مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۵، ص‌ص ۴۴-۵۴

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

به‌کارگیری الگوریتم‌های تکاملی در طراحی بهینه چندهدفه ربات‌های موازی کابلی صفحه‌ای

سیداحمد خلیل‌پور سیدی[۱]، حمیدرضا تقی‌راد[۲*]، مهدی علیاری‌شوره‌دلی[۳]، مهدی طالع ماسوله[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۲- استاد، دانشکده مهندسی برق، قطب علمی کنترل صنعتی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۴- استادیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۳۵۵- ۱۶۳۱۵، taghirad@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۲۶ شهریور ۱۳۹۲
پذیرش: ۱۳ آذر ۱۳۹۲
ارائه در سایت: ۳۱ خرداد ۱۳۹۳

کلید واژگان:
ربات کابلی صفحه‌ای
طراحی بهینه چند هدفه
حساسیت سینماتیکی
عدد وضعیت
فضای کاری کنترل‌پذیر

چکیده

این مقاله با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی، به طراحی بهینه چند هدفه ربات‌های کابلی می‌پردازد. با توجه به اینکه در ربات‌های کابلی، کابل‌ها همیشه باید در حالت کششی قرار داشته باشند، وسعت فضای کاری کنترل‌پذیر ربات به عنوان معیاری برای طراحی بهینه ربات انتخاب شده است. این معیار یکی از موارد بسیار مهمی است که در کارایی ربات های کابلی مورد توجه قرار می‌گیرد. علاوه بر آن برای آنکه ربات کابلی مهارت و دقت کافی داشته باشد و بتواند در همه جهات مورد نیاز، مانور دلخواه را انجام دهد، از معیارهای دیگر سینماتیکی همانند عدد وضعیت عمومی، حساسیت سینماتیکی انتقالی و دورانی استفاده شده است. با بررسی تقابل این معیارها با یکدیگر نشان داده شده است که استفاده از روشهای بهینه‌سازی چند هدفه، روش موثری برای رسیدن به مصالحه مناسب در طراحی ربات است. سپس با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه‌ای با ساختار الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات، جبهه بهینگی پرتو به گونه‌ای برای متغیرهای طراحی ربات کابلی صفحه‌ای بدست آورده شده است که مصالحه مناسبی بین توابع هدف طراحی صورت گیرد.

Applying evolutionary algorithms in multi-objective optimization of planar cable-driven parallel robots

Seyyed Ahmad Khalilpour[1], Hamid Reza Taghirad[2*], Mehdi Aliyari Shoorehdeli[3], Mehdi Tale Masouleh[4]

1- Department of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran,
2- Department of Electrical Engineering, Industrial Control Center of Excellence, K. N. Toosi University of Technology, Tehran,
3- Department of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran,
4- Department of New Science and Modern Technology, University of Tehran, Tehran.
* P.O. Box 16315-1355 Tehran, Iran, taghirad@kntu.ac.ir.

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 September 2013
Accepted 04 December 2013
Available Online 21 June 2014

Keywords:
Planar cable robot
Multi-objective optimization
Kinematic sensitivity
Condition number
Controllable workspace

ABSTRACT

This paper investigates the multi-objective optimization design of planar cable-driven parallel robots by using the evolutionary optimization algorithm. Since in cable-driven parallel robots, the cables should remain in tension in all configurations, the extent of the controllable workspace is considered as one of the design indices. This objective function is of utmost importance to the design of cable-driven parallel robots, since it considers the unidirectional properties of the cables in the analysis. In addition, in order for the robot to have suitable dexterity and accuracy and to be able to manipulate any arbitrary task in all the required directions, various kinematic indices such as global condition number, translational and rotational kinematic sensitivity indices are used. Through analysis of the conflict of these objectives within the workspace of the robot, it is shown that use of multi-objective optimization is an effective method to reach to a suitable trade-off. Furthermore, by applying multi-objective optimization methods such as the non-sorting genetic algorithm and the adaptive weighted particle swarm optimization algorithm, the optimal pareto front for the design parameters for the cable robot is obtained such that to draw a compromise between the robot designs.

۱- مقدمه

ربات‌های کابلی، مکانیزم‌هایی هستند که عناصر اصلی تشکیل دهنده آنها کابل یا سیم است. در این ربات‌ها معمولاً به جای استفاده از عملگرهای هیدرولیکی و پنوماتیکی از کابل جمع کن‌هایی استفاده می‌شود که توسط موتورهای الکتریکی تحریک می‌شوند. در این رباتها عملگرها بر روی چارچوب ثابت نصب هستند. در این حالت عملگرها تنها نیروهای وارد بر مجری نهایی و وزن ناچیز کابل‌ها را متحمل می‌شوند و وزن قابل توجه عملگرها مهار می‌شود. در نتیجه می‌توان نیروهای بزرگتری به مجری نهایی آن اعمال کرد و

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

سرعت و شتاب‌های بالاتری را انتظار داشت. ربات‌های موازی کابلی به علت دارا بودن ویژگی‌های ممتازی نظیر سرعت و شتاب بالا، وسعت فضای کاری، هزینه کم ساخت، قابلیت حمل بار زیاد نسبت به وزن کم ربات و ...، کاربردهای فراوانی در مسائل گوناگون پیدا کرده اند [۱]. ویژگی‌های مطلوب و امتیازات فراوان ربات‌های کابلی اشتیاق محققان را برای به کار گیری این ربات‌ها در زمینه‌های مختلفی چون ابزار واسط لامسه‌ای [۲]، رباتهای نجات بخش [۳]، بازتوان بخشی [۴]، آموزش‌های ورزشی [۵] و نقل و انتقال اجسام سنگین [۶] افزایش داده است.

اما استفاده از رباتهای کابلی محدودیت‌هایی نیز به همراه دارند که می‌بایست با کاهش این مشکلات به خصوص در مرحله طراحی ربات از مزایای غیر قابل انکار این مکانیزم‌ها بهره جست. به عنوان نمونه، برای آن که ربات کابلی در یک موقعیت غیر تکین دارای n درجه آزادی باشد، حداقل به $n+1$ کابل نیاز است. چرا که اجزای کابلی در این ربات‌ها قادر به اعمال نیروی فشاری نیستند و تنها نیروی کششی تولید می‌کنند. بنابراین، افزونگی در ربات‌های کابلی یک امر اجتناب ناپذیر است. از جمله دیگر چالش‌ها می‌توان به برخورد کابلها با هم و کابل‌ها با بدنه و اشیاء پیرامون ربات اشاره کرد که مشکلاتی را بر سر طراحی این ربات‌ها قرار داده است [۷]. مهارت کافی ربات و قدرت مانور در جهات مختلف، از جمله دیگر مواردی است که در طراحی همه مکانیزم‌ها مد نظر قرار می‌گیرد. برآورده کردن تمام موارد فوق نیازمند به کار گیری روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه برای طراحی ربات است. چرا که بهینه‌سازی به منظور دستیابی به تنها یک هدف ممکن است به عدم دستیابی به اهداف دیگر منجر شود.

در ادبیات رباتهای موازی کابلی افزونه، فضای کاری از دیدگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و در مقالات علمی، انواع گوناگون فضای کاری برای این ربات‌ها تعریف شده است. به طور خلاصه فضای کاری ربات‌های کابلی به چهار دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند: (۱) فضای کاری چرخش امکان پذیر [۸] (۲) فضای کاری دینامیکی [۹] (۳) فضای کاری استاتیکی [۱۰] و (۴) فضای کاری کنترل‌پذیر[1] [۱۱]. در این مقاله فضای کاری کنترل‌پذیر ربات‌های کابلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. فضای کاری کنترل‌پذیر شامل همه موقعیت‌هایی از مجری نهایی است که در آنها به ازای همه نیروها و گشتاورهای وارده بر مجری نهایی، کابل‌های ربات در حالت کششی قرار گیرند. افزایش فضای کاری کنترل‌پذیر می‌تواند به کارایی ربات کمک کند. بنابراین وسعت این فضای کاری می‌تواند به عنوان یکی از معیارهای طراحی بهینه چند هدفه مورد بررسی قرار گیرد.

تعداد زیاد نقاط تکین ربات‌های موازی یکی از مشکلات این ربات‌ها به شمار می‌آید [۱۲]. تعیین نقاط تکین و کاهش آنها یکی از چالش‌های مهم طراحی این گونه ربات‌ها می‌باشد. در طراحی ربات‌های موازی، معمولا از شاخص‌های سینماتیکی برای کاهش تکینگی‌ها و افزایش کارایی این مکانیزم‌ها استفاده می‌شود. معروف ترین این شاخص‌ها، معیار توانایی یوشیکاوا [۱۳] و معیار مهارت [۱۴] می‌باشند که کاربرد آنها دارای بعضی محدودیت‌ها به ویژه در ربات‌های موازی کابلی است. برای حل این مشکلات، اخیراً دو معیار مختلف که حساسیت سینماتیکی انتقالی و دورانی نام دارند، پیشنهاد شده است. این دو شاخص کران بالای خطای دورانی و انتقالی مکانیزم می‌باشند که از خطای با نرم واحد در فضای مفصلی منشاء گرفته اند [۱۵].

در زمینه طراحی ربات‌های کابلی، مرجع [۱۶] یک روش عددی برای طراحی بهینه ربات کابلی صفحه‌ای به کار برده است. در این مرجع، نقاط اتصال و اندازه مجری نهایی به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده و معیارهای طراحی، مساحت فضای کاری استاتیکی و عدد وضعیت عمومی[2] ربات هستند. هدف از بهینه‌سازی در این مرجع، بیشینه کردن وسعت فضای کاری استاتیکی و افزایش دقت ربات درون این فضا عنوان شده است. مرجع [۱۶] برای داشتن تخمینی از مساحت فضای کاری، از شبکه بندی[3] فضای کاری استفاده کرده و در هر نقطه، مثبت بودن تنش کابل‌ها را در حضور نیروی جاذبه زمین بررسی می‌کند. الگوریتم استفاده شده در مرجع [۱۶] به علت آنکه تمامی‌حالت‌های امکان پذیر برای متغیرهای طراحی را با توجه به وضوح[4] تعیین شده برای شبکه در نظر می‌گیرد، گذشته از دقت پایین بهینه‌سازی، از سرعت بسیار پایینی برخوردار است. لذا نویسندگان [۱۶]، این الگوریتم را تنها در یک زاویه چرخش خاص از ربات پیاده سازی کرده‌اند.

در مرجع [۷] طراحی چند هدفه بر اساس روشی مبتنی بر بازرسی دیداری صورت گرفته است که در نهایت، یک طرح بهینه را به عنوان خروجی ارائه داده است. مبنای این روش به کارگیری همزمان معیارهای جلوگیری از برخورد کابل، وسعت فضای کاری و مهارت ربات در قالب یک مسأله بهینه‌سازی چند هدفه است. این مرجع به جای محاسبه جبهه پرتو[5]، از یک تابع هزینه کلی استفاده کرده است. اما مشکلاتی نظیر وزن دهی و ارزش گذاری معیارهای مختلف نسبت به هم، از کارایی این روش می‌کاهد. لذا در مرجع [۷] برای برطرف کردن این مشکل، وزن دهی هر تابع هدف را با توجه به نمودارهای دیداری[6] مربوطه پیشنهاد می‌کند.

مرجع [۱۷] برای محاسبه بزرگترین فضای کاری ماهر، ابتدا فضای کاری ربات را با وضوح خاصی شبکه بندی کرده و سپس با استفاده از الگوریتم عددی دینامیکی[7] که یک الگوریتم بهینه‌سازی تک هدفه می‌باشد، مقدار متغیرهای طراحی را طوری تعیین کرده که بیشترین فضای کاری ماهر برای ربات کابلی بدست آید. با وجود تعداد کم متغیرهای طراحی در این مرجع، این الگوریتم شدیداً به مقادیر حدس اولیه متغیرهای طراحی حساس بوده و امکان توقف الگوریتم در بهینه محلی وجود دارد.

همچنین در مرجع [۱۸]، با استفاده از روش ریاضی تحلیل بازه ای، الگوریتمی ارائه داده اند که به طور همزمان، معیارهای کنترل‌پذیری و حساسیت سینماتیکی را در نظر می‌گیرد و به این وسیله، کارایی طرح‌های مختلف ربات‌های کابلی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. اما این تحقیق الگوریتمی برای پیدا کردن مکانیزم بهینه ارائه نمی‌دهد.

هدف این مقاله، بررسی معیارهای سینماتیکی مناسب برای طراحی ربات‌های کابلی و سپس، بهینه‌سازی چند هدفه بر اساس توابع هدف مطرح شده می‌باشد. بر این اساس، معیارها به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که بتوانند وسعت فضای کاری و دقت و مهارت ربات را تنظیم نمایند. علاوه بر این، قابلیت ساخت و کارایی مکانیزم به عنوان معیارهای مهم دیگر در طراحی ربات، مورد توجه قرار می‌گیرند. مقایسه و تحلیل معیارهای مختلف، گذشته از آنکه می‌تواند نتایج بدست آمده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی را تأیید کند، فرآیند بهینه‌سازی چند هدفه را نیز ساده‌تر می‌سازد. زیرا این فرصت را فراهم می‌آورد که در فرآیند بهینه‌سازی از تعداد توابع هدفی که در تقابل با یکدیگر نیستند، کاسته شود. استفاده از الگوریتم‌های هوشمند ارائه شده در این مقاله، این فرصت را فراهم می‌آوردند تا دسته جوابی به عنوان بهترین پاسخ (جبهه

1- Controllable Workspace (CWS)

2- Global Condition Number
3- Mesh
4- Resolution
5- Pareto Front
6- Visual Inspection Graphs
7- Dynamic Q Optimization Algorithm

پرتو) به کاربر نهایی یا سازنده ارائه شود تا در نهایت با توجه به اهمیت معیارهای طراحی در شرایط گوناگون و نیاز کاربر، یکی از این نقاط بهینه در جبهه پرتو به منظور ساخت انتخاب شود. به کارگیری الگوریتم‌های بهینه سازی چند هدفهٔ گوناگون و مقایسه عملکرد آنها در رسیدن به پاسخ‌های مناسب جبهه پرتو از دیگر رویکردهای این مقاله محسوب می‌شود. در جمع‌بندی توضیحات فوق باید به این موضوع توجه کرد که نوآوری اصلی این مقاله، بررسی معیارهای متنوع سینماتیکی در کنار هم و استفاده از آنها در الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه هوشمند می‌باشد که در نهایت، منجر به ارائه جبهه پرتوی بهینه شده است. مقالات متنوعی از معیارهای سینماتیکی استفاده شده در این مقاله به منظور طراحی ربات کابلی بهره برده‌اند، اما هیچ کدام به بررسی این معیارها در کنار هم و در نهایت بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند نپرداخته‌اند.

در ادامه این مقاله، ابتدا ربات کابلی صفحه‌ای مورد نظر معرفی میشود و متغیرهای طراحی با توجه به ساختار ربات مشخص می‌شود. در بخش دوم معیارهای متداول سینماتیکی طراحی ربات کابلی که وسعت فضای کاری و دقت و مهارت ربات را ارزیابی می‌کنند، بیان می‌گردند. در بخش سوم معیارهای بیان شده در قسمت قبل با توجه به متغیرهای طراحی، تحلیل می‌شوند. در نهایت با استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه متفاوت تکاملی، بهینه‌سازی همزمانی برای اهداف در تضاد با هم انجام شده و جبهه پرتو بهینه محاسبه می‌شود.

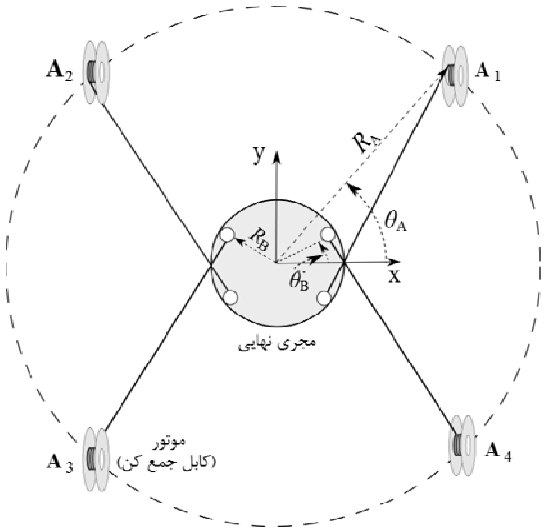
۲- معرفی ربات کابلی صفحه‌ای

در این قسمت، به بهینه سازی ربات کابلی صفحه‌ای پرداخته می‌شود. رباتی که دارای ۲ درجه آزادی انتقالی در صفحه P_{xy} و یک درجه آزادی دورانی حول محور z است. ربات کابلی صفحه‌ای نشان داده شده در شکل ۱، ساختار انتخابی برای فرآیند بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. این مکانیزم توسط ۴ عملگر فعال که با A_i نمایش داده شده‌اند، کنترل می‌شوند. مجری نهایی این ربات موازی از دایره‌ای تشکیل شده است که توسط چهار کابل به عملگرها متصل می‌شود.

برای ساده‌تر شدن مسأله بهینه‌سازی، نقاط اتصال کابل‌ها به مجری نهایی و چهارچوب ثابت، نسبت به محورهای x و y متقارن انتخاب شده‌اند، به طوری که با مشخص شدن یکی از نقاط اتصال کابل به مجری نهایی، تمامی نقاط اتصال کابل به مجری نهایی تعیین می‌شوند. این موضوع برای نقاط اتصال کابل به چهارچوب ثابت نیز صادق می‌باشد. این نحوه چیدمان نقاط اتصال، تمامی حالاتی که مجری نهایی و چهارچوب ثابت مستطیل شکل هستند را پوشش می‌دهد. بنابراین مکان هندسی نقاط اتصال کابل به مجری نهایی و چهارچوب ثابت به ترتیب بر روی دوایری با شعاع R_B و R_A قرار می‌گیرند. در نهایت با مشخص شدن زاویه θ_A و زاویه θ_B ابعاد مستطیل‌ها بدست می‌آید. در واقع با مشخص شدن این چهار پارامتر، ساختار ربات تعیین می‌شود. این ساختار طرح‌های معرفی شده در [۱۸] را شامل می‌شود. به عبارت دیگر، با تغییر هر یک از ۴ متغیر طراحی ذکر شده، می‌توان به هر یک از این طرح‌ها دست یافت.

برای آنکه مرجع نسبی وجود داشته باشد، یکی از پارامترها ثابت فرض می‌شود تا بقیه پارامترها متناسب با آن بدست آیند. در اینجا پارامتر R_A ثابت و برابر با $R_A = 15\ \mathrm{dm}$ فرض شده است. همچنین برای سایر پارامترها نیز باید قیود خاصی وضع شود که به شرح رابطه (۱) است:

$$0 \le \theta_A \le 180^\circ, 0 \le \theta_B \le 90^\circ, 1 \le R_B \le 7\mathrm{dm} \qquad (۱)$$



شکل ۱ طرح شماتیک ربات کابلی صفحه‌ای با چهار کابل

در رابطه (۱)، قیود وضع شده برای پارامترهای زاویه‌ای به منظور ضربدری بسته شدن کابل‌ها و در نتیجه دور بودن از فضای تکینگی است. این قیود، شرایط لازم را برای وجود فضای کاری کنترل‌پذیر فراهم می‌آورد [۱۹]. همچنین شایان ذکر است که محدودیت در نظر گرفته شده برای پارامتر R_B به دلیل ملاحظات ساخت بوده است.

۳- معیارهای طراحی

این بخش به معرفی معیارهای طراحی ربات‌های کابلی اختصاص دارد. این معیارها که بیشتر، وسعت فضای کاری و دقت و مهارت ربات را مورد بررسی قرار می‌دهند عبارتند از وسعت فضای کاری کنترل‌پذیر، معیارهای حساسیت سینماتیکی انتقالی و دورانی و شاخص‌های سنجش مهارت ربات. در انتهای این بخش، معیارهای امکان پذیری ساخت و اندازه و حجم ربات و ... به عنوان شاخص‌های تولید مطرح می‌گردند. شاخص‌های مطرح شده در این بخش، در قالب توابع هدف مسئلهٔ بهینه‌سازی ربات کابلی، در بخش آتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۱- وسعت فضای کاری

همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، یکی از مهم‌ترین شرایط استفاده از رباتهای کابلی، برقراری شرط کششی بودن کابل‌ها است. به عبارت دیگر، بدست آوردن فضایی که هنگام قرار گیری مجری نهایی در آن، امکان ایجاد نیروی کششی در کابل‌ها وجود دارد، نقش کلیدی در تحلیل کارایی ربات‌های کابلی ایفا می‌کند. نحوه بدست آوردن این فضای کاری مبحثی است که در این بخش به آن پرداخته می‌شود.

برای آنکه فضای کاری ربات طوری تعیین شود که همیشه همه کابل‌ها دارای تنش مثبت باشند، باید رابطه (۲) برقرار باشد:

$$\{ x \mid Af = w, f \ge 0\} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) بردار f معرف نیروهای اعمال شده به کابل‌ها از طرف کابل جمع کن‌ها و w بردار چرخش[1] اعمالی به مجری نهایی می‌باشند. ماتریس A ماتریس ساختار[2] نامیده می‌شود که برابر است با قرینه ترانهاده ماتریس ژاکوبین ربات که یک نگاشت غیر خطی از سرعت فضای کاری به فضای

1- Wrench Vector
2- Structure Matrix

مفصلی است. همچنین x نشان دهنده متغیرهای فضای کاری کارتزین می‌باشد. در واقع x معرف تمامی موقعیت‌هایی از مجری نهایی ربات است که در آن وضعیت، کابل‌ها تنش کششی داشته باشند. مجموعه این موقعیت‌های مجری نهایی، فضای کاری ربات را تشکیل می‌دهند و همانطور که در مقدمه به آن اشاره شد، از چهار دیدگاه مختلف قابل بررسی هستند. در تعریف فضای کاری استاتیکی به عنوان یکی از انواع فضای کاری، نیرو جاذبه زمین به عنوان یکی از عوامل مقید کننده ربات کابلی در نظر گرفته شده است. در واقع این فضای کاری، برای ربات‌هایی تعریف می‌شود که نیروی جاذبه، نقش یکی از کابل‌های افزونه را می‌تواند بازی کند. فضای کاری دیگری که با نام فضای کاری چرخش امکان‌پذیر ربات شناخته شده است، با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی و عملی تعریف می‌شود. این محدودیت‌های فیزیکی شامل حداقل و حداکثر نیرویی است که می‌توان به کابل‌ها وارد کرد تا نیروی‌های مورد نظر به مجری نهایی ربات اعمال شود. به علت آنکه این محدودیت‌ها، مسأله به مسأله متفاوت هستند و مقدار مشخصی ندارند، نمی‌توانند در مسأله طراحی و بهینه سازی ساختار ربات، در حالت کلی استفاده شوند. اما شتاب‌های خطی و زاویه‌ای مجری نهایی ربات در تعریف فضای کاری دینامیکی گنجانده شده است. در واقع این فضای کاری زیر مجموعه‌ای از فضای کاری چرخش امکان‌پذیر هست که نیروی خارجی ناشی از شتاب‌های تعیین شده می‌باشد. در نهایت، یکی از عمومی‌ترین تعاریف فضای کاری ربات‌های کابلی، فضای کاری کنترل‌پذیر می‌باشد که با نام‌های فضای کاری بستار چرخش[1] [۸] و فضای کاری بستار نیرو[2] [۲۰] نیز شناخته شده است. در این فضای کاری، مجری نهایی ربات می‌تواند در هر جهتی و در هر اندازه ای، نیرو وارد کند، در حالی که کابل‌ها همچنان کشیده باقی می‌مانند. بنابراین در تحلیل این فضای کاری، هیچ محدودیتی برای کشش کابل‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. نکته حائز اهمیت در بررسی این نوع فضای کاری، الزام وجود افزونگی در تعداد کابل‌ها است، به طوری که تعداد کابل‌ها از درجات آزادی ربات بیشتر باشد. از آنجایی که این نوع نگرش تنها به هندسه ربات وابسته می‌باشد، می‌تواند معیار خوبی را برای طراحی بهینه ربات ارائه دهد. لذا این مقاله به طور خاص بر روی این نوع فضای کاری متمرکز شده است و در ادامه جزئیات و نحوهٔ محاسبهٔ آن ارائه می‌شود.

فضای کاری کنترل‌پذیر مجموعه‌ای از موقعیت‌های ربات است که به ازای هر چرخش w در مجری نهایی، حداقل یک بردار نیروی کششی $0 \le f$ وجود داشته باشد به طوریکه $Af = w$ شود.

یکی از مهمترین قضایای مطرح در تحلیل این نوع فضای کاری، بررسی فضای پوچی[3] ماتریس ساختار است. بر مبنای خصوصیت فضای پوچی، موقعیت ربات در فضای کاری کنترل‌پذیر قرار می‌گیرد، اگر و تنها اگر ماتریس ساختار ربات مرتبه کامل بوده و فضای پوچی آن شامل برداری با عناصر مثبت (یا هم علامت و مخالف صفر) باشد [۲۱]. زیرا هنگامی که نیروهای اعمالی به مجری نهایی مشخص شد، می‌توان با استفاده از معادله $Af = w$ نیروهای کابلی را مثبت بدست آورد. با توجه به افزونگی در تحریک در این ربات‌ها که غیر مربعی بودن ماتریس ساختار را نتیجه می‌دهد، باید از شبه معکوس A به منظور بدست آوردن نیروهای کابلی استفاده کرد. شبه معکوس ماتریس A به صورت رابطه (۳) بدست می‌آید:

$$A^{\dagger} = (A^{\mathrm{T}}A)^{-1}A^{\mathrm{T}} \qquad (۳)$$

در این صورت مقدار کمترین مقدار نیروهای کابلی از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$f_{\min} = A^{\dagger}w \qquad (۴)$$

اما رابطه (۴) نمی‌تواند همواره مثبت بودن کابلها را ارضا نماید، از این رو برای حل این مسأله از روش تعمیم یافته حداقل مربعات مطابق رابطه (۵) استفاده می‌شود[۲۲]:

$$f = f_{\min} + cf^{*} \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، f در فضای پوچی ماتریس A قرار دارد و از رابطه (۶) بدست می‌آید:

$$Af^{*} = 0 \qquad (۶)$$

با توجه به رابطه (۶)، هرگاه f اکیداً مثبت باشد، می‌توان با انتخاب مناسب c، عناصر منفی $f_{\min}$ را جبران نمود و به پاسخ $0 \le f$ دست یافت. در ربات‌های کابلی صفحه‌ای با ۴ کابل و ۳ درجه آزادی، به راحتی می‌توان با پیدا کردن بردار فضای پوچی و تعیین علامت عناصر آن، کنترل‌پذیری ربات را در موقعیت داده شده، مشخص کرد.

هدف از بیان فضای کنترل‌پذیر در این مقاله تنها ارائه معیاری برای طراحی بهینه ربات کابلی است. بنابراین محاسبه وسعت فضای کنترل‌پذیر ربات به عنوان معیارهای طراحی دارای اهمیت هستند. در ربات‌های صفحه‌ای که تنها یک بردار پوچی وجود دارد می‌توان ابتدا با استفاده ازشبکه بندی فضای کاری ربات، موقعیت‌هایی را که ربات می‌تواند در آنها قرار بگیرد را بدست آورد و سپس در تک تک نقاط شبکه، بردار فضای پوچی ماتریس ساختار را محاسبه کرد. در صورتی که در یک موقعیت خاص ربات، عناصر بردار هم علامت باشند آن موقعیت جزئی از فضای کنترل‌پذیر محسوب می‌شود. در پایان برای بدست آوردن یک معیار کلی، می‌توان از نسبت تعداد نقاط کنترل‌پذیر بر کل نقاط فضای کاری ربات بهره جست. در واقع شبکه کردن فضای کاری ربات با توجه به وضوح در نظر گرفته شده، تخمینی از مساحت فضای کاری را ارائه می‌دهد.

۳-۲- معیارهای مهارت و دقت ربات

به طور معمول در طراحی‌ها رباتها برای کاهش موقعیت‌هایی که ربات در حالت تکینگی قرار می‌گیرد، از شاخص‌های سینماتیکی استفاده می‌شود. به این معنی که طراح سعی می‌کند با بهینه‌سازی این شاخص‌ها در فضای کاری مکانیزم، مقادیر هندسی و پارامترهای ربات را به گونه‌ای طراحی کند تا حجم و تعداد نواحی تکین در فضای کاری ربات در کمترین حالت ممکن باشد.

۳-۲-۱- عدد وضعیت

با استفاده از ژاکوبین مکانیزم می‌توان بین خطای مفصلی و خطای فضای کاری مکانیزم، رابطه‌ای خطی بدست آورد. به بیان دیگر، خطای مفاصل فعال ربات، توسط بازوانش از طریق نگاشت غیرخطی ژاکوبین به مجری نهایی منتقل می‌شود. بنابراین رباتی بهتر خواهد بود که خطای کمتری را از مفاصل به مجری نهایی منتقل کند. در این حالت، خطای مفاصل محدود و به صورت رابطه (۷) فرض می‌شود:

$$\|\Delta\rho\|_2 \le 1 \qquad (۷)$$

در رابطه (۷)، بردار ρ بیان کننده متغیرهای مفصلی است. همچنین، محدوده خطای مفاصل طوری انتخاب می‌شود که نشان دهندهٔ کوچکترین واحد حرکت قابل قبول مفاصل باشد. از آنجایی که ارتباط متغیرهای مفصلی و فضای کاری از طریق ماتریس ژاکوبین، K، بصورت رابطه (۸) صورت می‌گیرد:

$$\Delta\rho = K\Delta x \qquad (۸)$$

رابطه (۹) بصورت زیر بدست خواهد آمد:

$$\|\Delta\rho\|_2 = \Delta\rho\Delta\rho = \Delta x^{\mathrm{T}}K^{\mathrm{T}}K\Delta x \qquad (۹)$$

1- Wrench Closure Workspace (WCW)
2- Force Closure Workspace (FCW)
3- Null Space

در رابطه (۹)، بردارهای x و ρ به ترتیب نماینده متغیرهای فضای کاری و فضای مفصلی می باشند. این رابطه، نحوه نگاشت شبه کره خطا در مفاصل به بیضوی خطا در فضای کاری را در حالت کلی بیان می‌کند. شکل و حجم این بیضوی در واقع مشخصه‌ای از مهارت مکانیزم است. معیار عدد وضعیت به عنوان یکی از رایج‌ترین شاخص‌های سنجش مهارت ربات با توجه به بیضوی مهارت، به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود [۲۳]:

$$\mathrm{CN} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \qquad (۱۰)$$

که در آن CN برابر است با نسبت قطر بزرگ بیضوی نگاشت، $\sigma_{\max}$، به قطر کوچک آن، $\sigma_{\min}$. این عدد که دارای مقداری بین یک تا بینهایت می‌باشد، معرف نسبت بزرگ‌ترین به کوچکترین مقدار تکینه ماتریس ژاکوبین نیز می‌باشد. از نقطه نظر فیزیکی هرچه این مقدار به سمت یک میل کند، مطلوب‌تر است. زیرا در این حالت، مهارت ربات در همه جهات یکسان می‌باشد و بیضوی مهارت به دایره تبدیل می‌شود. اما هر چه این مقدار به سمت بینهایت میل کند، ربات تنها در یک راستا مهارت خواهد داشت و مهارت انجام حرکت در سایر درجات آزادی خود را از دست می‌دهد و به عبارت دیگر ربات به سمت تکینگی نزدیک‌تر می‌شود [۲۴].

از سوی دیگر هر چه قدر بیضی بزرگتر باشد، خطای منتقل شده به مجری نهایی، بیشتر می‌شود. اما معیار عدد وضعیت هیچ بیانی از میزان بزرگی خطای انتقالی ندارد، زیرا که ممکن است شکل نگاشته شده در فضای کاری، دایره‌ای با شعاع بزرگ باشد که این موضوع نشان دهنده خطای زیاد ربات است، در حالی که عدد وضعیت، مهارت ربات را ایده آل معرفی می‌کند. از طرف دیگر ممکن است شکل نگاشت داده شده، بیضی بسیار کوچکی باشد که یک قطرش بسیار بزرگ‌تر از قطر دیگر باشد که این موقعیت عدد وضعیت بسیار بزرگی به وجود می‌آورد، در حالی که خطای انتقالی بسیار کم می‌باشد. راه حل‌های زیادی برای حل مشکل مفهومی عدد وضعیت مطرح شده است. این گونه روش‌ها، زیر بنای معیارهای جدیدی از مهارت ربات را تشکیل می‌دهند که با نام حساسیت سینماتیکی معروف شده‌اند [۲۵]. به کارگیری این گونه از شاخص‌های سینماتیکی که بیانی از دقت ربات را ارائه می‌دهند، در کنار معیار عدد وضعیت که از مهارت ربات در درجات آزادی مختلف سخن می‌گوید، می‌تواند به خوبی بیضوی مهارت ربات را توصیف کند.

عدد وضعیت یک معیار محلی است و در هر موقعیت ربات تعریف می‌شود، یعنی با توجه به مختصات کارتزین ربات و میزان چرخش آن حول محورهای اویلر تعیین میشود. برای ارزیابی عملکرد کلی ربات، یک معیار عمومی مهارت مطرح می‌شود که بیانگر مهارت کلی ربات است و به شرح رابطه (۱۱) است [۲۵]:

$$GCI = \frac{\int_W \left(\frac{1}{\mathrm{CN}(W)}\right) dW}{\int_W dW} \qquad (۱۱)$$

در رابطه (۱۱)، GCI بیانگر یک معیار کلی از ربات است که میانگینی از عدد وضعیت‌های همه فضای کاری ربات را ارائه می‌دهد و به عنوان عدد وضعیت عمومی ربات شناخته می‌شود.

۳-۲-۲- حساسیت سینماتیکی

برای برطرف کردن مشکلات شاخص‌های سینماتیکی، دو شاخص متمایز با نام حساسیت سینماتیکی دورانی و حساسیت سینماتیکی انتقالی تعریف گردیده است. این دو شاخص، کران بالای خطای دورانی و انتقالی با در نظر گرفتن خطای با نرم واحد در فضای مفصلی را مطابق رابطه (۱۲) بدست می‌دهند [۲۶].

$$\sigma_{r_{c,f}} = \max_{\|\rho\|_c=1} \|\|_f, \sigma_{p_{c,f}} = \max_{\|\rho\|_c=1} \|p\|_f \qquad (۱۲)$$

در رابطه (۱۲)، c و f به ترتیب نرم قید و نرم تابع هدف مسئله حساسیت سینماتیکی را نمایش می‌دهند. همچنین، $\sigma_{p_{c,f}}$ و $\sigma_{r_{c,f}}$ به ترتیب معرف حساسیت سینماتیکی انتقالی و دورانی با نرم قید c و نرم تابع هدف f است و نیز p و φ به ترتیب بیانگر بردار متغیرهای انتقالی و دورانی فضای کاری ربات است. از آنجایی که این دو شاخص خطای درجات آزادی انتقالی و دورانی را به طور جدا گانه در نظر می‌گیرند، دیگر مشکلات مربوط به یکسان نبودن واحدها پیش نمی‌آید [۲۷]. مزیت شاخص حساسیت سینماتیکی بر سایر معیارهای سنجش دقت ربات، تفکیک درجات آزادی دورانی و انتقالی از هم و ارائه مفهوم فیزیکی دقت ربات است. اما این شاخص تفسیری از میزان نزدیکی به تکینگی ارائه نمی‌دهد [۲۶]. چنان که ممکن است در موقعیتی خاص، حساسیت سینماتیکی ربات بسیار مطلوب باشد، اما ربات به مرز تکینگی نزدیک باشد. بنابراین استفاده از معیارهایی نظر عدد وضعیت که مهارت ربات را مورد بررسی قرار می‌دهند، در کنار استفاده از شاخص حساسیت سینماتیکی توصیه می‌شود.

با توجه به اینکه هم بر روی فضای مفصلی و هم در فضای کاری قید نرم وجود دارد، بنابراین چهار نوع حساسیت سینماتیکی خواهیم داشت. مرجع [۲۴] حساسیت سینماتیکی با نرم تابع هدف دو ($f = 2$) و نرم قید بینهایت ($c = \infty$) را به عنوان معقول‌ترین حساسیت سینماتیکی مطرح می‌کند، چراکه به علت نرم بینهایت قیود حرکت مفاصل به یکدیگر وابسته نیست و از طرف دیگر به علت نرم دو تابع هدف با تغییر مرجع مختصات حساسیت متفاوت به وجود نمی‌آید.

حساسیت سینماتیکی نیز همانند معیار عدد وضعیت یک معیار محلی است و با توجه به موقعیت مجری نهایی ربات تغییر می‌کند. لذا برای آنکه یک معیار از وضعیت کلی ربات داشته باشیم می‌توان همانند فرآیندی که در مورد عدد وضیت به کار گرفته شد، از میانگین حساسیت سینماتیکی ربات در موقعیت‌های مختلف ربات استفاده کرد [۲۶]. اما این معیار عمومی نمی‌تواند به خوبی معرف دقت کلی ربات باشد. زیرا همان طور که در رابطه (۱۲) به آن اشاره شده، حساسیت سینماتیکی بر مبنای بیشینه نرم محاسبه می‌شود و ماهیتی اکسترممی دارد. از طرف دیگر، مفهوم فیزیکی این معیار که به دقت ربات تعبیر شده است، ضمانت کننده حداکثر خطای ربات است. بنابراین، نمی‌توان با میانگین‌گیری از دقت ربات در وضعیتهای مختلف، ضامن دقت ربات بود و باید از مکانیزم دیگری استفاده کرد. به عنوان مثال، در صورتی که حساسیت سینماتیکی ربات در یک موقعیت بسیار خوب و در موقعیت دیگر، بسیار نامطلوب باشد، میانگین گیری، متوسط دقت ربات را نشان می‌دهد. این موضوع مثل آن است که دقت ربات در همه موقعیت‌ها، یکسان و برابر با مقدار متوسط باشد. اما این مقدار متوسط نمی‌تواند تضمینی از دقت ربات را ارائه دهد و کرانی برای دقت ربات مشخص نمی‌کند. روشی که در اینجا به عنوان حساسیت سینماتیکی بیشینه مطرح می‌شود، محاسبه حساسیت سینماتیکی بیشینه (انتقالی یا دورانی) در فضای کاری کنترل‌پذیر ربات یا هر فضای کاری مدنظر می‌باشد. محاسبه این پارامتر زمانی اهمیت پیدا می‌کند که سازنده می‌خواهد مقداری را به عنوان حداکثر خطای ربات به کاربر بیان کند. محاسبه این معیار طراحی که یک مسأله بهینه‌سازی است، به طرق مختلف از جمله روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، امکان پذیر می‌باشد.

۴- تحلیل ربات کابلی صفحه‌ای

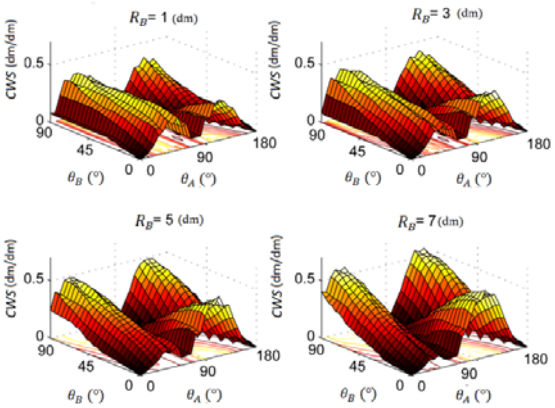
در بخش قبل، ابتدا در فاز امکان‌سنجی، کاربردهای مورد نظرخود از یک ربات

کابلی صفحه‌ای بیان شد و با توجه به نوع کاربردهای بیان شده، توابع هدف لازم برای رسیدن به کابردهای مدنظر معرفی شدند. در این بخش از مقاله، به تحلیل و مقایسه شاخص‌های طراحی پرداخته می‌شود و تقابل و تضاد اهداف بررسی می‌شود. سپس در بخش بعدی و در فاز طراحی، با توجه به جبهه پرتو بدست آمده و با در نظر گرفتن ملاحظات ساخت، طرح مناسب انتخاب می‌شود.

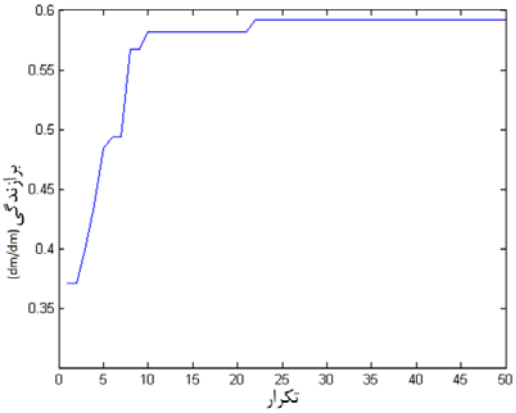
همان طور که در بخش قبل ذکر شد، برای بدست آوردن یک معیار کلی از وسعت فضای کنترل‌پذیر ربات کابلی صفحه‌ای، ازشبکه بندی فضای کاری ربات و محاسبه بردار فضای پوچی ماتریس ساختار استفاده می‌شود. در نهایت، در صورتی که عناصر بردار پوچی هم علامت باشند، نقطه متناظر از شبکه جز فضای کنترل‌پذیر محسوب می‌شود. در این قسمت، فضای مورد بررسی، مربّعی با ابعاد 15×15 dm در صفحه P_{xy} است که مرکز آن بر مبدأ مختصات منطبق است. زوایای مجاز چرخش حول محور z نیز، در بازه $[-30°, 30°]$ در نظر گرفته شده است. شکل ۲، نمودارهای تغییرات این معیار طراحی را نسبت به متغیرهای طراحی نشان می‌دهد. از شکل ۲(الف) مشخص است که درصد فضای کنترل‌پذیری به شدت به پارامتر R_B حسّاس است و تغییرات آن همراستا با تغییرات پارامتر R_B می‌باشد. شکل ۲(الف) نشان می‌دهد که در دو وضعیت (روابط ۱۳ و ۱۴) ، ساختار ربات کابلی به نحوی شکل می‌گیرد که مساحت فضای کنترل‌پذیر بسیار اندکی خواهد بود.

$$\theta_A = k\frac{\pi}{2}, k = 0, 1, 2 \quad (۱۳)$$

$$\theta_B = \pi - \theta_A, \frac{\pi}{2} \le \theta_A \le \pi \quad (۱۴)$$



(الف) تغییرات درصد فضای کنترل‌پذیر به ازای $R_B = 1,3,5,7(dm)$



(ب) بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO، بهترین برازندگی: ۰/۵۹۱۳

شکل ۲ بهینه سازی تک هدفه فضای کاری کنترل‌پذیر ربات کابلی صفحه‌ای

همچنین این شکل نشان می‌دهد که افزایش شعاع مجری نهایی می‌تواند در بهبود این شرایط موثر باشد. ربات بهینه از نظر وسعت فضای کاری کنترل‌پذیر با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[1] بدست آمده و روند آن در شکل ۲(ب) نشان داده شده است. شکل ۲(ب) و اشکالی از این دست، نحوه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی را در تکرارهای متوالی نشان می‌دهند. شکل ۲(ب) نشان می‌دهد که در نهایت، درصد فضای کاری کنترل‌پذیر به عدد 0.5913 همگرا شده است. این حجم کنترل‌پذیری توسط پارامترهای $\theta_A = 156.63°$، $\theta_B = 90°$ و $R_B = 7$ حاصل شده است. مقادیر بدست آمده برای پارامترها با شکل ۲(الف) مطابقت دارد.

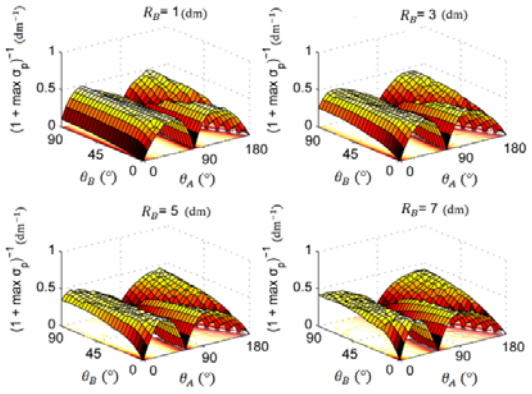
همانند معیار وسعت فضای کنترل‌پذیر، برای بررسی معیارهای حساسیت سینماتیکی از شبکه‌بندی فضای کاری استفاده می‌کنیم. شایان ذکر است که محاسبه شاخص حساسیت سینماتیکی صرفاً در فضای کاری کنترل‌پذیر مجاز است. چرا که وجود نقاطی با حساسیت سینماتیکی بالا در خارج از فضای کاری ربات اهمیّت چندانی ندارد. در شکل ۳(الف)، نمودار تغییرات بدترین حساسیت سینماتیکی انتقالی نسبت به متغیرهای طراحی معرفی شده در قسمت قبل، آورده شده است. استفاده از نگاشت غیر خطی $(1 + \max \sigma_P)^{-1}$ همان طور که در شکل ۳(الف) نشان داده شده است می‌تواند تغییرات نامحدود حساسیت سینماتیکی را در بازه محدود [0,1] قرار دهد. در شکل ۳(الف) محدوده با رنگ روشن دارای وضعیت بهتری از دیدگاه حساسیت سینماتیکی انتقالی می‌باشد. از شکل ۳(الف) می‌توان نتیجه گرفت که اولا تغییرات معیار حساسیت سینماتیکی نسبت به پارامتر R_B بسیار کوچک است و ثانیا در شرایط که قیود معادلات (۱۳) و (۱۴) ارضا شوند، حساسیت سینماتیکی همانند معیار CWS مقادیر نامطلوبی خواهد داشت.

شکل ۳(ب) نحوه بهینه‌سازی این معیار را با استفاده از الگوریتم PSO نشان می‌دهد. با استفاده از این الگوریتم، ربات بهینه دارای پارامترهای $\theta_A = 37.52°$، $\theta_B = 55.20°$ و $R_B = 1$ است. در این وضعیت شاخص حساسیت سینماتیکی انتقالی مقدار 0.493 را داراست. برای حساسیت سینماتیکی دورانی نیز مشابه با حساسیت سینماتیکی انتقالی عمل می‌کنیم و از معیار بدترین حساسیت سینماتیکی دورانی برای معرفی دقت چرخشی مکانیزم در فضای کنترل‌پذیر استفاده می‌نماییم. شکل ۴(الف) نحوه تغییرات عکس بدترین حساسیت سینماتیکی دورانی را نسبت به متغیرهای طراحی نشان می‌دهد.

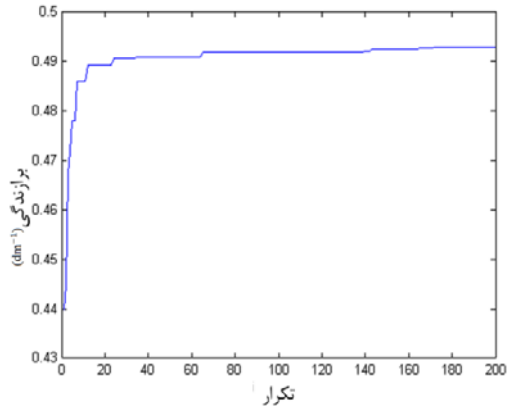
از شکل ۴(الف) می‌توان فهمید که اولا معیار بدترین حساسیت سینماتیکی دورانی همانند شاخص کنترل‌پذیری، شدیداً به پارامتر R_B حساس است. به عبارت دیگر، دقت دورانی ربات‌ها با افزایش R_B بهبود می‌یابد. ثانیا در شرایطی که قیود معادله (۱۴) ارضا شوند، مشابه معیار کنترل‌پذیری و حساسیت سینماتیکی انتقالی، این معیار مقادیر نامطلوبی خواهد داشت که با افزایش شعاع مجری نهایی بهبود می‌یابد. نقطه بهینه معیار حساسیت سینماتیکی نیز با استفاده از الگوریتم PSO محاسبه شده و در شکل ۴(ب) آورده شده است. این مقدار برابر است با $(1 + \max \sigma_r)^{-1} = 0.903$ که با بهره‌گیری از پارامترهای $\theta_A = 15.22°$، $\theta_B = 39.24°$ و $R_B = 7$ بدست می‌آید.

برای بررسی شاخص عدد وضعیت عمومی ربات، مشابه با روند ذکر شده برای محاسبه وسعت فضای کاری کنترل‌پذیر و حساسیت سینماتیکی ربات عمل می‌شود. بدین ترتیب که ابتدا با گسسته سازی فضای کاری کنترل‌پذیر ربات، شاخص عدد وضعیت در هر موقعیت محاسبه میشود. سپس، شاخص عدد وضعیت عمومی با میانگین گیری از عکس عدد وضعیت ربات در موقعیت‌های مختلف، محاسبه می‌شود.

1- Particle Swarm Optimization (PSO)



(الف) تغییرات حساسیت سینماتیکی انتقالی به ازای $R_B = 1,3,5,7(dm)$



(ب) بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO، بهترین برازندگی: ۰/۴۹۳

شکل ۳ بهینه سازی تک هدفه حساسیت سینماتیکی انتقالی

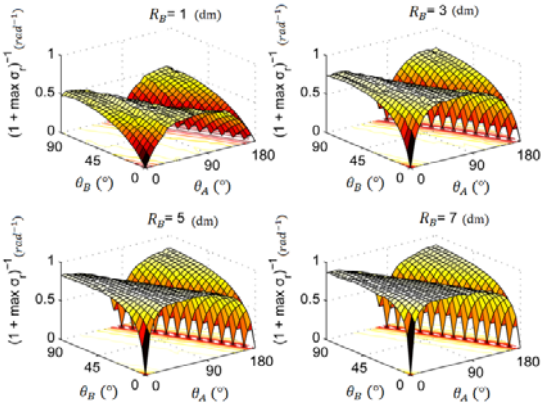
شکل ۵(الف) نحوه تغییرات عدد وضعیت عمومی را با توجه به متغیرهای طراحی نشان می‌دهد.

شکل ۵(الف) نشان می‌دهد که (۱) بر خلاف معیارهای وسعت فضای کنترل‌پذیر و حساسیت سینماتیکی که با افزایش شعاع مجری نهایی بهبود می‌یافتند، عدد وضعیت عمومی با افزایش R_B کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر به تکینگی نزدیک‌تر می‌شود. نتایج بدست آمده در شکل ۵(ب) نشان می‌دهد که ربات بهینه دارای پارامترهای $\theta_A = 35.67°$، $\theta_B = 79.31°$ و $R_B = 1$ است. در این وضعیت شاخص عدد وضعیت عمومی مقدار 0.267 را داراست.

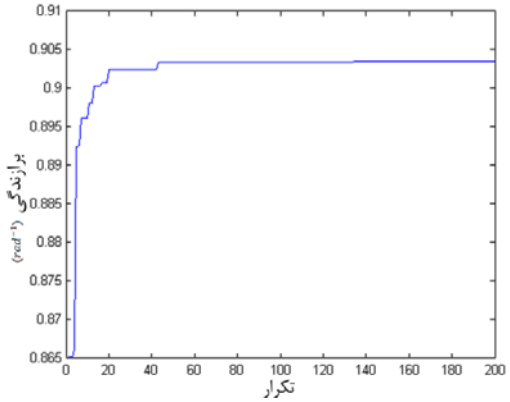
با توجه به آنچه در قسمت‌های قبلی نشان داده شده است، می‌توان فهمید که همه معیارهای فوق به جز شاخص GCI با افزایش R_B بهبود می‌یابند. این در حالی است که افزایش R_B موجب بزرگ شدن مجری نهایی می‌شود که این امر خود مشکلات خاص خود را به همراه دارد. برای آن که مجری نهایی بتواند تمامی موقعیت‌های فضای کاری تعریف شده‌اش را تجربه کند، باید محیطی بسیار بزرگ‌تر از فضای کاری ربات، خالی از هر گونه شی باشد تا از برخوردهای احتمالی مجری نهایی با اشیاء پیرامونش جلوگیری شود. لذا باید سعی کرد تا حد ممکن از مجری نهایی کوچک استفاده شود.

۵- بهینه‌سازی چند هدفه ربات کابلی صفحه‌ای

در این قسمت سعی می‌شود، متغیرهای طراحی ربات کابلی که مطابق با بخش ۲ عبارت‌اند از R_B، θ_A و θ_B، به گونه ای محاسبه شوند که مصالحه‌ای بین توابع هدف وسعت فضای‌کاری کنترل‌پذیر، بدترین حساسیت سینماتیکی انتقالی و دورانی و عدد وضعیت عمومی ربات صورت گیرد.



(الف) تغییرات حساسیت سینماتیکی دورانی به ازای $R_B = 1,3,5,7(dm)$



(ب) بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO، بهترین برازندگی: ۰/۹۰۳

شکل ۴ بهینه سازی تک هدفه حساسیت سینماتیکی دورانی

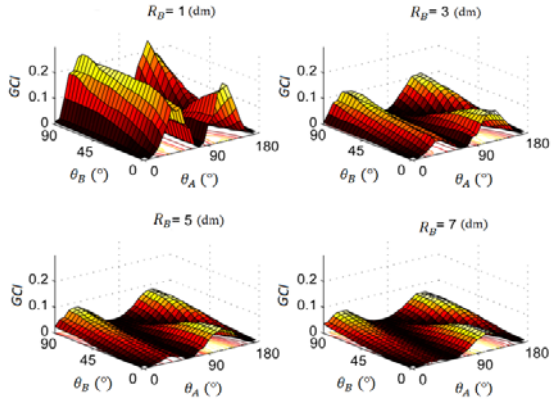
روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه به کار رفته در این قسمت، الگوریتم NSGA II[1] و الگورتیم AWPSO[2] می‌باشند که از جمله الگوریتم‌های نخبه گرا بوده و جزئیات آنها به ترتیب در [۲۸] و [۲۹] بیان شده است. مرجع [۲۴] به همین روش به بهینه سازی چندهدفه ربات سه درجه آزادی 3RPR پرداخته است. آنچه این مقاله را از کار ارائه شده در [۲۴] متمایز می سازد، نوع ربات مورد نظر، تعداد توابع هدف، تعداد متغیرهای طراحی و نوع الگوریتم‌های بهینه سازی است. ربات مورد بررسی در مرجع [۲۴] دارای ۳ لینک صلب است که با ۲ متغیر طراحی، موضوع مسئله بهینه سازی چندهدفه قرار گرفته است. همچنین، در این مرجع با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه NSGA II ، جبهه پرتوی توابع هدف حساسیت سینماتیکی انتقالی و دورانی و فضای کاری ربات تعیین گردیده است.

در این مقاله، شعاع مجری نهایی، بدترین حساسیت سینماتیکی انتقالی و دورانی، توابع هدف کمینه سازی می‌باشند و معیارهای درصد فضای کنترل‌پذیر و عدد وضعیت عمومی، توابع هدفی هستند که باید تا جای ممکن بیشینه گردند. با توجه به آنچه در قسمت‌های قبل بیان شد، عدد وضعیت عمومی بر خلاف حساسیت سینماتیکی و درصد فضای کنترل‌پذیر، با کاهش شعاع مجری نهایی بهبود می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود که از جهت‌گیری پاسخ‌های جبهه پرتو به سمت افزایش هرچه بیشتر پارامتر R_B جلوگیری شود. بنابراین، برای کاهش حجم محاسبات، معیار کاهش حجم مجری نهایی به عنوان شاخصی نهفته در عدد وضعیت عمومی، از اهداف مسأله بهینه چند

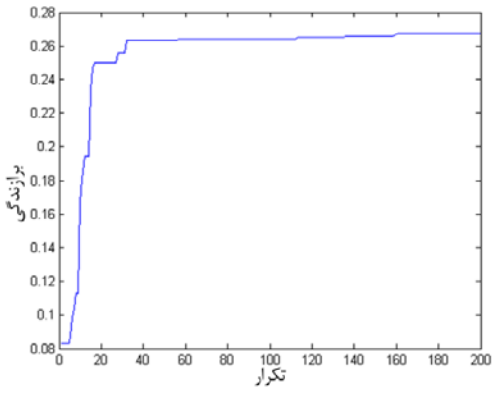
1- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
2- Adaptive Weighted PSO

هدفه ربات کابلی حذف میشود. برای ساده‌تر شدن مسأله می‌توان همگی توابع هدف را به یک نوع مسأله بهینه‌سازی تبدیل کرد، به عنوان مثال، به جای استفاده از بدترین حساسیت سینماتیکی که یک تابع هدف کمینه سازی است، از تابع $(1+\max\sigma)^{-1}$ استفاده کرد تا به یک مسأله بیشینه سازی تبدیل شود و هماهنگ با سایر توابع هدف شود. مسأله مهم دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد، یکسان نبودن بُرد اهداف و دامنه تغییرات آنها است. به عنوان مثال برد تابع هدف درصد فضای کنترل‌پذیری در بازه $[0,1]$ قرار می‌گیرد، در حالی که بدترین حساسیت سینماتیکی می‌تواند هر عددی در بازه $[0,\infty]$ را شامل باشد. این موضوع باعث می‌شود، تلاش الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه برای کاهش اهداف یکسان نباشد، بنابراین لازم است که برد اهداف یکه شود تا اهمیت تمامی توابع در نظر الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه، یکسان شود. در راستای نایل شدن به این هدف، استفاده از تابع $(1+\max\sigma)^{-1}$ می‌تواند برد نامحدود حساسیت سینماتیکی را در بازه محدود $[0,1]$ قرار دهد.

همان طور که گفته شد، در این مقاله برای حل مسأله بهینه‌سازی چند هدفه از دو الگوریتم NSGA II و AWPSO ، استفاده شده است. در هر الگوریتم با توجه به ابعاد مسأله و پارامترهای بهینه‌سازی، جمعیت جواب اولیه برابر با ۱۵۰ در نظر گرفته شده است. در الگوریتم NSGA II، مقادیر پارامترهای جهش و برش به ترتیب برابر با ۰/۲و ۰/۸ و تعداد نسل‌ها برابر با ۳۰۰ می‌باشد. در الگوریتم AWPSO نیز پارامترهای α_0 و ω_0 و μ به ترتیب برابر با ۰/۵و ۰/۲ و ۰/۲در نظر گرفته شده‌اند. همچنین جمعیت جواب اولیه، اندازه آرشیو و تعداد تکرار الگوریتم به ترتیب برابر با ۴۰، ۴۰ و ۳۰۰ انتخاب شده‌اند.

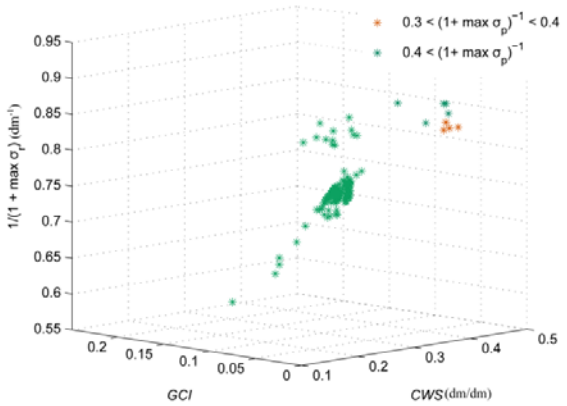


(الف) تغییرات عدد وضعیت عمومی به ازای $R_B = 1,3,5,7(dm)$

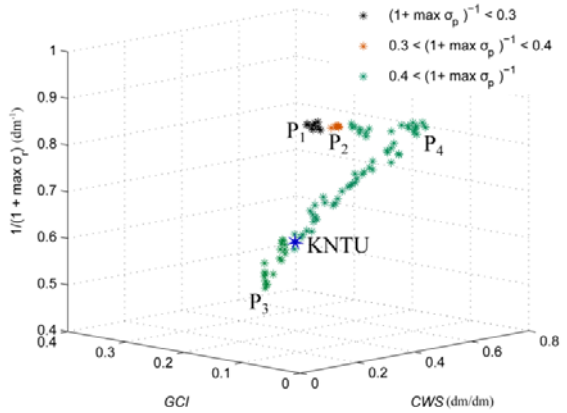


(ب) بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO، بهترین برازندگی: ۰/۲۶۷

شکل ۵ بهینه سازی تک هدفه عدد وضعیت عمومی



شکل ۶ جبهه پرتو بدست آمده به وسیله‌ی الگوریتم NSGA II



شکل ۷ جبهه پرتو بدست آمده به وسیله‌ی الگوریتم AWPSO

جبهه پرتو بدست آمده توسط هر دو الگوریتم در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است. باید توجه داشت که در شکل‌های ۶ و ۷، درصد فضای کنترل‌پذیر *CWS*، عدد وضعیت عمومی *GCI*، بدترین حساسیت سینماتیکی انتقالی $\max\sigma_p$ و بدترین حساسیت سینماتیکی دورانی $\max\sigma_r$ به عنوان چهار هدف طراحی در نظر گرفته و با هم مقایسه شده‌اند. از آنجایی که نمایش بیش از ۳ بعد در دستگاه مختصات مقدور نیست، در شکل ۶ از تغییر رنگ به عنوان بعد چهارم استفاده شده است. مقایسه جبهه‌های پرتو بدست آمده توسط دو الگوریتم NSGA II و AWPSO نشان می‌دهد که که پاسخ‌های الگوریتم AWPSO به صورت یکنواخت‌تری در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. از طرف دیگر، در صورت مقایسه غلبه جبهه پرتوهای بدست آمده، متوجه می‌شویم که تعدادی از پاسخ‌های جبهه پرتو الگوریتم AWPSO مغلوب جبهه پرتو الگوریتم NSGA II شده‌اند. بنابراین الگوریتم NSGA II توانسته است پاسخ‌های غالب بیشتری را فرآهم آورد. در نهایت می‌توان این طور نتیجه گرفت که برای محاسبه جبهه پرتوی بهینه ربات کابلی صفحه ای، استفاده از الگوریتم NSGA II نسبت به الگوریتم AWPSO مفیدتر و مؤثرتر خواهد بود.

مشخصات تعدادی از نقاط جبهه پرتو بدست آمده توسط الگوریتم NSGA II، در جدول ۱ آورده شده است. این نقاط که در شکل ۶ با فلش مشخص شده اند، در ادامه به تفضیل بررسی می شوند. از میان پاسخ‌های بدست آمده از جبهه پرتو تنها پاسخ‌هایی مورد قبول هستند که در محدودهٔ مطلوب مطابق روابط ۱۵ و ۱۶ باشند:

$$cws > 0.2,\ (1+\max(\sigma_p))^{-1} > 0.45 \qquad (۱۵)$$

$$GCI > 0.1,\ (1+\max(\sigma_r))^{-1} > 0.6 \qquad (۱۶)$$

قیود فوق دلخواه بوده و می‌تواند با توجه به شرایط مسئله تغییر کند. همان طور که از جدول ۱ مشخص است، رباتی با متغیرهای طراحی نقطه P_1 از نظر حساسیت سینماتیکی دورانی وضعیت بسیار مطلوبی دارد. همانطور که در بخش ۳.۳ بدان اشاره شد، حساسیت سینماتیکی دورانی به دقت دورانی ربات تعبیر می شود و درجایی که دقت حرکات دورانی برای کاربر از اهمیت ویژه برخوردار است، بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. دراینجا، این مشخصه عالی حساسیت سینماتیکی به بهای از دست دادن سایر توابع هدف حاصل شده است. به طوری که مابقی توابع هدف مقدار نامطلوبی پیدا می‌کنند. همچنین در این حالت شعاع مجری نهایی برابر با بیشترین مقدار در نظر گرفته شده برای پارامتر R_B یعنی ۷ است که وضعیت نامطلوبی است. بنابر توضیحات فوق، نقطه P_1 با وجود داشتن حساسیت سینماتیکی مناسب نمی‌تواند به عنوان پارامتر طراحی مناسب انتخاب شود.

نقطه P_2 در جدول ۱ از نظر تابع هدف GCI وضعیت بسیار مطلوبی دارد. همانطور که در بخش ۲.۳ بدان اشاره شد، در شرایطی که توانایی انجام حرکات در تمامی جهات برای ربات یکسان و همگن باشد، عدد وضعیت عمومی ربات بهبود می یابد. بنابراین، هنگامیکه کاربر به رباتی نیاز دارد که می خواهد در تمامی جهات قدر مانور یکسانی داشته باشد، توجه به این معیار، اهمیت پیدا می‌کند. اما نقطه P_2 نمی‌تواند تمامی شرایط معادلات (۱۵) و (۱۶) را ارضا نماید. زیرا که شرایط معادله (۱۶) در ارتباط با تابع هدف $(1+\max\sigma_r)^{-1}$ نقض می‌گردند. بنابراین این نقطه نیز نمی تواند به عنوان یک مصالحه مناسب از توابع هدف در نظر گرفته شود.

کنترل‌پذیری و عدد وضعیت نامطلوب نقطه P_3، این نقطه را با وجود حساسیت سینماتیکی انتقالی عالی، انتخاب نامطلوبی برای طراحی ربات کابلی معرفی می‌کند. انتخاب نقطه P_3 تنها در شرایطی پیشنهاد می‌شود که دقت ربات در حرکت انتقالی برای کاربر از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار باشد.

در مواردی که حرکت مجری نهایی ربات باید فضای بزرگی را پوشش دهد، وسعت زیاد فضای کاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نقطه P_4 نیز دارای وسعت فضای کاری زیادی است، اما با وجود شرایط بسیار عالی از نظر معیار کنترل‌پذیری، از نظر معیار GCI وضعیت مناسبی ندارد. بنابراین در یک انتخاب چند جانبه نمی‌تواند به عنوان گزینه مناسب مطرح باشد. اما نقطه P_5 از جبهه پرتو محاسبه شده در شکل ۶ ممکن است از دیدگاه یک تابع هدف خاص شرایط بسیار عالی نداشته باشند، اما با در نظر گرفتن همزمان همه توابع هدف، حداقل‌های همه شاخص‌ها را برآورده می‌سازند. به عبارت دیگر هیچ یک از نامساویهای معادلات (۱۵) و (۱۶) نقض نمی‌گردد.

بنابراین متغیرهای طراحی این نقطه می‌توانند به عنوان متغیرهای طراحی ربات کابلی صفحه‌ای انتخاب شوند. علیرغم آنکه این طرح از نظر معیارهای سینماتیکی وضعیت مطلوبی دارد، کاربر در هنگام پیاده سازی آن با مشکلاتی مواجه می‌شود.

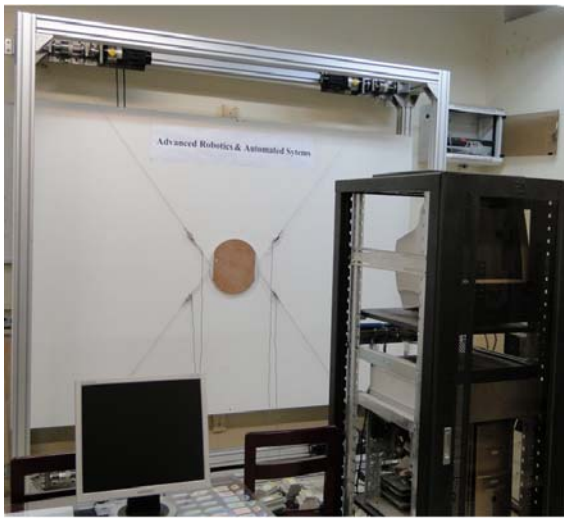
جدول ۱ نقاط مشخص شده در جبهه پرتو بدست آمده از الگوریتم NSGA II

	θ_A (deg)	θ_B (deg)	R_B (dm)	CWS	$\frac{1}{1+\max\sigma_p}$	$\frac{1}{1+\max\sigma_r}$	GCI
نقطه P_1	۶۳/۵۵	۱۶/۸۴	۷	۰/۰۲۲	۰/۰۲۸۸	۰/۹۳۱۲	۰/۰۰۰۱
نقطه P_2	۳۶/۲۰	۸۲/۸۳	۱	۰/۳۷۷۴	۰/۴۹۲۳	۰/۴۸۵۲	۰/۲۴۵۸
نقطه P_3	۲۸/۸۸	۱/۲۴	۶/۹	۰/۰۹۰۹	۰/۴۹۶۸	۰/۸۸۶۶	۰/۰۱۰۸
نقطه P_4	۱۵۶/۴۲	۹۰	۷	۰/۵۸۱۳	۰/۴۱۶۹	۰/۸۴۶۷	۰/۰۷۰۱
نقطه P_5	۳۶/۲۶	۵۲/۰۶	۱/۶۲	۰/۳۴۴۴	۰/۴۸۶۲	۰/۶۶۸۱	۰/۱۴۷۴
ربات KNTU	۴۶/۸۴	۰	۱/۵	۰/۲۱۲۱	۰/۴۹۱۹	۰/۶۲۸۳	۰/۱۱۳۰

به منظور جلوگیری از برخورد میان کابلهای ضربدری، باید آنها در صفحاتی متفاوت و موازی با صفحه P_{xy} قرار گیرند که پیچیدگی بیشتر و هزینه ساخت بیشتر به همراه خواهد داشت. به علاوه، در چنین طرحی مجری نهایی ممکن است چرخش‌های نامطلوبی حول محورهای x و y داشته باشد و حفظ حرکت ربات در یک صفحه کار مشکلی خواهد بود.

محاسبه جبهه پرتو بهینه علاوه بر اینکه منجر به ارائه پاسخ‌های مناسب می‌شود، امکان بررسی غلبهٔ پاسخ‌های دیگر را نیز فراهم می‌آورد. با این تدبیر می‌توان طرح‌های بیشماری را در غالب متغیرهای طراحی ارائه شده در این بخش بررسی کرد و میزان غلبه آنها را محاسبه نمود. به عنوان مثال، ربات کابلی صفحه‌ای دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی که متغیرهای طراحی و مقادیر تابع هدف آن در جدول ۱ نمایش داده شده است، می‌تواند با نقاط بدست آمده از جبهه پرتو مقایسه شود. نتیجه این مقایسه نشان می‌دهد که طرح KNTU می‌تواند به عنوان یک نقطه پرتو محسوب شود، زیرا هیچ یک از پاسخ‌های ارائه شده در جبهه پرتو، در همه توابع هدف از طراحی بهینه دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی بهتر نیست و از طرف دیگر طرح KNTU نیز بر هیچ یک از پاسخ‌های جبهه پرتو غلبه پیدا نمی‌کند. همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، طرح KNTU دارای توابع هدفی با مقادیر $cws = 0.2121 > 0.2$، $(1+\max(\sigma_p))^{-1} = 0.4919 > 0.4$، $GCI = 0.1130 > 0.1$ و $(1+\max(\sigma_r))^{-1} = 0.6283 > 0.6$ می‌باشد. بنابراین توابع هدف این طرح، تمامی قیود نامعادلات (۱۵) و (۱۶) را ارضا می کند. این طرح، علاوه بر آنکه از نظر همه توابع هدف وضعیت نسبتاً مطلوبی دارد و قیود همه معیارها را در معادلات (۱۵) و (۱۶) برآورده می‌سازد، به علت استفاده از قید $\theta_B = 0$، سادگی ساخت و کنترل ربات را به همراه دارد. مقادیر متغیرهای طراحی این ربات کابلی طوری انتخاب شده اند که سهولت در ساخت را فراهم کنند. داشتن مجری نهایی کوچک و عدم برخورد کابل‌ها با وجود قرار گیری همه کابل‌ها در یک صفحه، از دیگر ویژگی‌های این ربات کابلی صفحه‌ای به شمار می‌آید. شکل ۸ نمونهٔ ساخته شدهٔ این طرح را که به منظور حمل تجهیزات اپتیکی اشعه لیزر طراحی شده است، نشان می‌دهد. جزئیات بیشتر این طرح در [۳۰] آورده شده است.

در زمینه نحوه بررسی و تضمین صحت نتایج نیز می توان به دو بحث زیر اشاره کرد: (۱) آیا نتایج ارائه شده به عنوان جبهه پرتو بهینه، به طور قطع جبهه پرتو غالب است؟ و به عبارت دیگر، آیا ربات کابلی وجود دارد که از لحاظ جمیع اهداف، از پاسخ های ارائه شده بهتر باشد؟ (۲) آیا تحلیل‌های ارائه شده برای طرح KNTU صحیح است و تا چه حد این طرح کارآمد است. برای پاسخ دادن به سوال اول، باید به این نکته اشاره کرد که مسئلهٔ طراحی بهینه چند هدفه ربات کابلی، دارای حل از پیش تعیین شده ای نیست که بتوان با مقایسه پاسخ های بدست آمده با آن، از صحت و سقم پاسخ ها اطمینان حاصل کرد، چنان که در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی چند هدفه برای بررسی نحوه عملکرد الگوریتم‌های بهینه سازی از این روش استفاده می کنند. در چنین مواردی، مرجع [۲۸] به منظور حل مسئله، پیشنهاد می کند که از الگوریتمهای متنوع بهینه سازی استفاده شود و پاسخ ها با یکدیگر مقایسه گردند. این مرجع، مقایسهٔ نحوه پراکندگی پاسخ ها و میزان غالب بودن آنها را به عنوان معیارهایی مطرح می کند که نزدیکی به جبهه پرتو را تضمین می دارد. به عبارت دیگر، بنابر آنچه مرجع [۲۸] اشاره می کند، در شرایطی که جبهه پرتو بهینه واقعی در دسترس نیست، تنها راه بررسی صحت نتایج جبهه پرتو بدست آمده، حل مسئله از روش های مختلف و بررسی نتایج آنهاست.



شکل ۸ ربات کابلی صفحه‌ای ساخته شده در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (طرح KNTU)

بنابر مطالب فوق، همین رویکرد در این مقاله لحاظ گردیده و از دو الگوریتم بهینه سازی چند هدفه NSGA II و AWPSO استفاده شده است تا جبهه پرتو توابع هدف تعیین شود. ضمن آنکه جبهه پرتو بدست آمده از دو الگوریتم، این امکان فراهم آورده تا خواننده مقاله بتواند از روشهای دیگری جبهه پرتو مورد نظر را محاسبه کند و نتایج آن را با نتایج این مقاله مقایسه نماید و از صحت و سقم نتایج خود مطلع شود. همانطور که پیشتر بیان گردید، مقایسه تعدادی از نقاط دو جبهه پرتو نشان می دهد که بعضی از پاسخ های بدست آمده از AWPSO، مغلوب جبهه پرتوی NSGA II می شود. در حالی که حتی یک پاسخ از جبهه پرتو NSGA II مغلوب پاسخ‌های جبهه پرتو AWPSO نمی شوند. این موضوع از طرفی کارایی جبهه پرتوی NSGA II را در رسیدن به جبهه پرتوی غالب نشان می دهد و از طرف دیگر، میزان اعتبار پاسخ‌های بدست آمده توسط الگوریتم NSGA II را نشان می‌دهد. اما در پاسخ به سوال دوم، شاید مهمترین دلیلی که در ارتباط با صحت نتایج می توان به آن اشاره کرد، پیاده سازی طرح KNTU و کارایی مطلوب آن است. مشخصات عملی طرح KNTU که در مراجع [۳۰،۳۱] آمده است، به منزله تاییدی بر نتایج توابع هدف ذکر شده در این مقاله می باشد. در پایان باید به این موضوع توجه داشت که استدلال بیان شده در این قسمت، در مقام اثبات ادعای غلبه جبهه پرتو بدست آمده نیست، بلکه قصد آن دارد تا کارایی طرح پیشنهادی KNTU را تایید کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ربات‌های کابلی صفحه‌ای با دو درجه آزادی حرکت انتقالی در صفحه و یک درجه آزادی حرکت دورانی حول محور عمود بر صفحهٔ ربات به عنوان گونهٔ عمده‌ای از ربات‌های کابلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از میان تعریف‌های متعددی که برای فضای کاری ربات‌های کابلی بیان شده است، فضای کاری کنترل‌پذیر به عنوان یکی از جامع‌ترین وکلی‌ترین تعاریف فضای کاری ربات‌های کابلی انتخاب شده است. برای سنجش مهارت ربات و میزان دوری از تکینگی، از معیار عدد وضعیت عمومی به عنوان شاخصی مؤثر در بررسی کارایی ربات کابلی استفاده شده است. علاوه بر این، حساسیت سینماتیکی به عنوان معیاری که معرف دقت ربات است، به تفصیل بررسی گردیده و بدترین حساسیت سینماتیکی ربات در فضای کاری کنترل‌پذیر به عنوان شاخصی قابل ارائه به کاربر معرفی شده است. برای برآورده کردن همه شاخص‌های ذکر شده، با انتخاب متغیرهای طراحی هندسی ربات و با به کار گیری روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه هوشمند، طرح‌های بهینه محاسبه شده اند. به علت تقابل و تضاد اهداف، بهینه‌سازی تنها یک هدف در این مسئله به عدم دستیابی به اهداف دیگر منجر می‌شود. به همین منظور از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند NSGA II و AWPSO استفاده می‌شود تا جبهه پرتو بهینه مشخص شود و نشان داده می‌شود که کارایی الگوریتم NSGA II در محاسبه جبهه پرتو ربات کابلی صفحه‌ای به مرابت بیشتر از الگوریتم AWPSO خواهد بود. در نهایت، تحلیل پاسخ‌های بدست آمده به عنوان یکی از مهمترین بخش‌های فرآیند بهینه‌سازی چند هدفه انجام شده و جواب‌های قابل قبول با توجه به اهمیت توابع هدف انتخاب شده اند.

۷- فهرست علائم

A	ماتریس ساختار
f	بردار نیروهای اعمال شده به کابل‌ها
K	ماتریس ژاکوبین
$\max \sigma_p$	بزرگترین حساسیت سینماتیکی انتقالی
$\max \sigma_r$	بزرگترین حساسیت سینماتیکی دورانی
p	بردار متغیرهای انتقالی فضای کاری ربات
P_{xy}	صفحه قرار گیری مجری نهایی
R_A	شعاع چهارچوب ثابت ربات کابلی
R_B	شعاع مجری نهایی
w	بردار چرخش اعمالی به مجری نهایی
W	فضای کاری
x	متغیر تعریف شده در فضای کاری

علائم یونانی

θ_A	زاویه مثلثاتی محل قرارگیری اولین کابل جمع کن
θ_B	زاویه مثلثاتی محل اتصال چهارمین کابل به مجری نهایی
ρ	متغیر فضای مفصلی
$\sigma_{\max}$	بزرگترین مقدار منفرد ماتریس ژاکوبین
$\sigma_{\min}$	کوچکترین مقدار منفرد ماتریس ژاکوبین
$\sigma_{p_{c,f}}$	حساسیت سینماتیکی انتقالی با نرم قید cو نرم تابع هدف f
$\sigma_{r_{c,f}}$	حساسیت سینماتیکی دورانی با نرم قید cو نرم تابع هدف f
φ	بردار متغیرهای دورانی فضای کاری ربات

۸- مراجع

[1] M. Bamdad, S. Faroghi, Stability Measure for a Parallel Cable Driven Robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol 13, No. 10, pp. 25-34 (In Persian).

[2] L. Dominjon, J. Perret, and A. Lecuyer, Novel Devices and Interaction Techniques for Humanscale Haptics, *The Visual Computer*, Vol. 23, No. 4, pp. 257–266, 2007.

[3] S. Tadokoro, R. Verhoeven, M. Hiller, and T. Takamori, A Portable Parallel Manipulator for Search and Rescue at Large-scale Urban Earthquakes and an Identification Algorithm for the Installation in Unstructured Environments, *in Proceedings. of IEEE/RSJ IROS'99* , Vol. 2. 1999, pp. 1222–1227.

[4] G. Rosati, P. Gallina, and S. Masiero, Design, Implementation and Clinical Tests of a Wirebased Robot for Neurorehabilitation, *IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 560–569, 2007.

[5] T. Morizono, K. Kurahashi, and S. Kawamura, Realization of a Virtual Sports Training System with Parallel Wire Mechanism, *in Robotics and Automation, 1997 Proceedings, 1997 IEEE International Conference on,* Vol. 4. IEEE, 1997, pp. 3025–3030.

[6] H T. Higuchi, A. Ming, and J. Jiang-Yu, Application of Multi-dimensional Wire Cranes in Construction, *in Proceedings of the 5th International Symposium on Robotics in Construction*, 1988, pp. 661–668.

[7] M. Aref, H. Taghirad, and S. Barissi, Optimal Design of Dexterous Cable Driven Parallel Manipulators, *International Journal of Robotics*, Vol. 1, No. 1, pp. 29–47, 2009.

[8] P. Bosscher, A. Riechel, and I. Ebert-Uphoff, Wrench-feasible Workspace Generation for Cable-driven Robots, *Robotics, IEEE Transactions on*, Vol. 22, No. 5, pp. 890–902, 2006.

[9] G. Barrette and C. Gosselin, Determination of the Dynamic Workspace of Cable-driven Planar Parallel Mechanisms, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 127, p. 242, 2005.

[10] H. Osumi, Y. Utsugi, and M. Koshikawa, Development of a Manipulator Suspended by Parallel Wire Structure, *in Intelligent Robots and Systems, 2000.(IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International. Conference on*, Vol. 1. IEEE, 2000, pp. 498–503.

[11] R. Verhoeven and M. Hiller, Estimating the Controllable Workspace of Tendon-based Stewart Platforms, *Advances in Robot Kinematics*, pp. 277–284, 2000.

[12] C. Gosselin, J. Angeles, Singularity Analysis of Closed-loop Kinematic Chains, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 3, pp. 281–290, 1990.

[13] T. Yoshikawa, Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy, *in The First International Symposium on Robotics Research: Mit Press Cambridge, MA*, 1984, pp. 735–747.

[14] J. Salisbury and J. Craig, Articulated hands, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 4–17, 1982.

[15] P. Cardou, S. Bouchard, and C. Gosselin, Kinematic-sensitivity Indices for Dimensionally Nonhomogeneous Jacobian Matrices, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 26, No. 1, pp. 166–173, 2010.

[16] A. Fattah and S. Agrawal, On the Design of Cable-suspended Planar Parallel Robots, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 127, p. 1021, 2005.

[17] A. Hay and J. Snyman, Optimization of a Planar Tendon-driven Parallel Manipulator for a Maximal Dextrous Workspace, *Engineering Optimization*, Vol. 37, No. 3, pp. 217–236, 2005.

[18] S. Khalilpour, A. Zarif Loloei, M. Tale Masouleh, and H. Taghirad, Kinematic Performance Indices Analyzed on Four Planar Cable Robots via Interval Analysis, *in Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2013 First RSI/ISM International Conference on. IEEE*, 2013, pp. 313–318.

[19] M. Gouttefarde, S. Krut, O. Company, F. Pierrot, and N. Ramdani, On the Design of Fully Constrained Parallel Cable-driven Robots, *Advances in Robot Kinematics: Analysis and Design*, pp. 71–78, 2008.

[20] A. Riechel and I. Ebert-Uphoff, Force-feasible Workspace Analysis for Underconstrained, Point-mass Cable Robots, *in Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on, vol. 5. IEEE*, 2004, pp. 4956–4962.

[21] A. Zarif Loloei and H. D. Taghirad. Controllable Workspace of Cable Driven Redundant Parallel Manipulators by Fundamental Wrench Analysis, Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering Vol. 36, No.3 p. 297-313, 2012.

[22] C.Ferraresi, M.Paoloni and F.Pescarmona, A New Methodology for the Determination of the Workspace of Six-DOF Redundant Parallel Structures Actuated by Nine Wires, *Robotica*, Vol. 25, p 113-20, 2007.

[23] J. Merlet, Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 128, p. 199, 2006.

[24] M. Saadatzi, M. Tale Masouleh, H. Taghirad, C. Gosselin, and M. Teshnehlab, Multi-objective Scale Independent Optimization of 3-RPR Parallel Mechanisms, *Proceedings of the IFToMM*, 2011.

[25] S. Bouchard and C. M. Gosselin, Kinematic Sensitivity of a Very Large Cable-driven Parallel Mechanism, *in Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, 2006.

[26] M. Saadatzi, M. Masouleh, H. Taghirad, C. Gosselin, and P. Cardou, Geometric Analysis of the Kinematic Sensitivity of Planar Parallel Mechanisms, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 35, No. 4, p. 477, 2011.

[27] W. A. Khan and J. Angeles, The Kinetostatic Optimization of Robotic Manipulators: the Inverse and the Direct Problems, *Journal of mechanical design*, Vol. 128, p. 168, 2006.

[28] D. Kalyanmoy, Multi Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, *John Wiley and Sons*, 2001.

[29] M. Mahfouf, M.Y. Chen, and D. Linkens. Adaptive Weighted Particle Swarm Optimization for Multi-objective Optimal Design of Alloy Steels, *In Parallel problem solving from nature-ppsn viii*, pages 762–771. Springer, 2004.

[30] M. A. Khosravi and H. D. Taghirad, Experimental Performance of Robust PID Controller on a Planar Cable Robot, *in Cable-Driven Parallel Robots*, Springer, 2013, pp. 337–352.

[31] M. A. Khosravi and H. D. Taghirad, A Positive Tensions PID Controller for a Planar Cable Robot: An Experimental Study, *in Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2013 First RSI/ISM International Conference on. IEEE*, 2013, pp. 325–330.