



طراحی و تحلیل فضای کاری، نقاط تکین و پیکربندی یک ربات موازی جدید چهار درجه آزادی

مرضیه رجبی^{۱*}، مهران محبوب خواه^۲

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

*تبریز، صندوق پستی ۵۱۶۶۶۱۴۷۷، mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق مکانیزم ربات موازی چهار درجه آزادی جدید مورد مطالعه قرار گرفته است. از مهمترین نکات طراحی یک ربات موازی بدست آوردن فضای کاری مفید و نقاط تکین آن می‌باشد. در ابتدا با استفاده از روابط سینماتیک معکوس، موقعیت اجزاء ربات بدست می‌آید. سپس فضای کاری ربات، با توجه به محدودیت‌هایی همچون نقاط تکین که در مکانیزم‌های موازی وجود دارد، بدست آمده است. در این مقاله برای به حداقل رساندن این نقاط در فضای کاری، پیکربندی‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای بررسی کیفیت فضای کاری از تحلیل ماتریس ژاکوبین استفاده شده است. همچنین با روش تفکیک نقاط فضای کاری، تمام این فضا به صورت نواحی طبقه‌بندی شده با ضرایب چالاکتی محلی مختلف با برنامه نویسی در محیط متلب بدست آمده است. در پیکربندی مکانیزم پیشنهادی، عدم تقارن اجزا باعث بهبود کیفیت عملکرد ربات و کاهش نقاط تکین در فضای کاری می‌شود. در این تحقیق، ساختار مکانیزم طوری طراحی شده که علیرغم عدم تقارن اجزاء یاد شده، فضای کاری متقارن با سفتی و چالاکتی بالا بدست آید.

کلیدواژه‌ها: فضای کاری، نقاط تکین، آنالیز ژاکوبین، چالاکتی

Design and analysis of workspace, singularities and configuration of a new parallel robot with four degrees of freedom

Marzieh Rajabi^{1*}, Mehran Mahboubkhah²

1- Mechanical engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

* P.O.B. 516661477 Tabriz, Iran, mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

ABSTRACT

In this research, a new parallel robot with four degrees of freedom is studied. The key important design stages of a parallel robot are obtaining its workspace and singularities. At first, the positions of the robot components were calculated using the inverse kinematic relations. Then, the workspace of the parallel mechanism has been obtained considering the limitations such as singularities. In this paper, various configurations have been analyzed to minimize these points in the workspace. Analysis of Jacobian matrix was used to assess the quality of the workspace. Also, by separating the workspace to some regions using a program that was written in Matlab, all of them are classified as areas with different coefficients of the local Dexterity. As a result, it was seen that asymmetry of the components can improve the performance of robot and reduce the singular points at the proposed robot configuration. Despite of asymmetry of the workspace, the structure of mechanism has been designed in order to obtain the highest rigidity and dexterity.

Keywords: Dexterity, Jacobian Analysis, Singularity, Workspace.

۱- مقدمه

برخوردار باشد تا بتوان با کمترین هزینه آن را ساخت، سیستم از نقطه نظر مصرف انرژی باید به صورت بهینه طراحی گردد تا کمترین میزان مصرف انرژی را به خصوص در کاربردهای موبایل داشته باشد، برای بعضی کاربردها قابلیت جابجایی بارهای سنگین موردنیاز است، مجری نهایی باید بتواند سرعت‌ها و شتاب‌های بزرگی را بدست دهد در نهایت در آن بتوان مفاهیم طراحی را برای ابعاد میکرو تا بزرگ تعمیم داد [۸].

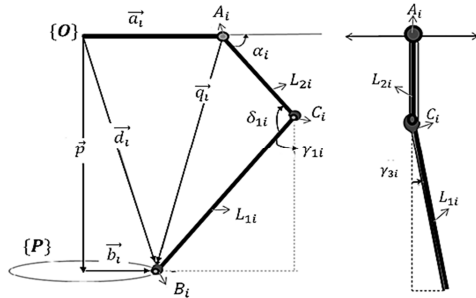
یکی از ویژگی‌های ربات‌های موازی دارا بودن چند حلقه بسته سینماتیکی است. در یک ربات موازی هر شاخه در تحمل قسمتی از بار سهیم است و این باعث می‌شود تا در عین مصرف انرژی کمتر، بتواند بارهای سنگین تری با شتاب و سرعت بیشتری جابجا نماید. مهمترین ضعف ربات‌های موازی محدودیت در فضای کاری آن‌هاست. این محدودیت به دلیل

یک مکانیزم موازی از یک صفحه متحرک و یک پایه ثابت، تشکیل شده است که حداقل با دو زنجیره سینماتیکی سری به طور موازی به یکدیگر اتصال دارند [۱]. نمونه‌ای از این ساختار توسط جیوانی در سال ۱۹۲۸ برای استفاده به عنوان سکوی سالن تئاتر پیشنهاد داده شده است [۲]. در اواسط قرن بیست نیز مکانیزم ۶ درجه آزادی به طور جداگانه توسط گو و استوارت به ترتیب به منظور تست استهلاک و شبیه سازی پرواز ارائه شده بود [۳]. تا به امروز بیشتر کارهای تئوری و عملی انجام شده بر روی ربات‌های موازی ۳ درجه آزادی صفحه‌ای و یا ۶ درجه آزادی انجام گرفته است. اما در سال‌های اخیر، ربات‌های موازی با ۶ درجه آزادی کمتر از ۶ درجه (ربات‌های موازی با ۴-۷ درجه آزادی محدود) مورد توجه قرار گرفته است [۴-۷]. ساختار مکانیزم‌ها باید دارای شرایطی باشد از جمله: سیستم مکانیکی باید از ساختار ساده‌ای

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نماید:

Please cite this article using:

M. Rajabi, M. Mahboubkhah, Design and analysis of workspace, singularities and configuration of a new parallel robot with four degrees of freedom, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 461-465, 2015 (in Persian)



شکل ۲. نمای دو بعدی مکانیزم

۲-۱- سینماتیک معکوس

با توجه به شکل ۲ برای محاسبه طول بردار L_{1i} داریم:

$$L_{1i}^2 = [(x_B - x_C)^2 + (y_B - y_C)^2 + (z_B - z_C)^2] \quad (3)$$

ساده سازی معادله فوق داریم:

$$S_i + A_i \cos \alpha_i + B_i \sin \alpha_i = 0 \quad (4)$$

با تغییر متغیر $\tan(\frac{\alpha_i}{2}) = t$ و جای گذاری در معادله (۴):

$$S_i + A_i \left(\frac{1-t^2}{1+t^2}\right) + B_i \left(\frac{2t}{1+t^2}\right) = 0 \quad (5)$$

در نهایت با حل معادله فوق، با داشتن مختصات موقعیت مجری نهایی، زوایای مربوط به لینک های محرک از رابطه زیر بدست خواهد آمد. این معادلات در محیط نرم افزار متلب کدبندی شده و برای هر لینک معادله حل شده و چهار زاویه دوران لینک های محرک که توسط موتور حرکت داده می شوند محاسبه می شوند.

$$\alpha_i = 2 \tan^{-1} \left(\frac{-B_i \pm \sqrt{B_i^2 - (S_i - A_i)(S_i + A_i)}}{(S_i - A_i)} \right) \quad (6)$$

۲-۲- سرعت و ژاکوبین

ارتباط بین سرعت مفاصل و لینک ها در ربات ها مشابه روش سینماتیکی انجام می شود. مفهوم سرعت با استفاده از یک بردار توصیف می شود که مشتق گیری تک تک مؤلفه ها را نشان می دهد. ژاکوبین ها میتوانند به صورت مستقیم از مشتق گیری معادلات سینماتیکی بدست آیند [۴-۱۰]. با مشتق گیری از طرفین معادله (۲):

$$\dot{p} + \dot{b}_i + (b_i \times \omega_p) = \dot{a}_i + (L_{1i} \times \omega_{1i}) + (L_{2i} \times \omega_a) \quad (7)$$

$$V + (b_i \times \omega_p) = (L_{1i} \times \omega_{1i}) + (L_{2i} \times \omega_a) \quad (8)$$

با ضرب داخلی طرفین معادله در L_{1i} داریم و ساده سازی داریم:

$$\left[\begin{matrix} L_{1i} \\ b_i \times L_{1i} \end{matrix} \right] \cdot [V \ \omega_p] = \omega_a \cdot (L_{2i} \times L_{1i}) \quad (9)$$

$$J_x \dot{X} = J_q \dot{q}_i \quad (10)$$

با ساده سازی روابط (۹) و (۱۰) و محاسبه $i=1,2,3,4$ ماتریس ژاکوبین مستقیم به صورت رابطه (۱۱) می باشد.

$$J_q = \begin{bmatrix} L_{2iy}L_{1iz} - L_{2iz}L_{1iy} \\ L_{2ix}L_{1iz} - L_{2iz}L_{1ix} \\ L_{2ix}L_{1iy} - L_{1ix}L_{2iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{1x} & J_{1y} & J_{1z} \\ J_{2x} & J_{2y} & J_{2z} \\ J_{3x} & J_{3y} & J_{3z} \\ J_{4x} & J_{4y} & J_{4z} \end{bmatrix} \quad (11)$$

به دلیل این که دوران فقط در راستای محور X می باشد مؤلفه های ماتریس ژاکوبین معکوس به صورت زیر قابل محاسبه می باشد.

$$J_x = \begin{bmatrix} L_{1i} \\ b_i \times L_{1i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11x} & L_{11y} & L_{11z} & b_{l1x} \\ L_{12x} & L_{12y} & L_{12z} & b_{l2x} \\ L_{13x} & L_{13y} & L_{13z} & b_{l3x} \\ L_{14x} & L_{14y} & L_{14z} & b_{l4x} \end{bmatrix} \quad (12)$$

برخورد بازوها به یکدیگر می باشد. ضمن این که این ربات ها در موقعیت های تکین ممکن است یک درجه آزادی غیرقابل کنترل بدست آورند و در نتیجه حرکت های غیر دلخواهی را بدست دهند [۹]. در این تحقیق مکانیزم مورد نظر یک ربات موازی جدید، با چهار درجه آزادی می باشد که دارای سه درجه انتقالی در راستای محورهای x، y و z و یک درجه دورانی حول محور X می باشد. ربات های شبیه مکانیزم پیشنهادی، دارای دوران حول محور Z می باشد. این درجه آزادی کاربرد چندانی نداشته و مکانیزم پیشنهادی دارای درجه آزادی مفیدتری می باشد. در این مکانیزم برای اتصال لینک ها از مفاصل کروی استفاده شده است. در این مقاله، ابتدا ساختار ربات پیشنهادی به صورت متقارن در نظر گرفته شده و محاسبات سینماتیکی آن انجام و بررسی شده است. فضای کاری ربات با استفاده از روش الگوریتم جستجو طراحی شده است. برای حذف کامل تکینگی، که در آن دستگاه دارای درجات آزادی غیرقابل کنترل است، طرح متفاوتی از ساختار ربات، پیشنهاد و بررسی شده است.

۲- روابط سینماتیکی

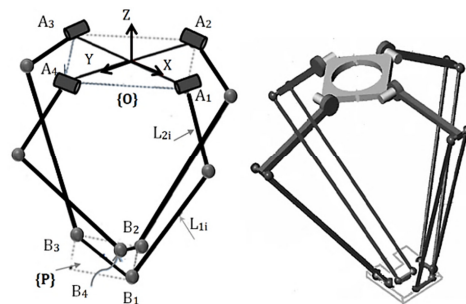
معمولاً مطالعه سینماتیک، نقطه شروع استاندارد رباتیک است. در سینماتیک معکوس موقعیت زوایای پایه ها هدف دستیابی به موقعیت زاویه ای هریک از چهار پایه با مشخص بودن موقعیت مکانی نقطه مرکزی سکوی متحرک نسبت به یک چارچوب مرجع می باشد [۱۰]. مفهوم سینماتیک مستقیم در پیدا کردن موقعیت مجری نهایی با داشتن موقعیت زوایای پایه ها محاسبه می شود می باشد. همان طور که در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است، طرح مکانیزم مورد نظر شامل یک پایه ثابت (دستگاه مختصات {O}) و یک پایه متحرک (دستگاه مختصات {P}) می باشد که به وسیله بازوهای L_{1i} و L_{2i} به هم متصل شده اند. در این ربات چرخش از موتور به لینک L_{2i} منتقل شده که در شکل ۲ با زاویه α_i نشان داده شده است و در نهایت حرکت، به سکوی متحرک (مجری نهایی)، که در شکل با دستگاه مختصات {P} نشان داده شده است منتقل می شود. اگر ماتریس تبدیل دستگاه {O} به {P} به صورت زیر با ${}^O_P T$ نشان داده شود:

$${}^O_P T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

توجه به شکل ۲ داریم:

$$p + OB_i = a_i + L_{1i} + L_{2i} \quad (2)$$

در این رابطه L_{2i} بردار مربوط به بازوی محرک و L_{1i} بردار بازوی متحرک می باشد. بردار انتقال دستگاه مختصات مرجع به سکوی متحرک با p نشان داده شده است و OB_i بردار مربوط به محل اتصال لینک های L_{1i} به سکوی متحرک می باشد.



شکل ۱. نمای شماتیک سه بعدی از ربات چهار درجه آزادی

$$Z_{\min} = L_{1i} \cos \gamma_{1i} - L_{2i} \sin \alpha_i \quad (17)$$

$$L_{1i} \cos \gamma_{1i} - L_{2i} \sin \alpha_{\max} = Z \quad (18)$$

$$a + L_{2i} \cos \alpha_{\max} - L_{1i} \sin \gamma_{1i} - b_i = R_{\max} \quad (19)$$

$$L_{1i} \cos \gamma_{2i} + L_{2i} \sin \alpha_{\min} = Z \quad (20)$$

$$L_{1i} \sin \gamma_{2i} - L_{2i} \cos \alpha_{\min} - a + b_i = R_{\max} \quad (21)$$

از حل دستگاه معادلات فوق در محیط برنامه نویسی متلب شعاع ماکزیمم فضای کاری بدست می‌آید. با بدست آوردن محدوده اولیه شعاع و ارتفاع اولیه، به وسیله الگوریتم جستجو تمام نقاط این محدوده جاروب شده و پس از چک کردن محدودیت های سینماتیکی و هندسی نقاطی که دارای شرایط مناسب هستند ذخیره می‌شوند.

۲-۲- تحلیل تکینگی

آنالیز ماتریس ژاکوبین نقش اساسی در در تحلیل و طراحی سیستم های رباتیکی ایفا می کند. با آنالیز ماتریس ژاکوبین می توان به نقاط تکین دست پیدا کرده و به تحلیل فضای کاری و مهارت ربات پرداخت. به همین دلیل آنالیز ماتریس ژاکوبین یکی از موضوعات اساسی در مطالعه ربات می‌باشد. در بیشتر بازوهای مکانیکی به ازای مقادیری از متغیرها ماتریس ژاکوبین تکین می‌شود. تکینگی معکوس زمانی که درمیان ماتریس ژاکوبین معکوس بدست آمده مساوی صفر باشد رخ می دهد. تکینگی مستقیم زمانی رخ می دهد که درمیان ماتریس ژاکوبین مستقیم صفر شود [۴-۸].

۲-۳- تجزیه ماتریس ژاکوبین به مقادیر تکین و تحلیل نقاط

هر ماتریس را می‌توان به صورت حاصل سه ماتریس USVT بیان نمود، که در آن ماتریس های U و V ماتریس های دوران و ماتریس S ماتریس شامل مقادیر تکین ماتریس A است. ماتریس S شامل مقادیر تکین (σ_1 و σ_2) می باشد. نسبت بزرگترین به کوچکترین مقادیر تکین، به نام عدد شرط ماتریس ژاکوبین شناخته می‌شود [۵]. عدد شرط به عنوان یکی از شاخص های عملکرد ربات محسوب می‌شود. نسبت بزرگترین به کوچکترین مقدار تکین، به نام عدد شرط (k) ماتریس ژاکوبین شناخته می‌شود.

$$k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (22)$$

شاخص شرط می‌تواند به صورت جزئی یا محلی (LCI) یا به صورت کلی (GCI) تعریف شود. شماره‌ی وضعیت مقداری بین یک و بی‌نهایت خواهد داشت ($1 < k < \infty$). هر چقدر این مقدار به عدد یک نزدیکتر باشد، شرایط سینماتیکی مکانیزم مساعدتر و تعداد نقاط تکین کمتر خواهد بود. همچنین ضریب LDI (چالاکای محلی) که معکوس k می‌باشد، مقداری بین صفر و یک خواهد داشت. هرچه مقادیر k محاسبه شده به عدد یک نزدیک تر باشد، آن نقطه از فضای کاری، شرایط مساعدتری از نظر تکینگی و سرعت پذیری را دارا می باشد. در این پروژه به طبقه‌بندی نقاط فضای کاری، از نظر چالاکای محلی، پرداخته شده است. به این صورت که نقاط با مقادیر k مختلف دسته بندی شده و هر ناحیه با رنگ مشخصی در فضای کاری نشان داده می‌شود. ترتیب شاخص چالاکای محلی (LDI) و شاخص چالاکای کلی (GDI) به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$LDI = \frac{1}{k} \quad (23)$$

$$GDI = \frac{\int (\frac{1}{k}) dw}{\int dw} \quad (24)$$

در رابطه ذکر شده مخرج کسر برابر با حجم فضای کاری می‌باشد. ضریب وضعیت کلی دارای مقداری بین صفر و یک است. ($0 \leq GCI \leq 1$). در حالت

در نهایت به معادله زیر خواهیم رسید.

$$\begin{bmatrix} L_{11x} & L_{11y} & L_{11z} & b_{1x} \\ L_{12x} & L_{12y} & L_{12z} & b_{2x} \\ L_{13x} & L_{13y} & L_{13z} & b_{3x} \\ L_{14x} & L_{14y} & L_{14z} & b_{4x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{1y} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{2x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{3y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{4x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dot{\alpha}_2 \\ \dot{\alpha}_3 \\ \dot{\alpha}_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

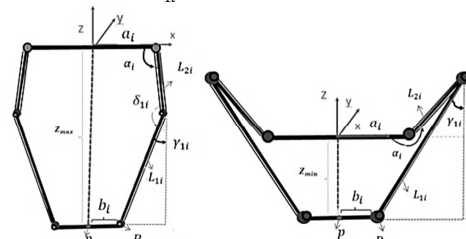
۳- طراحی و تحلیل فضای کاری

روش های متفاوتی برای محاسبه فضای کاری ارائه شده است، مانند روش گسسته یا روش جستجوی نقاط که در این روش ابتدا فضای ممکن برای فضای کاری مکانیزم را شبکه بندی می‌نماییم و سپس برای تمام نقاط این شبکه، قیود سینماتیکی حاکم بر مکانیزم بررسی می‌شود. هر نقطه ای که قیود صادق باشد، متعلق به فضای کاری مکانیزم می‌باشد. همچنین روش هندسی، که در این روش مرزهای فضای کاری مکانیزم به طریق هندسی تعیین می‌گردند [۹،۸]. در این تحقیق به نوعی از تلفیق این دو روش برای طراحی فضای کاری مکانیزم استفاده شده است. به طوری که ابتدا از طریق روش های هندسی و محدودیت قرارگیری لینک ها، مرزهای اولیه فضای کاری تعیین شده و در این محدوده با روش گسسته، شبکه بندی شده و دیگر محدودیت ها از جمله قیود سینماتیکی و برخورد لینک ها برای تمام نقاط شبکه بندی شده بررسی می‌شود. ابتدا به روش هندسی، برای تعیین فضای موردنظر، بیشترین و کمترین ارتفاع سکوی متحرک با قرار دادن ماکزیمم و مینیمم زاویه دوران α مانند شکل ۳ بدست می‌آید. همچنین ماکزیمم شعاع قرارگیری نقطه p با حل معادلات (۱۸) تا (۲۱) در دستگاه معادلات توسط نرم افزار متلب بدست می‌آید. که به این ترتیب نقاط جستجو محدودتر شده و فضای تخمینی اضافی و خارج از قرارگیری سکو محاسبه نشده و زمان حل معادله کاهش می‌یابد.

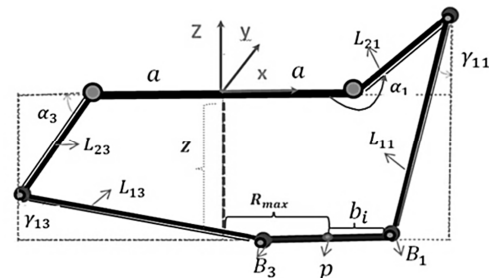
$$\gamma_{1i \min} = \sin^{-1} \left(\frac{a-b}{L_{1i}} \right) \quad (14)$$

$$Z_{\max} = L_{2i} + L_{1i} \cos \gamma_{1i} \quad (15)$$

$$\gamma_{1i \max} = \sin^{-1} \left(\frac{a-b+L_{2i} \cos \alpha_i}{L_{1i}} \right) \quad (16)$$



شکل ۳ ارتفاع ماکزیمم و مینیمم با شعاع صفر



شکل ۴ قرارگیری سکو در بیشترین شعاع

فضای کاری و به جبران طول ناشی از جابجایی محل اتصال لینک چهارم، طول لینک چهارم را نسبت به سه لینک دیگر بلندتر در نظر گرفتیم (شکل ۷)، که در شکل لینک چهارم متمایز شده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله طراحی و تحلیل فضای کاری ربات چهار درجه آزادی مورد بررسی قرار گرفت. که شامل سه حرکت انتقالی و یک حرکت دورانی حول محور X می باشد. برای بالا بردن کیفیت عملکرد دستگاه و از بین بردن کامل نقاط تکین در فضای کاری، از ساختار نامتقارن و جدید در اتصال لینک‌های متحرک به سکوی متحرک استفاده شد. با تجزیه و تحلیل کامل نقاط، کیفیت و چالاکی هر ناحیه و کیفیت عملکرد کلی مشخص شد. در نهایت نتایج حاصل از تأثیر انتخاب پارامترهای مختلف در جدول ۱ و در ۹ سطح بررسی و گردآوری شده است. بعنوان نمونه، شکل فضای کاری با نواحی طبقه بندی شده از نظر کیفیت عملکرد و چالاکی محلی در شکل ۸ نشان داده شده است. این نتایج، شکل تقریباً متقارن فضای کاری و طبقه بندی نقاط قوی و ضعیف آن را از نظر چالاکی نشان می دهند. با شبیه سازی در نرم افزار سالیدورکس اندازه های اجزای انتخاب شده، بررسی و مورد تایید قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل از تأثیر پارامترهای مختلف در کیفیت و اندازه مفید فضای کاری، ساختار بهینه مکانیزم انتخاب شده است. در ساختار نهایی، دستگاه مطلقاً دچار لقی نشده و درجه آزادی اضافی نخواهد داشت.

جدول ۱ تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد مکانیزم

| شماره وضعیت | a _i (i=1,2,3) | b _i (i=1,2,3) | b ₄ | L _{1i} (i=1,2,3) | L ₁₄ | L _{2i} |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|------------------------------|-----------------|-----------------|
| ۱ | ۱۷۰ | ۶۵ | ۶۵ | ۳۲۰ | ۳۲۰ | ۱۵۰ |
| ۲ | ۱۷۰ | ۶۵ | -۶۵ | ۳۲۰ | ۳۶۰ | ۱۵۰ |
| ۳ | ۱۷۰ | ۶۵ | -۶۵ | ۳۲۰ | ۳۲۰ | ۱۵۰ |
| ۴ | ۱۸۰ | ۸۵ | -۸۵ | ۳۲۰ | ۳۶۰ | ۱۳۰ |
| ۵ | ۱۹۰ | ۷۵ | -۳۵ | ۳۸۰ | ۴۵۰ | ۲۶۰ |
| ۶ | ۱۸۵ | ۷۰ | -۳۵ | ۴۰۰ | ۴۵۰ | ۲۳۰ |
| ۷ | ۱۸۵ | ۷۰ | -۱۵ | ۴۰۰ | ۴۳۰ | ۲۲۵ |
| ۸ | ۱۶۵ | ۷۰ | -۱۵ | ۳۲۰ | ۳۶۰ | ۱۸۵ |
| ۹ | ۱۸۰ | ۷۰ | -۱۵ | ۳۶۰ | ۳۸۰ | ۱۸۵ |

ادامه جدول ۱

| شماره وضعیت | R _{max} mm | Z mm | GDI |
|-------------|------------------------|----------------------------|------------|
| ۱ | ۲۰۰ | (-۴۳۶) ₋ (-۱۳۶) | ۰/۰۰۱۹۱۳۵۹ |
| ۲ | ۲۰۰ | (-۴۲۶) ₋ (-۱۲۳) | ۰/۰۰۶۳۷۹۰۲ |
| ۳ | ۲۰۰ | (-۴۰۶) ₋ (-۱۲۶) | ۰/۰۰۶۶۳۰۸۰ |
| ۴ | ۲۳۰ | (-۴۷۸) ₋ (-۱۳۸) | ۰/۰۰۵۸۲۱۳۶ |
| ۵ | ۲۴۰ | (-۵۹۶) ₋ (-۴۶) | ۰/۰۰۶۷۵۲۰۸ |
| ۶ | ۲۵۶ | (-۵۸۷) ₋ (-۱۲۶) | ۰/۰۰۷۰۹۶۱۶ |
| ۷ | ۲۵۶ | (-۵۸۳) ₋ (-۱۳۳) | ۰/۰۰۷۲۶۱۴ |
| ۸ | ۲۰۰ | (-۴۶۶) ₋ (-۹۶) | ۰/۰۰۷۱۵۶۵۹ |
| ۹ | ۲۳۰ | (-۵۱۸) ₋ (-۱۳۸) | ۰/۰۰۸۹۳۳۰۴ |

ایده آل مقدار این ضریب برابر یک است [۱۳، ۱۲، ۶]. با توجه توضیحات ذکر شده در مورد تجزیه و تفکیک ماتریس ها ، ماتریس ژاکوبین که با معادله (۲۵) نشان داده می شود:

$$J = J_x^{-1} J_q \quad (25)$$

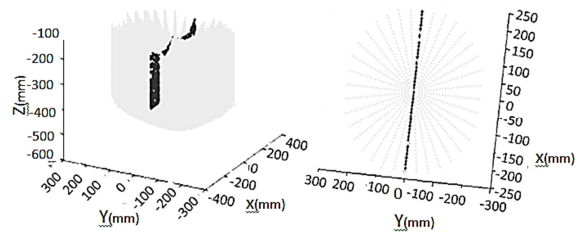
$$J = USV^T \quad (26)$$

۴- انتخاب طراحی بهینه مکانیزم ربات

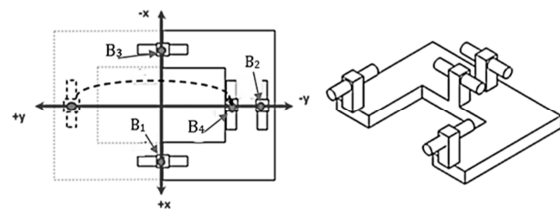
طرح مورد نظر برای مکانیزم چهار درجه آزادی، ابتدا به صورت کاملاً متقارن در نظر گرفته شد و نقاط تکین و چالاکی این طرح در محیط برنامه نویسی متلب مورد بررسی قرار گرفت. که در این شکل از مکانیزم نقاط تکین بر روی صفحه $\gamma=0$ قرار می گیرد (شکل ۵). در این نقاط مکانیزم دچار لقی شده و درجه آزادی اضافی و غیر قابل کنترل به ربات اعمال می شود.

به منظور کاهش و حذف نقاط تکین و نقاطی که برخورد لینک‌ها وجود داشت، تغییراتی در ساختار طرح مکانیزم پیشنهاد شد، که اساس آن بر اعمال عدم تقارن می باشد. این عدم تقارن در موقعیت اتصال مجری نهایی اعمال شد و نتایج آن در محیط متلب بررسی شد. در این طرح ساختار سکوی متحرک مانند شکل ۶ در نظر گرفته شد و محل اتصال لینک چهارم در راستای محور γ (عمود بر جهت دوران) جابجا شده و به محل اتصالی لینک دوم نزدیک شده است. که با توجه به نتایج حاصل از حل ماتریس ژاکوبین و تکینگی، نقاط تکین، در فضای کاری به کلی حذف می شود.

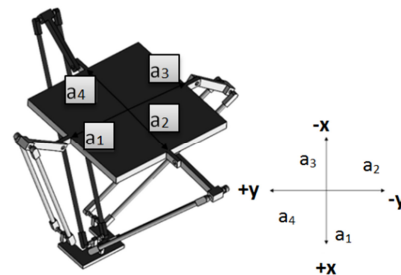
در این طرح پیشنهادی علیرغم حذف نقاط تکین و افزایش ضریب کیفیت عملکرد و افزایش چالاکی مکانیزم، به منظور جبران عدم تقارن در شکل



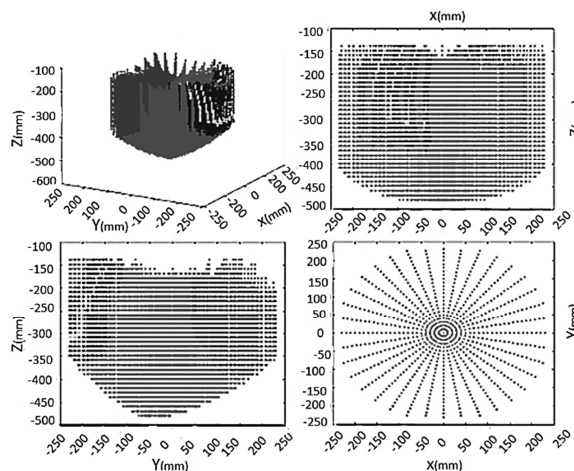
شکل ۵ نقاط تکین در فضای کاری ربات با پیکر بندی متقارن



شکل ۶ طرح سکوی متحرک



شکل ۷ طرح شبیه سازی شده مکانیزم



شکل ۸ فضای کار طبقه بندی شده مکانیزم در زاویه دید مختلف

۶- مراجع

- [1] X. Kong and C. Gosselin. *Type Synthesis of Parallel Mechanisms*. Springer Verlag, 2007.
- [2] J. E. Gwinnett. Amusement Device, 1931. US Patent 1,789,680.
- [3] I.A. Bonev, *The true origins of parallel robots*. <http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html>, 2003.
- [4] C. Gosselin, M. Tale Masouleh, V. Duchaine, P. L. Richard, S. Foucault, and X. Kong. Parallel Mechanisms of the Multipterion Family: Kinematic Architectures and Benchmarking. In IEE International Conference on Robotics and Automation, pages 555-560, 2007.
- [5] M. Kaviany, Heat transfer in porous media, in: W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, Y. I. Cho (Eds.), *Handbook of Heat Transfer*, pp. 9.32-9.43, New York: McGraw-Hill, 1998.
- [5] S. A. Joshi and L. W. Tsai. Jacobian Analysis of Limited-DOF Parallel Manipulators. *Journal of Mechanical Design*, 124(2):254-258, 2002
- [6] O. Ma, J. Angeles, Optimum architecture design of platform manipulators, Proc. IEEE International. Conferene. Advanced Robotics, 1991.
- [7] Adept Technology Inc, Adept robotics for packaging., Production Brochure, <http://www.adept.com>, 2008.
- [8] M.A.khosravi. Modeling and Robust Control redundant parallel robot Flexible cables. Department of Electrical and Computer Engineering Khajeh Nasir University.
- [9] M.H.saadatzi. Modeling and control of redundant parallel robots resistant flexible cables. Department of Electrical and Computer Engineering Khajeh Nasir University.
- [10] H. Li, C.M. Gosselin, M.J. Richard and B.M. St-Onge, Analytic form of the Six-Dimensional singularity locus of the general Gough-Stewart Platform. *Transactions of the ASME. Journal of Mechanical Design*, Vol. 128, no.1, p 279-87, 2006.
- [11] D. Stewart, A platform with six degree of freedom. in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 180, no.1, p 371-86, 1965.
- [12] 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.
- [13] R. E. Stamper, L. W. Tsai, G. C. Walsh, Optimization of a three DOF translational platform for well-conditioned workspace, *IEEE International. Conference. On Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3250-3255, 1997.
- [14] H. D. Taghirad, Parallel Robots Course Lecture Notes., Fall 2008.