



ماتریس ژاکوبین بی بعد کار تزیینی جهت ارزیابی عملکرد و بهینه سازی ربات های موازی با درجه آزادی مرکب

*^۱ میر امین حسینی

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه مازندران، پاپلسر
با لسلر، صندوق پستی ۴۷۴۱۶-۱۴۶۷، ma.hosseini@umz.ac.ir

چکیده

شاخص های عملکرد سینماتیکی به طور قابل ملاحظه ای در تشخیص کارآمدی ربات در اهداف خاص به کار می روند. از جمله زمینه های قابل استفاده می توان به طراحی بهینه، برنامه ریزی مسیر، تحلیل رفتار و بررسی چالاکی و تفکیک پذیری ربات اشاره نمود. در بیشتر موارد، این شاخص ها زمانی قابل استفاده خواهند بود که ربات تنها دارای یک نوع درجه آزادی از نوع انتقالی یا دورانی باشد. در شرایطی که ربات هر دو درجه آزادی انتقالی و دورانی را داشته باشد، شاخص های عملکرد مانند عدد شرط ماتریس ژاکوبین و مقادیر تکین مربوط به آن به دلیل غیر هم بودن عناصر تشکیل دهنده، کاربردی نمی باشند. در این مقاله، مشکل نامه بعدی ماتریس ژاکوبین و عدم امکان استفاده از شاخص های وابسته، با معرفی ماتریس ژاکوبین جدیدی به نام ماتریس ژاکوبین کار تزیینی، که ارتباط سرعت پنجه را در دستگاه کار تزیینی با بردار سرعت مفاصل محركشان می دهد، حل شده است. روش معرفی شده در قالب مطالعه موردنی، برای ربات موازی تری سپت به کار گرفته شده است. پس از بررسی تغییرات شاخص های عملکرد درون فضای کاری، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، عملیات بهینه سازی ساختار ربات برای دستیابی به فضای کاری کار تزیینی بیشینه با بیشترین قدرت سرعت پذیری پنجه، انجام شده است. همچنین ساختار ربات چنان بهینه سازی شده است که دارای بزرگترین حجم فضای کار تزیینی مکعبی شکل بعنوان زیرفضای کاربردی با سرعت پذیری زیاد باشد. بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در نرم افزار متلب با ویرایش ۲۰۱۲ انجام شده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل	۱۳۹۲
در رافت: ۲۵ بهمن	۱۳۹۳
پذیرش: ۲۹ فروردین	۱۳۹۳
ارائه در سایت: ۰۵ مهر	۱۳۹۳
کلید واژگان:	
ماتریس ژاکوبین کار تزیینی بی بعد	
ربات موازی	
بهینه سازی	
درجه آزادی مرکب	
فضای کاری کار تزیینی	

Cartesian Dimensional Homogeneous Jacobian Matrix for Performance Evaluation and Optimization of Complex Dof Parallel Manipulator

Mir Amin Hosseini^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.
* P.O.B. 47416-1467 Babolsar, Iran. ma.hosseini@umz.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 February 2014
Accepted 18 April 2014
Available Online 27 September 2014

Keywords:
Homogeneous Cartesian jacobian matrix
Parallel kinematic
Optimization
Complex DoF, Cartesian workspace

ABSTRACT

Kinematic performance indices are used to have an evaluation of the potential efficiency of the robots. Some of these items are designing the optimal structure, trajectory planning, programming, and evaluation of behavior of the robot in positioning and orienting with desired rates or resolution. These indices will be used when the robot has even translational or rotational degrees of freedom (DoF). Due to dimensional incompatibility of the Jacobian entries in the complex DoF's robots with both types of DoF's, performance indices such as Jacobian condition index and associate singular values, are not applicable. In this paper, inhomogeneity of Jacobian matrix has been resolved by introducing a new Jacobian matrix which is called Cartesian Jacobian Matrix (CJM). Cartesian Jacobian Matrix maps Cartesian velocity vector of End-Effector (EE) to the joint space velocity vector. As a case study, the suggested method has been used for a Tricept parallel kinematic manipulator. Moreover, considering Local Conditioning Index (LCI) and associated singular values through the workspace have been led to structure optimization of the robot in order to have maximum positioning and orienting rates of EE through the maximum cuboid workspace. The optimization has been performed by Genetic algorithm via GA toolbox of MATLAB 2012 software.

زیادتر می باشدند^[۱]. ربات هایی با درجه آزادی هم زمان انتقالی و دورانی به ربات های با درجه آزادی مرکب معرفند^[۲]. درایه های ماتریس ژاکوبین در ربات های موازی با درجه آزادی مرکب، از نظر ابعادی غیرهم بعد می باشند^[۳]. در چنین شرایطی بی بعدسازی ماتریس ژاکوبین برای محاسبه عدد

ربات های موازی در مقایسه با ربات های سری دارای مزایایی مانند صلب بودن و دقت بیشتر، ظرفیت تحمل نیرو و گشتاور بیشتر و همچنین سرعت عمل

۱- مقدمه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. A. Hosseini, Cartesian Dimensional Homogeneous Jacobian Matrix for Performance Evaluation and Optimization of Complex Dof Parallel Manipulator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 129-138, 2014 (In Persian)

روابط سینماتیک و حرکت پذیری ربات را مورد مطالعه قرار داده است. پوند و کاریترو [3] ماتریس ژاکوبین بی بعد شده ربات مورد نظر را با توسعه روش ارائه شده توسط کیم و روی [9]. به دست آورد. بهینه سازی ساختار ربات توسط ژنگ و گالسین [15] مورد بررسی قرار گرفت. همچنین حسینی، و همکاران [12] ساختار ربات را برای دستیابی به بیشینه سرعت پذیری پنجه در بزرگترین فضای کاری قابل دسترس بهینه نمودند.

این مکانیزم به عنوان یک ربات جوشکار و ماشینکار چالاک توسط شرکت تری سپت پی کی ام¹¹، تولید شده و مورد استفاده کارخانجات بزرگ خودروساز و هوایپیماسازی های بزرگی مانند آئودی، بی ام دبليو، روو، بوینگ و موارد مشابه قرار گرفته است [16]. شکل 1 ربات جوشکار لیزر تری سپت محصول شرکت تری سپت پی کی ام را نشان می دهد.

ربات تری سپت مطابق شکل 2، از سه پایه فعال که از یک زنجیره سینماتیک شامل مفصل یونیورسال، مفصل کشویی و یک مفصل کروی (UPS) تشکیل یافته است. در هر یک از حلقه های سینماتیکی، مفاصل کشویی، مفاصل فعل می باشند که توسط موتور و بال اسکرو به حرکت و اداسته می شوند. وجود یک پایه شامل مفاصل کشویی و یونیورسال (PU) در مرکز ربات که سکوی ثابت را به متحرک متصل ساخته، امکان دوران حول محور قائم (z) و جایه جایی انتقالی در راستای محور های x و y را از سکو سلب می نماید.

دو دستگاه مختصات متحرک و متصل به زمین {Puvw} و {Oxyz} به ترتیب به سکوی متحرک و ثابت متصل است.

2- تحلیل سرعت

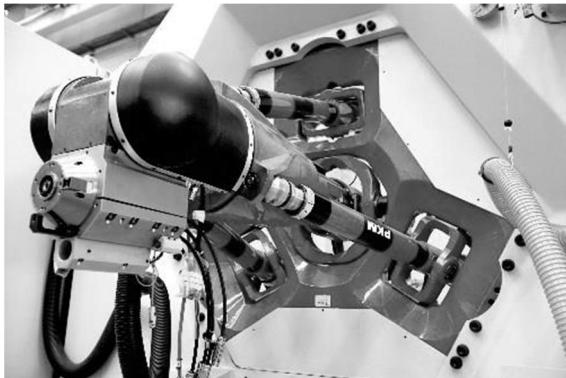
مدل هندسی ربات در شکل 2، نشان داده شده است. با توجه به شکل برای هر یک از پایه ها رابطه (1) برقرار است.

$$c + R(a_i + d) = b_i n_{bi} + l_i n_{li} \quad (1)$$

که در آن c و d بردارهایی به ترتیب بردار موقعیت c نسبت به 0 و 0 نسبت به C است. همچنین R ماتریس دورانی است که دستگاه مختصات متحرک را نسبت به ثابت حول دو محور x و y دوران می دهد. به علاوه، a_i بردار موقعیت نقاط A_i نسبت به P و b_i بردار موقعیت نقاط B_i نسبت به دستگاه ثابت می باشند. همچنین n_{bi} و n_{li} بردارهای یکهای هستند که جهات بردارهای a_i و b_i را نشان می دهند. لازم به ذکر است بردارها با حروف کوچک توپر و ماتریس ها با حروف بزرگ توپر نمایش داده اند.

با مشتق گیری از رابطه (1) (نسبت به زمان، معادله (2) نتیجه می شود:

$$\dot{c} + \omega_p \times (R(a_i + d)) = \dot{l}_i n_{li} + \omega_i \times l_i n_{li} \quad (2)$$



شکل 1 ربات جوشکار لیزر تری سپت محصول شرکت تری سپت پی کی ام [16]

شرط¹ و تحلیل چالاک² و سفتی³ لازم و ضروری است [2]. رنجبران و انجلس⁴ ناسازگاری ابعادی ذکر شده را با معرفی طول مشخصه (CL)⁵ بطرف نمودند. با تقسیم درایه هایی از ماتریس ژاکوبین که دارای بعد طول هستند بر این ضریب بعددار با بعد طول، ماتریس ژاکوبین بی بعد شده، حاصل می شود. ما و انجلس [5] ضریب دیگری به نام طول طبیعی (NL)⁶ برای بی بعدسازی ماتریس ژاکوبین و بهینه سازی استفاده نمودند. چبلت و همکاران [6] از طول مشخصه به منظور تعیین پارامترهای طراحی ربات موازی صفحه ای با ساختار سینماتیکی PRR برای دستیابی به شرایط همسانگردی⁷ استفاده نمودند. گالسین [8] روش دیگری برای بیان ماتریس ژاکوبین بی بعد ربات صفحه ای با یک درجه آزادی دورانی و دو درجه آزادی انتقالی ارائه داد. ماتریس ژاکوبین مذکور، ارتباط سرعت عملگرها را با مولفه های x و y سرعت دو نقطه از سکوی متحرک برقرار می سازد. کیم و روی [9] با توسعه این ایده، ارتباط بردار سرعت عملگرها را با سرعت سه نقطه از سکوی متحرک، توسط ماتریس ژاکوبین بی بعد، برقرار نمود. پوند و کاریترو [3] ایده مذکور را باز هم توسعه داده و بردار سرعت عملگرها را با سه مولفه مستقل از سه نقطه واقع بر سکوی متحرک مرتبط ساختند. انجلس [10] ضریب دیگری به نام طول مشخصه مهندسی (ECL)⁸ برای بی بعدسازی ماتریس ژاکوبین معرفی نموده است. حسینی و دانیالی [11] روش دیگری را برای بی بعدسازی ماتریس ژاکوبین توصیه نموده اند. در این روش ماتریس ژاکوبین و بردار توبیست⁹ با اعمال ضریب وزن دار⁹ به طور همزمان بی بعد می شوند، به طوری که تعادل ابعادی معادلات حفظ می شود. حسینی و همکاران [12] با استفاده از این روش برای بهینه سازی ربات موازی با درجه آزادی مرکب برای دستیابی به بیشینه حجم فضای کاری با سرعت بالا در موقعیت پذیری انتقالی و دورانی استفاده نمودند.

در این تحقیق، ربات تری سپت¹⁰ به عنوان یک ساختار مکانیزم موازی با درجه آزادی مرکب انتخاب شده است. روابط سینماتیکی موجود و استخراج ماتریس ژاکوبین به عنوان پیش نیاز معرفی شده تا به کمک آن ماتریس ژاکوبین جدیدی به نام ماتریس ژاکوبین کارترینی که از نظر ابعاد همگن می باشد، معرفی شود. به عنوان مطالعه موردنی، برای یک ساختار نمونه چگونگی محاسبه حجم فضای کاری، قیود هندسی و طراحی تعریف می شوند. با تعریف ماتریس ژاکوبین کارترینی و ایجاد ارتباط بین بردار سرعت کارترینی پنجه و بردار سرعت مفاصل، و محدود سازی عدد شرط و کمینه مقادیر تکین ماتریس حاصل و همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک ساختار ربات برای دستیابی به بیشینه حجم فضای کاری کارترینی که در آن سرعت پذیری پنجه بیشترین مقدار خود را دارد، بهینه سازی می شود. در گام بعدی ساختار مکانیزم به منظور دستیابی به فضایی مکعبی شکل با قابلیت سرعت پذیری بالا به عنوان فضای کاربردی مورد نظر با حجم بیشینه، بهینه سازی می شود.

2- مکانیزم تری سپت

خانواده ربات تری سپت با دو درجه آزادی دورانی و یک درجه آزادی انتقالی (شکل 1)، برای اولین بار توسط نیومن [13] معرفی شد. سیسیلیانو [14]

1- Condition Number

2- Dexterity

3- Stiffness

4- Characteristic Length

5- Natural Length

6- Isotropy Condition

7- Engineering Characteristic Length

8- Twist Array

9- Weighting Factor

10- Tricept

3- تجزیه ماتریس به مقادیر تکین (SVD)¹، همسانگردی²، تفکیک پذیری³ و سرعت پذیری⁴

هر ماتریس $A_{m \times n}$ را می‌توان به صورت حاصل سه ماتریس USV^T بیان نمود، که در آن ماتریس‌های $U_{m \times m}$ و $V_{n \times n}$ ماتریس‌های دوران و ماتریس $S_{m \times n}$ ماتریس شامل مقادیر تکین ماتریس A است. از لحاظ فیزیکی چگونگی عملکرد تبدیل ماتریس A از فضای برداری اولیه به فضای برداری انتهایی مطابق شکل 3 است.

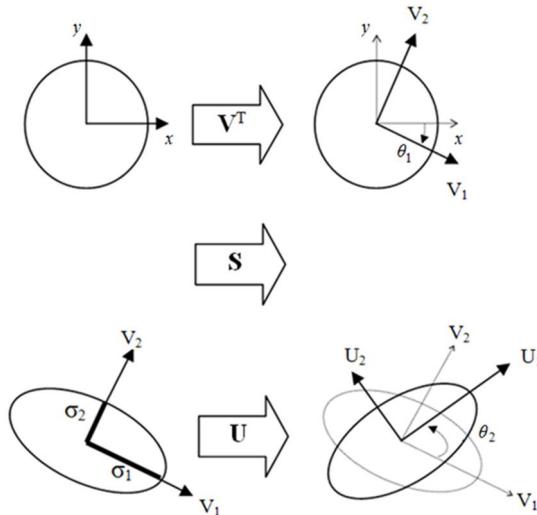
ماتریس V فضای برداری را به اندازه θ_1 دوران داده و ماتریس S شامل مقادیر تکین (σ_1 و σ_2)، در راستای محورهای دوران یافته از مرحله قبل (شامل V_1 و V_2) فضا را به اندازه مقادیر تکین می‌کشد. با این کشیدگی، فضای دایره‌ای شکل به بیضی تبدیل می‌شود. میزان بزرگنمایی در هر یک از راستاهای تابع اندازه مقدار تکین است. با اعمال ماتریس دوران U دوباره فضای حاصل به اندازه θ_2 دوران می‌یابد. این اساس، نقش ماتریس ژاکوبین را انتقال، دوران و بزرگنمایی فضای برداری سرعت عملگرها به فضای برداری سرعت پنجه بیان می‌نمایند [5].

بیضی حاصل از اعمال ماتریس ژاکوبین و تبدیل فضای برداری، به مهارت⁴ ربات معروف است. با نزدیک شدن شعاع‌های بیضی مهارت به هم، رفتاری متقاضی در جهات مختلف توسط پنجه ربات قابل دسترس خواهد بود. نسبت بزرگترین به کوچکترین شعاع بیضی مهارت به نام عدد شرط ماتریس ژاکوبین شناخته می‌شود.

عدد شرط ماتریس مشخصه‌ای از قابلیت معکوس‌پذیری آن ماتریس است [5]. از عدد شرط ربات به عنوان معیاری برای دقت ربات یاد شده است [17]. همچنین عدد شرط به عنوان یکی از شاخص‌های عملکرد ربات محسوب می‌شود [18].

با توجه به ماهیت فیزیکی مقادیر تکین ماتریس ژاکوبین در بزرگنمایی ورودی‌ها در جهات مختلف، می‌توان با محدودسازی حداقل مقادیر تکین به یک اندازه کمینه یا حداقل مقادیر تکین به یک اندازه بیشینه و همچنین در نظر گرفتن شرایط همسانگردی به ساختاری از ربات با تفکیک پذیری یا سرعت مطلوب در موقعیت پذیری دست یافت.

استفاده از مقادیر تکین و عدد شرط در گرو بی بعد بودن درایه‌های



شکل 3 مراحل عملکرد تبدیل ماتریس A و عناصر تجزیه شده آن

1- Singular Value Decomposition

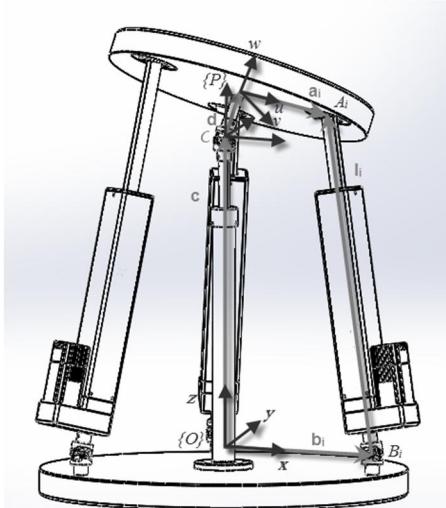
2- Isotropy

3- Resolution

4- Manipulability



(الف) اجزا تشکیل دهنده و چیزمان در ساختار ربات



(ب) نمایش برداری اجزا تشکیل دهنده در ساختار ربات

شکل 2 ساختار ربات تری‌سپت

که در آن ω_p و ω_i بردارهای سرعت زاویه‌ای پنجه و پایه‌ها است. با اعمال ضرب داخلی n_{ii} به دو طرف رابطه (2)، رابطه (3) (نتیجه می‌شود):

$$n_{li}^T c + n_{li}^T \omega_p \times (R(a_i + d)) = l_i \quad (3)$$

$$\text{بازنویسی رابطه (3) برای هر سه پایه به رابطه ماتریسی (4) ختم می‌شود:} \quad J^{-1}\dot{x} = \dot{q} \quad (4)$$

که در آن \dot{x} بردار توابیست، \dot{q} بردار سرعت خطی عملگرها و J^{-1} ماتریس ژاکوبین معکوس می‌باشد که به صورت روابط (5) تا (7) قابل تعریفند.

$$\dot{x} = [c\dot{\psi}\theta]^T \quad (5)$$

$$\dot{q} = [l_1 l_2 l_3]^T \quad (6)$$

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} n_{l1z} & (R(a_1 + d) \times n_{l1})_x & (R(a_1 + d) \times n_{l1})_y \\ n_{l2z} & (R(a_2 + d) \times n_{l2})_x & (R(a_2 + d) \times n_{l2})_y \\ n_{l3z} & (R(a_3 + d) \times n_{l3})_x & (R(a_3 + d) \times n_{l3})_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

با توجه به رابطه (4) و درایه‌های ماتریس ژاکوبین معکوس، مشخص است که درایه‌های واقع در ستون اول بدون بعد و درایه‌های ستون‌های دوم و سوم دارای بعد طول می‌باشند.

$$\text{رابطه (11) را می‌توان به صورت رابطه (12) نیز بازنویسی نمود.}$$

$$x_c = [dC\psi S\theta \quad -dS\psi \quad c + dC\theta C\psi]^T \quad (12)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (12) نسبت به زمان، سرعت پنجه در فضای کارتزینی مطابق رابطه (13) بدست می‌آید.

$$\dot{x}_c = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z}]^T = \tilde{J}\dot{x} \quad (13)$$

که در آن \tilde{J} مطابق رابطه (14) تعریف می‌شود.

$$\tilde{J} = \begin{bmatrix} -dS\theta S\psi & dC\psi C\theta & 0 \\ -dC\psi & 0 & 0 \\ -dC\theta S\psi & -dS\theta C\psi & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

با توجه به معادله‌های (4)، (12) و (14) ماتریس ژاکوبین کارتزینی از رابطه (15) بدست می‌آید.

$$J_c = \tilde{J}^{-1} \quad (15)$$

به طوری که ارتباط سرعت پنجه در فضای کارتزینی با بردار سرعت عملگرها مطابق رابطه (16) به هم مربوط می‌شوند.

$$J_c \dot{x}_c = \dot{q} \quad (16)$$

در نتیجه، ارتباط بردار سرعت مقاصل با بردار سرعت پنجه توسط ماتریس ژاکوبینی بی بعد تعریف شده، که می‌توان از شاخص‌های عملکردی حاصل از آن، برای بررسی عملکرد ربات استفاده نمود.

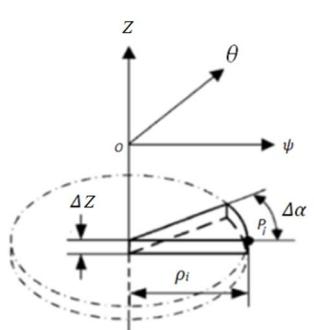
5- فضای کاری ربات

فضای کاری ربات مجموعه نقاط قابل دسترس توسط پنجه ربات است که می‌تواند در ابعاد منطبق با درجات آزادی ربات یا در فضای کارتزینی تعریف شود. برای یافتن فضای کاری از الگوریتم پیشنهادی زیر استفاده می‌شود.

5-1- الگوریتم

به منظور تعیین شکل و اندازه حجم فضای کاری، فضای سه‌بعدی متشکل از محورهای θ - ψ - Z از فضای حرکتی پنجه به یک سری از زیرفضاهای موادی با صفحه θ - ψ تقسیم می‌شود. سپس با استفاده از یک روش جستجو، مرز زیرفضاهای مشخص شده و حجم فضای کاری نیز با استفاده از روش انتگرال‌گیری عددی بدست می‌آید. همان‌گونه که در شکل 4 مشخص است، در زیرفضایی به ارتفاع Z_i دوران فضای کاری، به منظور تعیین مرز زیر فضا، بردار قطبی ρ_i با قابلیت دوران حول محور Z ، از صفر تا 2π درجه در نظر گرفته می‌شود.

نقاط مرزی به صورت نقاط $P_i(\rho_i \cos \alpha, \rho_i \sin \alpha, Z_i)$ بدست می‌آیند. با اراضی شرایط سینماتیکی ربات اندازه طول بردار ρ_i به اندازه $\Delta\rho$ افزایش یافته ρ_{i+1} جایگزین ρ_i می‌شود تا زمانی که شرایط سینماتیکی ارضاء نشوند.



شکل 4 زیرفضایی از فضای کاری ربات تری‌سپت

ماتریس ژاکوبین است.

4- ماتریس ژاکوبین بی بعد

روشهای بی بعدسازی پیشنهادی که تاکنون ارائه شده به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند. در این بخش ضمن بیان روش‌های پیشنهادی، روش جدیدی جهت بی بعدسازی ماتریس ژاکوبین ارائه می‌شود تا بتوان به کمک آن ارزیابی کیفی از ساختار مکانیزم‌های با درجات آزادی مرکب در اینجا منظور ربات تری‌سپت است. همچنین در یک گام رو به جلو، بهینه‌سازی ساختار به منظور دستیابی به شاخص‌های کیفی مورد نظر محقق شود.

4-1- بی بعدسازی با استفاده از تقسیم بر یک ضریب بعددار

دسته اول از روش‌های پیشنهادی جهت بی بعدسازی ماتریس ژاکوبین [4, 11-4] تقسیم درایه‌های بعددار ماتریس ژاکوبین بر یک ضریب ثابت است که از نظر ابعادی دارای بعد طول می‌باشد. ضریب مورد نظر می‌تواند توسط ساختار هندسی و ابعادی ربات تعیین شود [4-6] یا اینکه توسط طراح به عنوان ضریبی که ارتباط سرعت‌های دورانی و انتقالی را به هم مرتبط می‌سازد، تعیین شود [11]. در این راستا بر این نظر گرفتن ضریب L به عنوان ضریب بی بعدساز وزن دار ماتریس ژاکوبین بی بعد به صورت رابطه (8) بدست می‌آید.

$$J_d = \begin{bmatrix} (R(a_1 + d) \times n_{11})_x / L & (R(a_1 + d) \times n_{11})_y / L & n_{11z} \\ (R(a_2 + d) \times n_{12})_x / L & (R(a_2 + d) \times n_{12})_y / L & n_{12z} \\ (R(a_3 + d) \times n_{13})_x / L & (R(a_3 + d) \times n_{13})_y / L & n_{13z} \end{bmatrix} \quad (8)$$

4-2- بی بعدسازی با درنظر گرفتن مولفه‌های سرعت نقاطی از سکو

در این روش ماتریس ژاکوبین ارتباط سرعت پنجه را با مولفه‌های منتخب سه نقطه واقع بر سکو، برقرار می‌سازد [3, 8, 9]. سرعت سکو به صورت تابعی از این سه مولفه نوشته شده و ماتریس ژاکوبین این ارتباط را برقرار می‌سازد. چنان‌چه مولفه‌های قائم سه نقطه از سکو را برای ربات مورد نظر منظور شود، ماتریس ژاکوبین بی بعد شده را می‌توان به صورت حاصل ضرب ماتریس ژاکوبین در ماتریس ضرایب که تابعی از موقعیت می‌باشد، تعیین نمود [11]. ماتریس ضرایب حاصل از روش فوق، مطابق رابطه (9) می‌باشد، که حاصل ضرب ماتریس ژاکوبین در معکوس ماتریس ضرایب، ماتریس ژاکوبین بی بعد را نتیجه می‌دهد.

$$J = \begin{bmatrix} -dS\psi C\theta & -dS\theta C\psi - r_a C\theta & 1 \\ -dS\psi C\theta + r_a C\psi C\theta S\alpha & -dS\theta C\psi - r_a C\theta C\alpha - r_a S\theta S\psi S\alpha & 1 \\ -dS\psi C\theta + r_a C\psi C\theta S\beta & -dS\theta C\psi - r_a C\theta C\beta - r_a S\theta S\psi S\beta & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

که در آن α و β به ترتیب برابر 120 و 240 درجه می‌باشد. همچنین

3 ساعه سکویی متحرک (فاصله شعاعی مفاصل کروی نسبت به P) است.

ماتریس ژاکوبین بی بعد حاصل از این روش با لشان داده شده و از رابطه (10) محاسبه می‌شود.

$$J_v = \tilde{J}^{-1} \quad (10)$$

4-3- ماتریس ژاکوبین کارتزین بی بعد

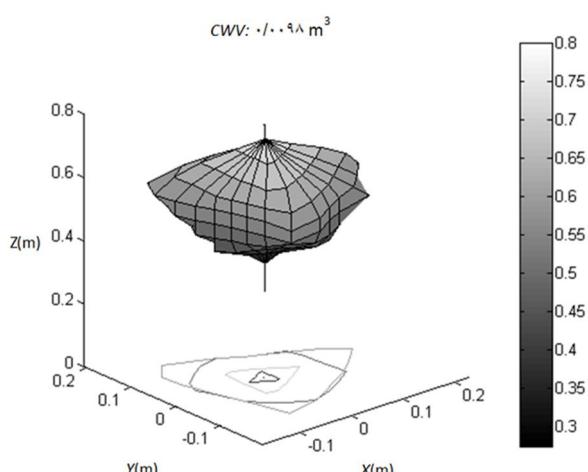
در این مقاله، روش پیشنهادی، تعریف و به کارگیری ماتریس ژاکوبین بی بعدی است که ارتباط سرعت پنجه ربات در فضای کارتزینی را با بردار سرعت عملگرها برقرار می‌سازد.

مختصات کارتزینی پنجه مطابق با رابطه (11) قابل تعریف است.

$$x_c = [x \quad y \quad z]^T = \begin{bmatrix} C\theta & S\psi S\theta & C\psi S\theta \\ 0 & C\psi & -S\psi \\ -S\theta & C\theta S\psi & C\theta C\psi \end{bmatrix} [0 \quad 0 \quad d]^T + [0 \quad 0 \quad c]^T \quad (11)$$

جدول 2 ساختار ربات تری‌سپت در مطالعه موردی

پارامتر ساختاری	علامت مشخصه	اندازه
شعاع سکویی متحرک	$r_a(\text{mm})$	200
شعاع سکویی ثابت	$r_b(\text{mm})$	300
بخش فوقانی از لینک میانی	$d(\text{mm})$	200
دامنه حرکت مفاصل	$\zeta(\text{deg})$	± 60
دامنه حرکت عملگرها	$L_s(\text{mm})$	400-750



شکل 5 حجم فضای کاری کارترزینی (CWV) ساختار نمونه

7- فضای کاری کارترزینی با شکل دلخواه قابل محاط شدن

در شکل 5، شما می‌توانید فضای کاری کارترزینی به دور از یک قاعده مشخص است. این در حالی است که به منظور تعریف فضای کاری ماشین‌های ایزار از یک مکعب مستطیل با ابعاد مشخص که تمامی نقاط آن توسط پنجه قابل دستیابی است، استفاده می‌شود. لذا لازم است از یک الگوریتم جستجوی دیگر برای یافتن بزرگترین مکعب مستطیل قابل محاط شدن درون فضای کاری کارترزینی بی‌قاعده استفاده شود. با توجه به محدود بودن شکل فضای کاری کافی است گوشش‌های مکعب مستطیل مورد نظر در فضای کاری پیدا شود. الگوریتم پیشنهادی زیر جهت یافتن گوشش‌های مکعب مستطیل با نسبت ابعاد مشخص مورد استفاده قرار می‌گیرد.

7-1-1- الگوریتم جستجو برای یافتن گوشش‌های فضای مکعب مستطیل شکل به منظور یافتن نقاط گوشش‌های مکعب مستطیلی با نسبت ابعاد $m \times n \times l$ محاط در فضای کاری بی‌قاعده، مراحل زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

1- یافتن مرکز مکعب: بعد از بدست آمدن نقاط مزی فضای کاری، کمترین و بیشترین ارتفاع قابل دستیابی توسط پنجه با عنوان Z_{\min} و Z_{\max} مطابق شکل 6-الف، مشخص می‌شوند. از مقدار میانگین این دو مقدار به عنوان ارتفاع مرکز مکعب و مقدار مختصات صفر در راستای X و Y برای دو مختصه دیگر استفاده می‌شود. توضیح اینکه انتخاب مقادیر صفر به دلیل متقاضان بودن شکل فضای کاری بی‌قاعده است.

2- یافتن گوشش‌های مکعب با نسبت ابعاد مشخص: مطابق شکل با گامی به اندازه $\Delta\theta$ در زاویه صفر درجه حرکت شروع شده و مختصات هشت گوشه به نسبت ابعادی مورد نظر به دست می‌آید. این نقاط در شکل 6-ب، با نقاط $(i=1..8)$ نشان داده شده است. این کار با افزایش گام تکرار می‌شود تا

در چندین شرایطی، نقطه P_i مشخص می‌شود. در مرحله بعد بردار ρ_i به اندازه $\Delta\alpha$ حول محور Z دوران یافته و بردار ρ_i از مقدار صفر تا زمانی که شرایط سینماتیکی ارضا شود، افزایش می‌یابد. به این ترتیب مزد فضای کاری در هر ارتفاع به دست می‌آید. با توجه به شکل 4 حجم هر المان فضای کاری از رابطه (17) به دست می‌آید:

$$dV = \frac{\Delta\alpha}{2\pi} \pi \rho_i^2 \Delta Z \quad (17)$$

حجم فضای کاری با استفاده از رابطه (18) قابل محاسبه است.

$$V = \sum_{Z_i=Z_{\min}}^{Z_{\max}} \sum_{\alpha=0}^{2\pi} \frac{1}{2} \rho_i^2 \Delta\alpha \Delta Z \quad (18)$$

2-5- قیدهای هندسی

این قیدهای شامل محدوده بالا و پایین برای عملگرهای خطی، و دامنه عملکرد مفاصل یونیورسال، کروی و کشویی از لینک میانی و پایه‌ها و همچنین برخورد پایه‌ها با هم است. محدوده حرکتی مفاصل یونیورسال و کروی (?) با استفاده از روابط سینماتیکی قابل محاسبه است.

قيود هندسی موجود برای ربات مورد نظر در جدول 1 نشان داده شده است.

3- قیود طراحی

این قیود شامل تمامی نیازمندی‌های فرآیند طراحی است. شاخص‌های عدد شرط و حداقل و حداقل مقادیر تکین از جمله شاخص‌های کیفی عملکرد سینماتیکی ربات می‌باشند [11]. در اینجا، از شاخص‌های ذکر شده، به‌منظور بهسازی ساختار ربات، برای دستیابی به حجم فضای کاری بیشینه همراه با بیشترین قابلیت سرعت پذیری استفاده شده است.

6- فضای کاری کارترزینی

با توجه به شکل 1 و رابطه (12)، مختصات کارترزینی پنجه به صورت تابعی پارامتری از موقعیت پنجه بر حسب Z , ψ و θ تعریف می‌شود. با استفاده از یک الگوریتم جستجو همانند آن‌چه در بخش 5-1 توضیح داده شد، می‌توان مختصات نقاط مرزی را در هر ارتفاع از فضای کاری مشخص نمود. تنها با این تفاوت که مختصات کارترزینی با استفاده از رابطه (12) و تبدیل از مختصات نقاط P_i حاصل از الگوریتم مرحله قبل، نتیجه می‌شود.

7- مطالعه موردی

با درنظر گرفتن ساختار مکانیزم مطابق جدول 2 و با استفاده از الگوریتم جستجو فضای کاری کارترزین مطابق شکل 5 خواهد بود. کلیه نقاط داخل حجم نمایش داده شده، توسط پنجه قابل دسترس بوده و هیچگونه نقطه تکین یا غیر قابل دسترسی داخل فضای مورد نظر وجود ندارد.

جدول 1 قیود هندسی در ربات مورد بررسی

پارامتر ساختاری	علامت مشخصه	دامنه تغییرات
شعاع سکویی متحرک	$r_a(\text{mm})$	200-300
شعاع سکویی ثابت	$r_b(\text{mm})$	300-500
بخش فوقانی از لینک میانی	$d(\text{mm})$	0-200
دامنه حرکت مفاصل	$\zeta(\text{deg})$	± 60
دامنه حرکت عملگرها	$L_s(\text{mm})$	400-750

$$V = V(r_a, r_b, d) \quad (19)$$

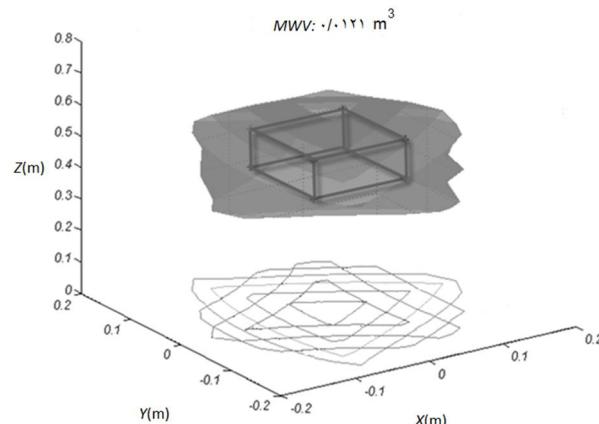
	تابع هدف:
	با توجه به قیویه:
$0/3 > r_a > 0/2$	-1
$0/5 > r_b > 0/3$	-2
$0/7 > d > 0/02$	-3

نتیجه حاصل از عملیات بهینه‌سازی در جدول 3، نشان داده شده است. شکل 7 فضای کاری بیشینه را به همراه مکعب درون آن نشان می‌دهد. حجم بزرگترین فضای مکعب مستطیل درون بزرگترین فضای کاری کارتزینی برابر $0/0017 m^3$ است. مشاهده می‌شود که تنها در حدود 14% از حجم فضای کاری کارتزینی، مکعب مستطیل دارای قابلیت استفاده است. در مقایسه با حالت قبل مشاهده می‌شود که اگرچه حجم فضای کاری کارتزینی تا حدود 23% افزایش یافته ولی توسعه فضای کاری همراه با ازدست دادن 19% از حجم مکعبی شکل کارتزین درون فضای کاری، به عنوان ساختار ریاضی مکانیزم یا فضای قابل استفاده، می‌باشد. این مشکل، بهینه‌سازی ساختار ریاضی جهت دستیابی به بزرگترین حجم فضای کارتزینی مکعبی شکل را پر اهمیت تر می‌سازد.

همگرایی نتایج بهینه‌یابی در شکل 8 نشان داده شده است. در نمودار مذکور محور افقی، شماره نسل (G) و محور قائم، مقدار همگرایی (Fv) را نشان می‌دهد.

جدول 3 نتایج حاصل از بهینه‌سازی جهت دستیابی به بیشترین حجم فضای کاری

اندازه	علامت مشخصه	پارامتر ساختاری
220	$r_a(mm)$	شعاع سکوی متحرک
500	$r_b(mm)$	شعاع سکوی ثابت
20	$d(mm)$	بخش فوقانی از لینک میانی
0/0121	m^3	حجم فضای کاری کارتزینی
0/0017	m^3	حجم بزرگترین فضای مکعبی
100		داخل فضای کاری
%20		جمعیت اولیه
51	---	درصد حذف
		تعداد تکرار الگوریتم



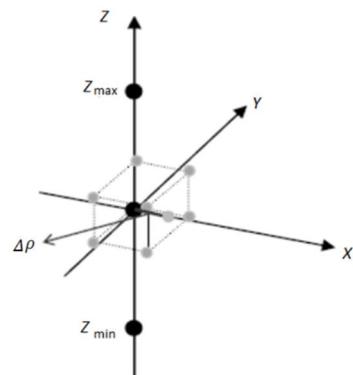
شکل 7 فضای کاری بیشینه (MWV) و بزرگترین مکعب قابل محاط شدن در آن

زمانی که یکی از هشت مختصات گوشه‌ها از فضای کاری خارج شود. با هر بار تکرار به شمارنده یکی افزوده می‌شود. تعداد گام‌های این مرحله با زاویه مربوطه ذخیره می‌شود. زاویه α به اندازه گام $\Delta\alpha$ افزایش یافته و از مرکز با تکرار عملیات جستجوی گوشه‌ها آغاز می‌شود و تعداد گام‌ها و زاویه مربوطه ذخیره می‌شود. این عملیات تا زاویه 45 درجه تکرار می‌شود.

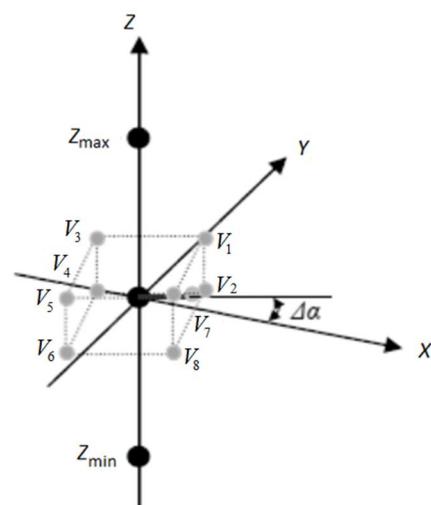
3- بزرگترین مکعب: زاویه‌ای که دارای بیشترین شمارنده است، مربوط به بزرگترین مکعب مستطیل می‌شود. با داشتن مقدار بزرگترین شمارنده و زاویه مربوطه مختصات گوشه‌ها و ابعاد مکعب مستطیل و حجم آن به دست می‌آید.

با استفاده از الگوریتم فوق برای ساختار نمونه مطابق جدول 2 و با حجم فضای کاری برابر $0/0098 m^3$ ، بزرگترین مکعب مستطیل قابل محاط شدن در آن برابر $0/0021 m^3$ به دست آمده است که 21/92 از حجم فضای کاری را اشغال نموده است.

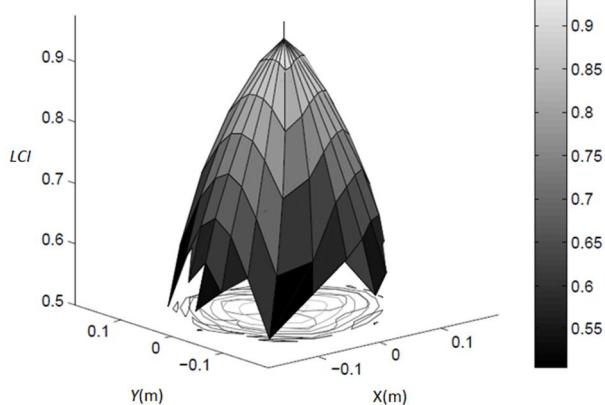
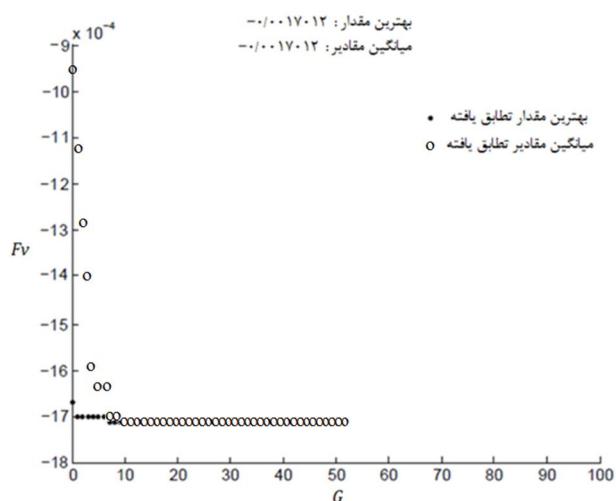
7- بزرگترین فضای کاری کارتزینی ساختار هندسی ریاضی مطابق رابطه (19) و با استفاده از الگوریتم ژنتیک چنان بهینه می‌شود که تابع هدف که همان حجم فضای کاری است که باید بیشینه شود.



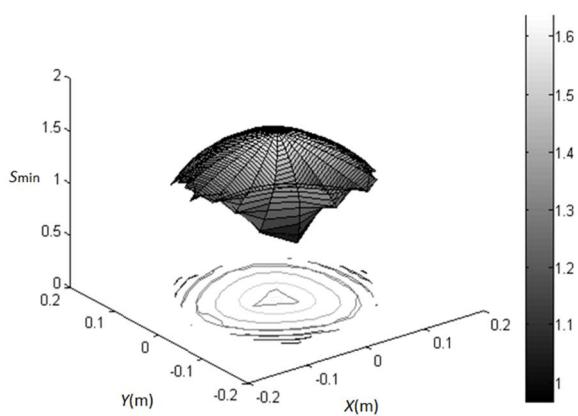
الف) اولین گام جستجو در زاویه صفر درجه



ب) جستجو در زاویه $\Delta\alpha$ درجه و نقاط گوشه مکعب مستطیل
شکل 6 گام‌های مختلف جستجو برای مکعب مستطیل محاط در فضای کاری کارتزینی

شکل 10 نمایش تغییرات عدد شرط ماتریس ژاکوبین (LCI) در فضای کاری ربات

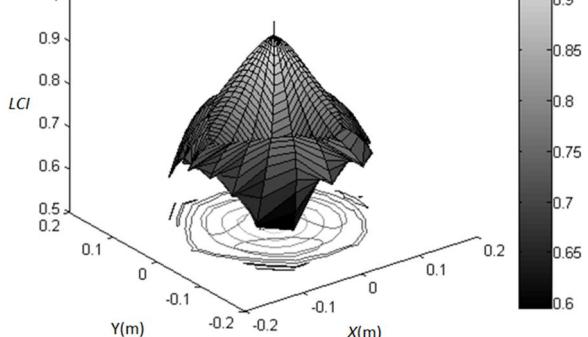
شکل 8 همگرایی نتایج پیشنهادی ساختار با فضای کاری بیشینه (MWW)

شکل 11 تغییرات حداقل مقادیر تکین ماتریس ژاکوبین بی بعد شده با استفاده از ضریب وزن دار برابر $0/2$ متر در فضای کاری ربات

7-3- فضای کاری کارترزینی همراه با بیشینه سرعت دورانی و انتقالی
علاوه بر اهمیت اندازه حجم فضای کاری کارترزینی به عنوان حجم فضای کاربردی مکانیزم، برخی شرایط کاری مانند حداقل تفکیک‌پذیری یا دقت موقعیت‌پذیری مورد نیاز یا کمینه سرعت لازم در موقعیت‌پذیری پنجه مورد نظر طراح یا سازنده باشد. به این منظور، لازم است با محدودسازی حداقل مقدار تکین ماتریس ژاکوبین به یک مقدار بیشینه فضای کاری کارترزینی ربات با بیشینه سرعت دورانی و انتقالی به دست می‌آید. شکل 9 تغییرات حداقل مقادیر تکین ماتریس ژاکوبین کارترزین بی بعد (S_{min}) را در فضای کاری ربات با ساختار نشان داده شده در جدول 3 نشان می‌دهد. همچنین شکل 10 تغییرات عدد شرط ماتریس ژاکوبین کارترزین بی بعد برای ساختار مورد اشاره را نشان می‌دهد.

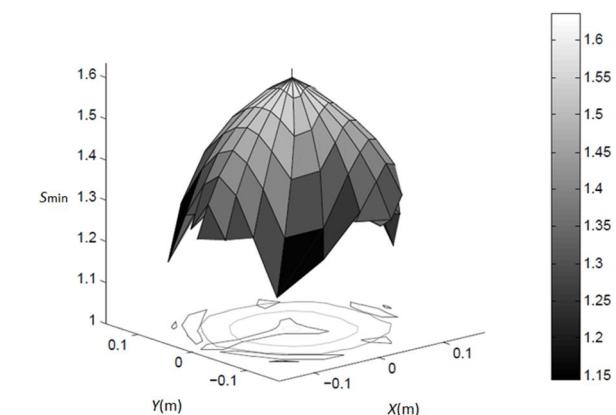
به صورت جنبی نمایش این دو شاخص مستخرج از دو روش بی بعدسازی دیگر، یعنی استفاده از ضریب وزن دار و استفاده از مولفه‌های قائم سه نقطه از سکون نیز در شکل‌های 11 تا 14 نیز مشاهده می‌شوند.
در هر سه روش، در نواحی نزدیک به موقعیت X و Y صفر در ارتفاع‌های مختلف سکو، که همراه با دوران‌های نزدیک به صفر است، شاخص همسانگردی بیشترین مقدار خود را دارد.

دامنه تغییرات حداقل مقادیر تکین ماتریس ژاکوبین بی بعد شده توسط روش پیشنهادی (مطابق شکل 9) بین $1/15$ تا $1/6$ می‌باشد. حال آنکه این تغییرات در دو روش قبلي (مطابق شکل 11 و 13) به ترتیب بین 1 تا $0/6$ و

شکل 12 نمایش تغییرات عدد شرط ماتریس ژاکوبین (LCI) بی بعد شده با ضریب وزن دار برابر $0/2$ متر، در فضای کاری ربات 0/74 تا 0/94 می‌باشد.

دامنه تغییرات شاخص شرط ماتریس ژاکوبین بی بعد شده توسط روش پیشنهادی (مطابق شکل 10) بین $0/55$ تا $0/95$ می‌باشد. حال آنکه این تغییرات در دو روش قبلي (مطابق شکل 12 و 14) به ترتیب بین $0/6$ تا $0/75$ و $0/95$ می‌باشد.

روش پیشنهادی با دامنه تغییرات بالاتر، روشنی به مرتب حساس‌تر را چه



شکل 9 تغییرات حداقل مقادیر تکین ماتریس ژاکوبین کارترزین در فضای کاری ربات

شامل می‌شود، در حالی که بزرگترین مکعب مستطیل قابل محاط شدن در این فضای با ابعادی برابر $109/1 \text{ mm}$, تنها 14% از فضای کاری مورد نظر را اشغال کرده است.

7-4- بزرگترین فضای کاری کارترزینی همراه با پیشینه سرعت دورانی و انتقالی

به طور مشابه، برای دستیابی به پیشینه حجم فضای کاری کارترزینی با سرعت‌پذیری مطلوب، از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. قیود هندسی و طراحی برای این عملیات بهینه‌سازی به قرار زیر است.

$$\text{تابع هدف: } V(r_a, r_b, d) \quad (\text{پیشینه: } \checkmark)$$

با توجه به قیود:

$$0/3 > r_a > 0/2 \quad -1$$

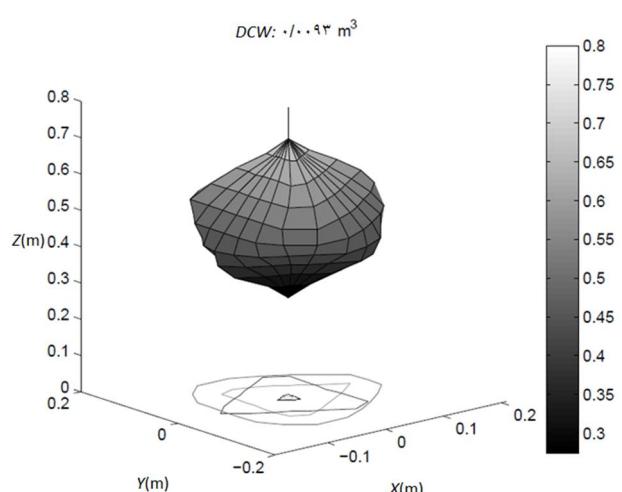
$$0/5 > r_b > 0/3 \quad -2$$

$$0/7 > d > 0/02 \quad -3$$

$$LCI \geq 0/6 \quad -4$$

$$(SV) \geq 1/3 \quad -5$$

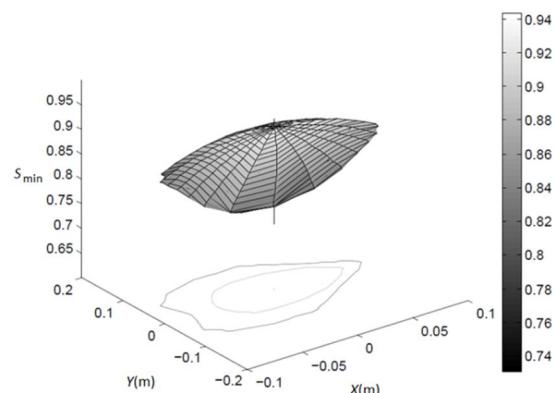
نتایج عملیات بهینه‌سازی در جدول 4 نشان داده شده است. شکل 16 همگرایی نتایج در فرآیند بهینه‌یابی را نمایش می‌دهد.



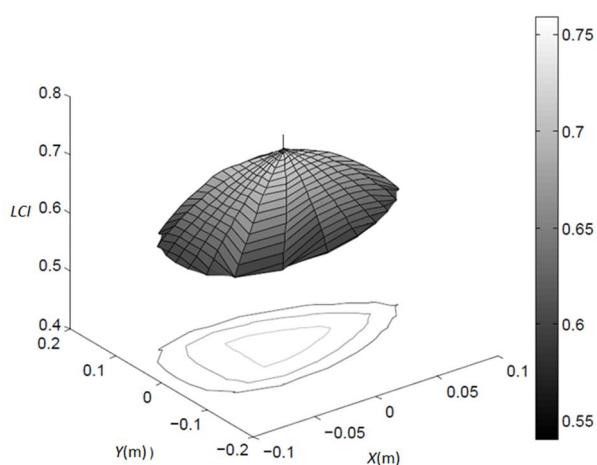
شکل 15 فضای کاری کارترزینی (DCW) با سرعت‌پذیری مطلوب ربات با ساختار

جدول 4 ساختار بهینه برای دستیابی به بزرگترین حجم فضای کاری با سرعت موقعیت‌پذیری مطلوب

اندازه	علامت مشخصه	پارامتر ساختاری
200	$r_a(\text{mm})$	شعاع سکویی متحرک
500	$r_b(\text{mm})$	شعاع سکویی ثابت
211	$d(\text{mm})$	بخش فوقانی از لینک میانی
0/0113	m^3	حجم فضای کاری کارترزینی
0/0018	m^3	حجم بزرگترین فضای مکعبی
100		داخل فضای کاری
%20		جمعیت اولیه
51	---	درصد حذف
		تعداد تکرار الگوریتم



شکل 13 تغییرات حداقل مقادیر تکین ماتریس ژاکوبین بی بعد شده با مولفه‌های قائم سه نقطه از سکو، در فضای کاری ربات

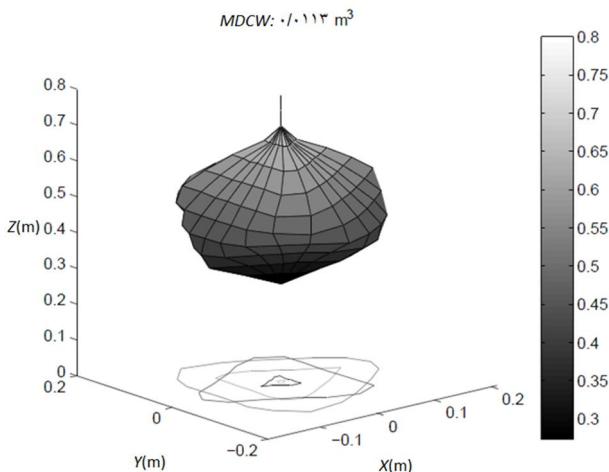


شکل 14 نمایش تغییرات عدد شرط ماتریس ژاکوبین (LCI) بی بعد شده با مولفه‌های قائم سه نقطه از سکو، در فضای کاری ربات در زمینه بررسی شاخص همسانگردی و چه در زمینه بررسی سرعت‌پذیری نشان می‌دهد.

به منظور پیشینه‌سازی سرعت جابه‌جایی پنجه به ازای تحریک واحد عملگرهای، لازم است حداقل مقادیر تکین ماتریس ژاکوبین درون فضای کاری ربات از حداقل مقدار (مورد نظر طراح) بزرگتر باشد. همچنین عدد شرط ماتریس ژاکوبین به منظور داشتن رفتاری یکسان در کلیه جهات لازم است از مقدار حداقل مورد نظر، بزرگتر باشد. جابه‌جایی پنجه به ازای تحریک واحد عملگرهای، صرف‌نظر از شرایط دینامیکی ربات بوده و مقادیر تکین ماتریس ژاکوبین بی بعد شده در حقیقت نوعی ضربی بزرگنمایی برای ورودی عملگرهای است که خروجی جابه‌جایی برای پنجه راه تأمین می‌نمایند.

با توجه به موارد ذکر شده، با اعمال محدودیت برای حداقل مقادیر عدد شرط و کوچکترین مقدار تکین، می‌توان به ساختاری با سرعت‌پذیری مطلوب در تمام جهات دست یافت. لذا با اعمال به ترتیب حداقل محدوده $0/6$ و $0/13$ برای عدد شرط و کوچکترین مقدار تکین محدوده فضای کاری کارترزینی برای ربات با ساختار مندرج در جدول 3 که دارای پیشینه حجم فضای کاری است، به صورت شکل 15، خواهد بود.

حجم فضای کاری کارترزینی به دست آمده با سرعت‌پذیری مطلوب، برابر $0/0093 \text{ m}^3$ است که در حدود 77% از حجم فضای کاری کارترزینی را



شکل 17 بزرگترین فضای کاری چالاک (MDCW) کارتریزینی

کنده نتایج بدست آمده از روش های دیگر نیز می باشد.

این موضع نشان می دهد با قرار گیری مفصل یونیورسال در محدوده تقریبی میانگین از لینک میانی دستیابی به فضای کاری کارتریزینی و غیر کارتریزینی همراه با چالاکی حداقل همراه با حجم و شکل مطلوب امکان پذیر خواهد بود.

8- نتیجه گیری

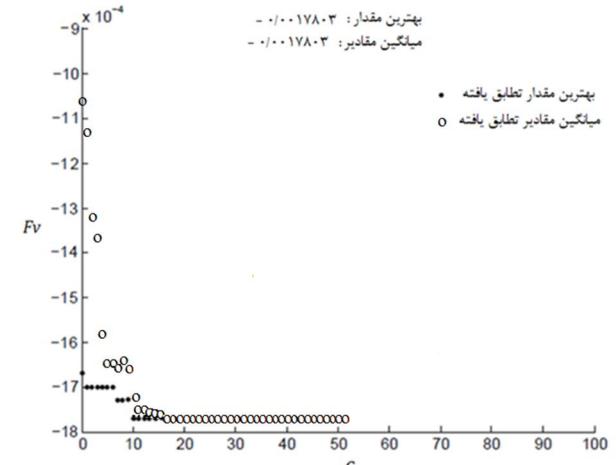
بررسی شاخص های کیفی عملکرد سینماتیکی ربات های موازی، با درجات آزادی مرکب، در گروهی بعد سازی ماتریس ژاکوبین است. دو دسته کلی از روش های بی بعد سازی ماتریس های ژاکوبین تا کنون توسط محققین پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی جدید در این مقاله، روشی به مراتب حساس تر و با کاربرد بالاتر می باشد. استفاده از شاخص های کیفی حاصل از ماتریس ژاکوبین بی بعد شده، قابلیت بهینه سازی ساختار ربات موازی با درجه آزادی مرکب را ممکن ساخته است. به خصوص در زمینه کاربردی در صنعت ماشین ابزار، فضای کاری مکانیزم در راستای $\times 7 \times Z$ همراه با قابلیت دوران با محدوده مشخص تعریف می شود. در این شرایط ارزیابی کیفی عملکرد سینماتیکی ربات تری سپت به عنوان مطالعه موردنی، و همچنین بهینه سازی ساختار ربات با درنظر گرفتن قیدهای هندسی و طراحی با تابع هدف حجم فضای کاری کارتریزینی قاعده مند (نژدیک به مکعب مستطیل) صورت گرفت. با توجه به تحقیقات صورت گرفته قبلی و نتایج حاصل از عملیات بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در محیط نرم افزار متلب¹ مشخص می شود که برای دستیابی به فضای کاری کارتریزینی با سرعت پذیری حداقل ثابت که مورد نیاز ماشین های ابزار می باشد، ساختار بدست آمده، دارای تفاوت اساسی با ماشین فرز سی ان سی² ساخته شده توسط شرکت تری سپت پی کی ام است به طوریکه در صورت قراردادن مفصل یونیورسال روی سکو ثابت (مطابق آنچه در شکل 1 نشان داده شده است) حجم فضای کاری کارتریزینی با چالاکی بالا، به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. نتایج حاصل از روش معرفی شده تایید

بردار موقعیت مفصل کروی آم سکوی متحرک	a_i
شعاع سکوی متحرک	a_l
بردار موقعیت مفصل یونیورسال آم سکوی ثابت	b_i
شعاع سکوی ثابت	b_l
بردار موقعیت c نسبت به 0	c
سرعت در راستای قائم پنجه ¹	c
بردار موقعیت P نسبت به C	d
ماتریس ژاکوبین	J
ماتریس ضرایب بی بعد ساز در روش مولفه های سرعت نقاط واقع بر سکو	J _v
ماتریس ضرایب بی بعد ساز در روش بی بعد سازی کارتریزینی	J _j
ماتریس ژاکوبین بی بعد کارتریزین	J _c
ماتریس ژاکوبین بی بعد با استفاده از ضریب وزن دار	J _d
ماتریس ژاکوبین بی بعد با استفاده از مولفه های قائم سرعت سه نقطه از سکو	J _v
بردار پایه آم	I _i
طول بردار پایه آم	I _l
ضریب وزن دار	L
سرعت خطی پایه ها	I _i
بردار یکه	n
دستگاه مختصات ثابت با محور های x, y و z	{O}
دستگاه مختصات متحرک با محور های u, v و w	{P}
بردار موقعیت مفاصل فعل	q
بردار سرعت مفاصل فعل	q̇
ماتریس دوران	R

با توجه به اطلاعات حاصل از عملیات بهینه سازی شکل فضای کاری چالاک به صورت شکل 17، خواهد بود. همچنین بزرگترین مکعب قابل محاط شدن در این فضای کاری با اندازه 0/0018m³ خواهد بود. حجم اشغال شده توسط این مکعب، 16٪ از کل فضای کاری با سرعت پذیری مطلوب می باشد.

مشاهده می شود بعد از فرآیند بهینه سازی ساختاری، حجم فضای کاری کارتریزینی تا حد ممکن به سمت فضای مکعبی شکل، با ابعاد بیشینه نزدیک شده به طوری که دستیابی پنجه، به هر موقعیتی درون آن با بیشینه سرعت دورانی و انتقالی امکان پذیر خواهد بود.

بررسی شاخص های کیفی عملکرد سینماتیکی ربات های موازی، با درجات آزادی مرکب، در گروهی بعد سازی ماتریس ژاکوبین است. دو دسته کلی از روش های بی بعد سازی ماتریس های ژاکوبین تا کنون توسط محققین پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی جدید در این مقاله، روشی به مراتب حساس تر و با کاربرد بالاتر می باشد. استفاده از شاخص های کیفی حاصل از ماتریس ژاکوبین بی بعد شده، قابلیت بهینه سازی ساختار ربات موازی با درجه آزادی مرکب را ممکن ساخته است. به خصوص در زمینه کاربردی در صنعت ماشین ابزار، فضای کاری مکانیزم در راستای $\times 7 \times Z$ همراه با قابلیت دوران با محدوده مشخص تعریف می شود. در این شرایط ارزیابی کیفی عملکرد سینماتیکی ربات تری سپت به عنوان مطالعه موردنی، و همچنین بهینه سازی ساختار ربات با درنظر گرفتن قیدهای هندسی و طراحی با تابع هدف حجم فضای کاری کارتریزینی قاعده مند (نژدیک به مکعب مستطیل) صورت گرفت. با توجه به تحقیقات صورت گرفته قبلی و نتایج حاصل از عملیات بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در محیط نرم افزار متلب¹ مشخص می شود که برای دستیابی به فضای کاری کارتریزینی با سرعت پذیری حداقل ثابت که مورد نیاز ماشین های ابزار می باشد، ساختار بدست آمده، دارای تفاوت اساسی با ماشین فرز سی ان سی² ساخته شده توسط شرکت تری سپت پی کی ام است به طوریکه در صورت قراردادن مفصل یونیورسال روی سکو ثابت (مطابق آنچه در شکل 1 نشان داده شده است) حجم فضای کاری کارتریزینی با چالاکی بالا، به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. نتایج حاصل از روش معرفی شده تایید



شکل 16 نمودار همگرایی نتایج در بهینه سازی حجم فضای کاری کارتریزینی همراه با بیشینه سرعت دورانی و انتقالی

1- MATLAB®

2- CNC (Computer Numerical Control)

- [6] D. Chablat, Ph. Wenger, S. Caro, J. Angeles, The iso-conditioning loci of planar three dof parallel manipulators, *Proceedings of DETC2002, ASME Design Engineering Technical Conferences*, Montreal, Quebec, Canada, 2002.
- [7] H. R. MohammadiDaniali, P. Zsombor-Murray, J. Angeles, The isotropic design of two general classes of planar parallel manipulators, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 12, No. 12, pp. 795-805, 1995.
- [8] C. M. Gosselin, The optimum design of robotic manipulators using dexterity indices, *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, Vol.9, No. 4, pp. 213-226, 1992.
- [9] S.-G. Kim, J. Ryu, New dimensionally homogeneous jacobian matrix formulation by three end-effector points for optimal design of parallel manipulators, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 4, pp. 731-737, 2003.
- [10] J. Angeles, Is there a characteristic length of a rigid-body displacement, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 41, pp. 884-896, 2006.
- [11] M. A. Hosseini, H.R. M. Daniali, Weighted local conditioning index of a positioning and orienting parallel manipulator, *Scientia Iranica Journalal*, Vol. 18, No. 1, pp. 115-120, 2011.
- [12] M. A. Hosseini, H.R. M. Daniali, H.D. Taghirad, Dexterous workspace optimization of Tricept robot, *Advanced Robotics*, Vol. 25, No. 1, pp. 1697-1712, 2011.
- [13] K.-E. Neumann, *US patent 4,732,525, 22 Mar. 1988*.
- [14] B. Siciliano, The Tricept robot: Inverse kinematics, manipulability analysis and closed-loop direct kinematics algorithm, *Robotica*, Vol. 17, No. 4, pp. 437- 445, 1999.
- [15] D. Zhang, C. M. Gosselin, Kinetostatic analysis and design optimization of the tricept machine tool family, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, No. 3, pp. 725-733, 2002.
- [16] <http://www.Pkmtricept.com>, 2012.
- [17] J. K. Salisbury, J. J. Craig, Articulated hands: Force control and kinematic issues, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 4-17, 1982.
- [18] R. E. Stamper, L. W. Tsai, G. C. Walsh, Optimization of a three DOF translational platform for well-conditioned workspace, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3250-3255, 1997.

حداکثر مقدار نکین ماتریس ژاکوبین بی بعد S_{\max} حداقل مقدار تکین ماتریس ژاکوبین بی بعد S_{\min} بردار سرعت زاویه‌ای^۱ ω بردار موقعیت پنجه در فضای شامل درجه آزادی ربات x بردار توییست پنجه در فضای شامل درجه آزادی ربات \dot{x} بردار موقعیت پنجه در فضای کارترزین X_c بردار سرعت پنجه در فضای کارترزین \dot{X}_c

زیرنویس‌ها

مفصل یونیورسال آم bi پایه آم li **10- مراجع**

- [1] P. VarshoviJaghargh, D. Naderi, M. Tale Masouleh, Forward kinematic problem of two 4-RRUR with different geometric structure and one 4-RUU parallel robots, *Modares Mechanical Engineering Journal*, Vol. 12, No. 4, pp. 105-119, 2013. (In Persian)
- [2] J.-P. Merlet, *Parallel Robot*, Second Edition, Springer, 2006.
- [3] G. Pond, J.A. Carrero, Quantitative dexterous workspace comparison of parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 42, No. 10, pp. 1388-1400, 2007.
- [4] F. Ranjbaran, J. Angeles, M. A. Gonzalez-Palacios, R. V. Patel, The mechanical design of a seven-axes manipulator with kinematic isotropy, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 14, pp. 21-41, 1995.
- [5] O. Ma, J. Angeles, Optimum architecture design of platform manipulators, *Proc. IEEE Int. Conf. Advanced Robotics*, 1991.