closure workspace of planar parallel cable-driven mechanisms. *IEEE Transactions on Robotics*. 2006;22(3):434-445.
- 9- Rosati G, Zanutto D, Agrawal SK. On the design of adaptive cable-driven systems. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2011;3(2):021004.
- 10- Zanutto D, Rosati G, Minto S, Rossi A. Sophia-3: A semiadaptive cable-driven rehabilitation device with a tilting working plane. *IEEE Transactions on Robotics*. 2014;30(4):974-479.
- 11- Zhou X, Jun SK, Krovi V. Tension distribution shaping via reconfigurable attachment in planar mobile cable robots. *Robotica*. 2014;32(2):245-256.
- 12- Nguyen DQ, Gouttefarde M, Company O, Pierrot F. On the analysis of large-dimension reconfigurable suspended cable-driven parallel robots. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 31 May-7 June, 2014, Hong Kong, China. Piscataway: IEEE; 2014.
- 13- Abbasnejad G, Yoon J, Lee H. Optimum kinematic design of a planar cable-driven parallel robot with wrench-closure gait trajectory. *Mechanism and Machine Theory*. 2016;99:1-18.
- 14- Anson M, Alamdari A, Krovi V. Orientation workspace and stiffness optimization of cable-driven parallel manipulators with base mobility. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2017;9(3):031011.
- 15- Roberts RG, Graham T, Lippitt T. On the inverse