



Investigating the Effect of Moving Platform Designation on the Work-Space and Efficiency of the C4 Four-Dof Parallel Robot



ARTICLE INFO

Authors

Aliakbari M.¹,
Mahboubkhah M.^{1*},
Khosroshahi Gh.²

¹ Mechanical Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

² Electrical & Computer Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

* Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

How to cite this article

Mahboubkhah M, Aliakbari M. "Investigating the Effect of Moving Platform Designation on the Work-Space and Efficiency of the C4 Four-Dof Parallel Robot". Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2022;22(10):137-144.

ABSTRACT

Parallel robots, which have several advantages over serial robots, have been one of the important industrial developments to increase the efficiency of controllable devices. Parallel structures have more suitable features such as higher rigidity, higher movement speed, non-cumulative errors and flexibility of the end-effector pose. However, the workspace of parallel robots, compared to serial robots, faces limitations due to the existence of multiple kinematic chains, as well as the complexities related to robot control. Small size of workspace is one of the main challenges of parallel robots. Designing moving platform of a parallel robot is one of the factors affecting the workspace of the robot. C4 is a four-dof parallel robot that is developed based on the three-dof Delta robot. In current study, the influence of the moving platform design on the workspace and efficiency of the robot has been investigated. After the initial overall design of the robot, three proposed modes for the moving platform have been investigated by considering the robot's kinematic parameters and robot error analysis. According to the results of the workspace and the robot efficiency analyses, the most efficient design has been selected.

Keywords C4 Four-dof Parallel Robot, Moving Platform, Workspace, Kinematic Parameters, Robot Efficiency

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژهنامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته. مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۱۳۷-۱۴۴.



بررسی تاثیر طراحی سکوی متحرک بر فضای کاری و کارایی ربات موازی چهار درجه آزادی C4



چکیده

معرفی ربات‌های موازی، که نسبت به ربات‌های سری دارای مزایای متعددی می‌باشند، یکی از تحولات مهم صنعتی برای افزایش کارایی دستگاه‌های کنترل‌پذیر بوده است. ساختارهای موازی دارای ویژگی‌های مناسب‌تری چون صلبیت بالای سیستم، سرعت حرکت بالا، خطاهای غیرانباشه و انعطاف‌پذیری موقعیت عملگر نهایی می‌باشند. با این وجود، فضای کاری ربات‌های موازی، نسبت به ربات‌های سری، به دلیل وجود زنجیره‌های متعدد سینماتیکی و همچنین پیچیدگی‌های مربوط به کنترل ربات، با محدودیت‌هایی مواجه می‌باشد. کوچک بودن فضای کاری یکی از چالش‌های اصلی ربات‌های موازی می‌باشد. طراحی سکوی متحرک ربات موازی، یکی از عوامل موثر بر فضای کاری می‌باشد. ربات C4، یک ربات موازی چهار درجه آزادی می‌باشد که بر پایه ربات سه درجه آزادی دلتا طراحی شده است. در این مقاله، به بررسی تاثیر طراحی سکوی متحرک بر فضای کاری و کارایی ربات C4 پرداخته شده است. پس از طراحی کلی اولیه ربات و سکوی متحرک، به بررسی چند حالت پیشنهادی برای سکوی متحرک با در نظر گرفتن پارامترهای سینماتیکی ربات و تحلیل خطای ربات پرداخته شده و با توجه به نتایج حاصل از بررسی پارامترهای سینماتیکی مربوط به فضای کاری و کارایی ربات، یک طرح به عنوان طرح برتر انتخاب شده است.

کلیدواژه‌ها ربات موازی چهار درجه آزادی C4، سکوی متحرک، فضای کاری، پارامترهای سینماتیکی، کارایی ربات

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

محمد علی اکبری^۱
مهران محبوب‌خواه^{۱*}
قادر کریمی‌ان خسروشاهی^۲

^۱ دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز
^۲ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز

* نویسنده مسئول

آدرس:

mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

در این مقاله، در ادامه بررسی طراحی اولیه ربات C4، به منظور دستیابی به فضای کاری کارآمدتر، به بررسی طراحی سکوی متحرک با سه حالت پیشنهادی مختلف پرداخته شده است (شکل ۳). تفاوت این طرح‌ها در ارتفاع محل اتصال بازوهای ۱ و ۳ نسبت به سکوی متحرک می‌باشد. در حالت اول، محل مفاصل نسبت به سطح سکو، در سطح بالاتری قرار دارند (شکل ۳-الف). در حالت دوم، مفاصل با سکو در یک سطح قرار داشته (شکل ۳-ب) و در حالت سوم، مفاصل، در سطح پائین‌تری نسبت به سکو قرار می‌گیرند (شکل ۳-ج). در بخش‌های بعد به بررسی شرایط ربات و نتایج حاصل از این اختلاف ارتفاع پرداخته خواهد شد.

۲- سینماتیک ربات C4

معادلات سینماتیک، نقطه آغاز محاسبات رباتیک می‌باشد. تحلیل سینماتیک به دو بخش مستقیم و معکوس تقسیم می‌شود [3]. در ربات C4، هدف از محاسبات سینماتیک معکوس، دستیابی به موقعیت زاویه‌ای پایه‌های متصل به سکوی ثابت با مشخص بودن موقعیت مکانی نقطه مشخصی از سکوی متحرک نسبت به چارچوب مرجع می‌باشد. محاسبات کامل سینماتیکی مربوط به C4 در [2] ارائه شده است. در شکل ۴، پارامترهای برداری ربات C4 نشان داده شده است. زاویه مفاصل دورانی α_i با اطلاع از موقعیت سکوی متحرک و پارامترهای سینماتیکی سکوها، اتصالات و طول بازوها به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$l_i \cdot n_i = T + R \cdot b_i + h_i - a_i - R_i \cdot c_i \quad (1)$$

$$h_i = \begin{cases} [0 & 0 & h_i]^T & i = 1,3 \\ [0 & 0 & 0]^T & i = 2,4 \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha_i = 2 \tan^{-1} \left(\frac{-F_i - \sqrt{F_i^2 - S_i^2 + E_i^2}}{S_i + E_i} \right) \quad (3)$$

عبارات مربوط به F_i ، E_i و S_i به صورت زیر قابل بیان هستند:

$$F_i = 2c_i \cdot (d_{iz}) \quad (4)$$

$$E_i = 2c_i \cdot [(a_{1x} - d_{1x}), (d_{2y} - a_{2y}), (d_{3x} - a_{3x}), (a_{4y} - d_{4y})] \quad (5)$$

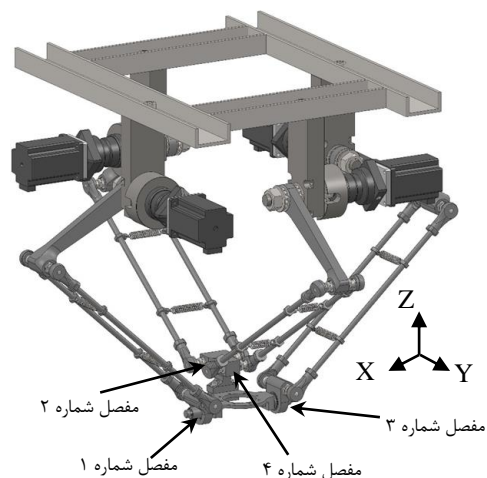
$$S_i = -l_i^2 + d_{ix}^2 + d_{iy}^2 + d_{iz}^2 + a_{ix}^2 + a_{iy}^2 + c_i^2 - 2(a_{ix} \cdot d_{ix} + a_{iy} \cdot d_{iy}) \quad (6)$$

مقدار h_i که نشان دهنده ارتفاع محل اتصال مفاصل بازوها به سکوی متحرک می‌باشد، برای سه حالت کاندید سکوی متحرک، متفاوت است. وجود همین اختلاف ارتفاع باعث ایجاد ویژگی‌های متفاوتی در فضای کاری و عملکرد ربات می‌گردد.

۳- تحلیل فضای کاری

تحلیل فضای کاری از معیارهای مهم بررسی عملکرد ربات می‌باشد که توانایی ربات در موقعیت‌دهی سکوی متحرک در شرایط مختلف را نشان می‌دهد. در این بخش، فضای کاری ربات C4 با توجه به سه حالت کاندید سکوی متحرک، مورد ارزیابی قرار گرفته است. به طور کلی تحلیل فضای کاری ربات‌ها با سه روش هندسی، گسسته‌سازی و عددی بررسی می‌شود [4].

ساختار ربات‌ها به دو دسته سری و موازی تقسیم می‌شوند. ربات‌های موازی با دارا بودن مزایای متعدد نسبت به ساختارهای سری، دارای درجات آزادی مختلفی می‌باشند. سازه‌های موازی ۳، ۴ و ۵ درجه آزادی بیشتر از دستگاه‌های ۶ درجه آزادی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ چرا که ساختار با درجات آزادی کمتر دارای ساختار مکانیکی و الگوریتم کنترل ساده‌تر، هزینه ساخت پایین‌تر، سرعت حرکت بالاتر و مصرف انرژی و استهلاک کمتری است. ربات دلتا یکی از کارآمدترین ساختارهای موازی با سه درجه آزادی انتقالی می‌باشد [1]. به منظور افزایش کارایی ربات دلتا، ساختارهای ۴ درجه آزادی مختلفی توسعه یافته‌اند. ربات C4، یک ربات موازی ۴ درجه آزادی (سه درجه انتقالی و یک درجه دورانی) توسعه یافته مبتنی بر ربات دلتا می‌باشد. طراحی سکوی متحرک، ایده‌ای جدید بوده که با ایجاد یک درجه آزادی دورانی حول X باعث افزایش کارایی سازه در مقایسه با سازه‌های ۳ درجه آزادی می‌شود. طرح‌های مختلفی از نحوه قرارگیری بازوهای دورانی و محل و نحوه اتصال به سکوی متحرک برای ایجاد درجه آزادی چهارم مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به نتایج حاصل از محاسبات مختلف، ترکیب اولیه بهینه‌ای طراحی شده است [2]. آنچه پس از تحلیل‌های نرم‌افزاری و ساخت نمونه‌های اولیه حاصل شده، چیدمان نامتقارن و C شکل محل اتصال مفاصل بر روی سکوی متحرک می‌باشد. این ساختار با حذف مشکل ناپایداری سیستم و بهره‌مندی از مزایای ربات موازی، می‌تواند در کاربردهای حساس و دقیق مانند ربات اندازه‌گیری مختصات، دستگاه چاپگر سه‌بعدی، ربات جابجایی اشیاء، میز دستگاه ماشینکاری و دستگاه شبیه‌ساز پرواز مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۱، تصویر شماتیک ربات C4 را نشان می‌دهد. کاربری اولیه ربات C4 برای دستگاه اندازه‌گیری مختصات (CMM) در نظر گرفته شده است. (شکل ۲)



شکل ۱) تصویر طرح ربات C4 و مفاصل متصل به سکوی متحرک

الگوریتم تحلیل فضای کاری در این مقاله از تلفیق دو روش گسسته‌سازی و حل سینماتیک معکوس انجام می‌گیرد. مقادیر متغیر عملگر دورانی ربات C4 با جابجایی سکوی متحرک، دارای محدودیت بوده و عبور از مرزهای فضای کاری موجب مختلط شدن مقدار این متغیر می‌شود. در نتیجه در اولین مرحله، مرزهای فضای قابل دسترس ربات بدست می‌آید. سپس، محدودیت‌های سینماتیکی و هندسی ربات شامل محدودیت عملگرهای دورانی، محدودیت حرکتی مفاصل غیرفعال و احتمال وقوع برخورد بین اجزای مختلف سازه بررسی می‌شود. در نهایت، فضای کاری از لحاظ تکینگی و چالاکگی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳-۱- مدل‌سازی و تحلیل خطا

وجود خطا در ربات C4 همانند دیگر ماشین‌ها اجتناب‌ناپذیر است. در واقعیت به علت وجود خطاهای مختلف، پارامترهای واقعی از پارامترهای نامی فاصله گرفته و موجب ایجاد خطا در موقعیت-دهی ربات می‌شود. در این بخش جهت بررسی تاثیر پارامترهای خطا روی خطای نهایی موقعیت سکو و بدست آوردن رابطه بین پارامترهای مختلف خطا، مدل‌سازی خطا انجام گرفته است. علاوه بر بررسی تغییرات متغیر اصلی (عملگر دورانی)، تغییرات دیگر پارامترهای سینماتیکی سکوها و پایه‌ها نیز (مجموعاً ۸ پارامتر) در نظر گرفته شده است. رابطه ماتریسی مدل خطای ربات C4 به صورت زیر می‌باشد [5-6]:

$$J_q \cdot \delta \Omega = J_x \cdot \delta \rho + J_u \cdot \delta u$$

$$J_x = [n_i^T (n_i \times R \cdot b_i)_x], \quad J_u = [-n_i^T \cdot R \quad -n_i^T \quad n_i^T \quad n_i^T \cdot R_i \quad 1]$$

$$J_q = \begin{cases} (n_i \times R_i \cdot c_i)_y & i = 1,3 \\ (n_i \times R_i \cdot c_i)_x & i = 2,4 \end{cases} \quad (7)$$

$$\delta \rho = [\delta P \quad \delta \Phi_x]^T, \quad \delta u = [\delta b_i \quad \delta h_i \quad \delta a_i \quad \delta c_i \quad \delta l_i]^T$$

$$\delta \Omega = \begin{cases} \delta \Omega_{iy} & i = 1,3 \\ \delta \Omega_{ix} & i = 2,4 \end{cases}$$

ماتریس ژاکوبین سینماتیکی (J_v) که بیانگر رابطه بین تغییرات متغیر اصلی ($\delta \Omega$) و تغییرات پارامترهای محوری و زاویه‌ای سکوی متحرک ($\delta \rho$) است، به صورت زیر بدست می‌آید:

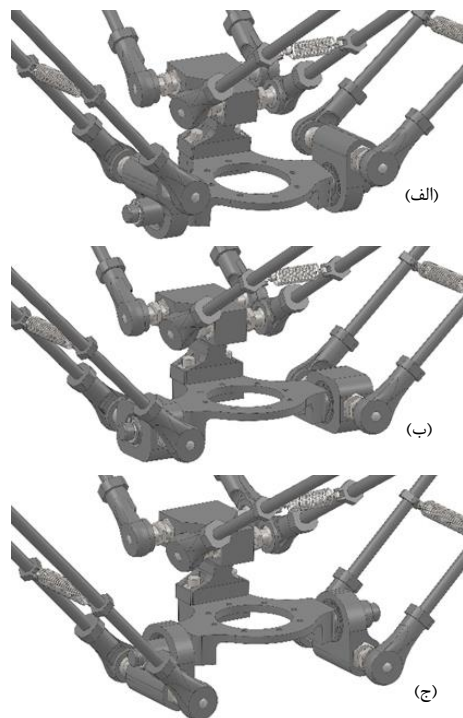
$$J_v = J_q^{-1} (J_x) \quad (8)$$

در یک ربات با ترکیبی از درجات آزادی دورانی و محوری، عناصر ماتریس ژاکوبین دارای واحدهای فیزیکی متفاوتی خواهند بود [7-8]. در نتیجه فرایندهای وابسته به ماتریس ژاکوبین، منجر به نتایج نادرست می‌شود. همانطور که در معادله ۱۱ مشاهده می‌شود ماتریس‌های J_x ، J_q و J_v از نظر بُعد، ماتریس‌هایی غیرهمگن می‌باشند. برای رفع مشکل از روش مقیاس‌گذاری ماتریس‌ها استفاده می‌کنیم [7]؛ بدین صورت که ستون‌هایی از ماتریس‌های J_q و J_x که ناهمگن هستند به ترتیب بر b_i و c_i تقسیم می‌شوند تا بی‌بُعد گردند. در نتیجه J_v ، یک ماتریس ژاکوبین سینماتیکی مقیاس‌گذاری شده و همگن می‌شود.

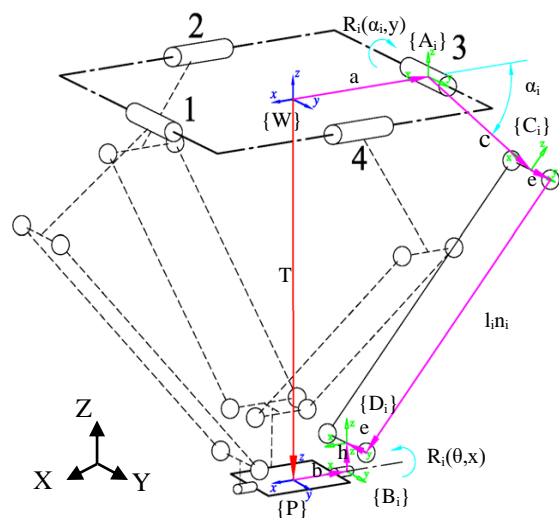
$$J_v = J_q^{-1} (J_x) \quad (9)$$



شکل ۲) تصویری از ربات C4 در کاربری به عنوان ربات CMM



شکل ۳) طرح‌های سکوی متحرک: الف) مفاصل ۱ و ۳ بالای سطح سکو، ب) مفاصل ۱ و ۳ زیر سطح سکو، ج) مفاصل ۱ و ۳ هم سطح با سکو



شکل ۴) نمایش برداری از طرح شبیه‌سازی شده ربات C4

۳-۲- تحلیل تکنیکی

نقاط تکین، نواحی ویژه‌ای از فضای کاری می‌باشند که سازه، سفتی خود را از دست داده و دارای درجه آزادی غیرقابل کنترل می‌شود. تکنیکی در ربات‌های موازی به سه گروه طبقه‌بندی می‌شوند: تکنیکی سری (ماتریس J_q)، تکنیکی موازی (ماتریس J_x) و تکنیکی معماری (ماتریس J_q و J_x). تکنیکی زمانی اتفاق می‌افتد که درمیان ماتریس برابر صفر شود. در تحلیل تکنیکی، با محاسبه درمیان این ماتریس‌ها در موقعیت‌های مختلف، نقاط تکین بدست می‌آید.

۳-۳- تحلیل چالاک سیوماتیکی

چالاک ربات، کیفیت کاری دستگاه را مشخص می‌کند. به عبارتی اگر عملگرها در یک جهت مشخص نسبت به سرعت کم مفاصل، بتوانند به سرعت بالاتری دست یابند، ربات دارای چالاک بالایی در آن جهت می‌باشد. روش‌های مختلفی برای ارزیابی چالاک وجود دارد [9-13]. در این مقاله بر اساس مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین و دو معیار قابلیت کنترل‌پذیری و معکوس عدد حالت، چالاک سیستم مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۴- معیار قابلیت کنترل‌پذیری

علاوه بر نقاط تکین، در همسایگی نقاط تکین نیز اثر تکنیکی و شرایط نامطلوب بر عملکرد سیستم و چالاک ربات وجود خواهد داشت. در بررسی چالاک با معیار قابلیت کنترل‌پذیری، به دلیل بررسی حرکت عملگرهایی در تمامی جهات، این معیار نسبت به دیگر معیارها، اهمیت بیشتری دارد [12,14-17]. قابلیت کنترل‌پذیری محلی مطابق معادله ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$\mu = \sqrt{\det(J_V J_V^T)} \quad (10)$$

هر چه مقدار μ بیشتر باشد به معنی دوری از نقاط تکین و افزایش کیفیت کاری به دلیل افزایش دقت حرکتی سیستم و در نتیجه افزایش چالاک سیستم خواهد بود. معیار قابلیت کنترل‌پذیری دارای برخی محدودیت‌ها مانند وابستگی به ترتیب و ابعاد می‌باشد. جهت رفع این محدودیت‌ها از معیار قابلیت کنترل‌پذیری همگن شده [12] استفاده می‌شود که مستقل از مقیاس، واحد و مرجع مبنا می‌باشد.

$$\mu_n = \frac{\mu_i}{\max(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n)} \quad (11)$$

μ_i قابلیت کنترل‌پذیری در نقطه مورد نظر و $\max(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ حداکثر مقدار قابلیت کنترل‌پذیری در کل فضای کاری می‌باشد. قابلیت کنترل‌پذیری کلی سیستم بر اساس معادله ۱۲ بدست می‌آید:

$$GMI = \frac{\int \mu_n dw}{\int dw} \quad (12)$$

۳-۵- عدد حالت و همسانگردی سیستم

به دلیل تاثیر تکنیکی در همسایگی نقاط تکین بر عملکرد سیستم، از معیار عدد حالت استفاده می‌شود تا بتوان در فاصله مناسبی از نقاط تکین قرار گرفت که تاثیر منفی نقاط تکین از

بین برود. عدد حالت یا فاکتور بزرگنمایی خطا، نشان می‌دهد که چگونه خطاهای عملگرها در جهات مختلف بزرگنمایی شده و خطای نهایی موقعیتی سیستم را ایجاد می‌کنند [12]. برای بدست آوردن عدد حالت از روش تجزیه مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین مطابق [12] بهره گرفته می‌شود. نسبت بزرگترین به کوچکترین مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین، عدد حالت می‌باشد.

$$k(J_v) = k(J_v^{-1}) = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (13)$$

در معادله ۱۳، k نشانگر عدد حالت و σ_{\max} و σ_{\min} به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر منفرد می‌باشند. محدوده عدد حالت بین عدد یک و بینهایت است. زمانی که عدد حالت برابر با ۱ شود، ماتریس ژاکوبین، یک ماتریس متعامد بوده و شرایط سینماتیکی سازه در بهترین حالت خود قرار دارد (همسانگردی سینماتیکی). اگر این شاخص برای موقعیت خاصی محاسبه گردد، به عنوان شاخص محلی و اگر مقدار متوسط عدد حالت در تمامی نقاط فضای کاری محاسبه شود، به عنوان عدد حالت کلی خواهد بود (معادله ۱۴).

$$GCI = \frac{\int k dw}{\int dw} \quad (14)$$

حجم فضای کاری با $\int dw$ نشان داده می‌شود. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد برای ارزیابی چالاک سیستم از معیار چالاک محلی ربات ((۱۵) که برابر با معکوس عدد حالت است، استفاده می‌شود [12, 18-21]. این معیار مقداری بین صفر و یک داشته و در حالت ایده‌آل برابر ۱ می‌باشد. یعنی سیستم در این نقطه از فضای کاری دارای توانایی بالایی برای عملکرد دقیق در سرعت‌های بالا دارد. شاخص چالاک کلی سیستم نیز از معادله ۱۶ محاسبه می‌شود.

$$LDI = \frac{1}{k} \quad (15)$$

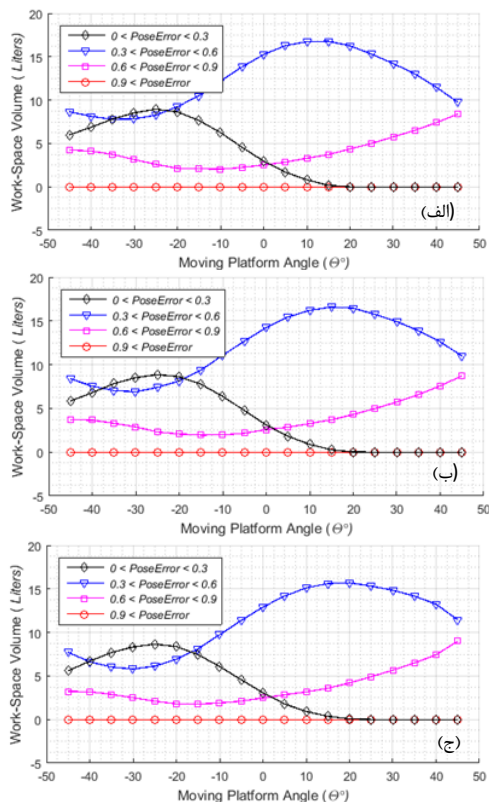
$$GDI = \frac{\int \left(\frac{1}{k}\right) dw}{\int dw} \quad (16)$$

بررسی طرح‌های پیشنهادی سکوی متحرک و عملکرد ربات

ساختار سکوی متحرک بر روی فضای کاری ربات و کارایی ربات اثرگذار می‌باشد. از این رو کیفیت فضای کاری بایست برای سه حالت پیشنهادی سکوی متحرک با توجه به توانایی‌های حرکتی و محدودیت‌های سازه، مورد ارزیابی قرار گیرد. در نتیجه از میان طرح‌های پیشنهادی، بهترین حالت سکو با بالاترین شاخص‌های عملکردی ربات انتخاب شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبل، مراحل کار به ترتیب زیر می‌باشد:

با کد نویسی معادلات سینماتیک معکوس و تمامی معادلات لازم برای بررسی پارامترهای بازرسی فضای کاری ربات در نرم‌افزار متلب، در ابتدا فضای کاری عمومی قابل دسترس ربات برای هر سه حالت سکو بدست می‌آید. سپس برای هر یک از طرح‌ها، نقاط مختلف فضای کاری از نظر تکنیکی، چالاک (بر پایه دو فاکتور قابلیت کنترل‌پذیری و معکوس عدد حالت) و نهایتاً خطای نهایی

$h_i=+20$ ، بیش از دو حالت دیگر می‌باشد. با توجه به مجموع نتایج دو تصویر، در زوایای سکوی کمتر از -10° ، کارایی و دقت ربات نسبت به زوایای بالاتر سکو، کمتر خواهد بود.



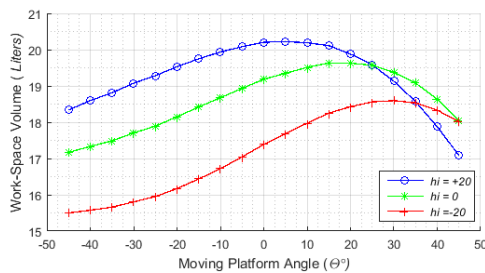
شکل ۶ خطای نهایی موقعیت سکوی متحرک

تکینگی: بر اساس محاسبات انجام شده در نرم‌افزار متلب، دترمینان ماتریس‌های ژاکوبین در هیچ کدام از نقاط فضای کاری برای حالت‌های سه‌گانه پیشنهادی سکو، برابر صفر نمی‌باشد. این بدین معنی است که نقاط تکین، در خارج از فضای کاری عمومی بدست آمده برای ربات قرار گرفته‌اند. اما برای بررسی دقیق‌تر موضوع، شاخصی به نام تلرانس تکینگی ϵ تعریف گردید که مقادیر دترمینان ماتریس کمتر از ϵ ، به عنوان نقاط تکین در نظر گرفته شود. بدین صورت که با اعمال مقدار 0.1 میلی‌متر خطا به هر یک از پارامترهای طولی و 0.1 درجه به پارامترهای زاویه‌ای در مدل خطای ربات، میزان خطا برای کلیه نقاط فضای کاری محاسبه و مقدار خطای نهایی حاصل بیش از 1 میلی‌متر، به عنوان خطای بحرانی تعریف گردید. مقدار دترمینان نقاطی که چنین خطایی را نشان دادند، به عنوان تلرانس تکینگی در نظر گرفته شد.

موقعیتی و زاویه‌ای سکوی متحرک مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها، با بررسی نتایج ارزیابی، بهترین طراحی سکوی متحرک از میان سه حالت پیشنهادی، معرفی خواهد شد.

نتایج

فضای کاری عمومی: به دلیل وجود تصاویر بسیار زیاد از حالت‌های مختلف ربات در فضای کاری عمومی و زوایای مختلف برای سه حالت سکوی متحرک، به منظور بیان خلاصه و کارآمدتر نتایج، به نمایش نمودار تغییرات حجم فضای کاری عمومی ربات بسنده شده است. در شکل ۵، نمودار تغییرات حجم فضای کاری قابل دسترس ربات برای هر سه حالت پیشنهادی سکوی متحرک در زوایای -45° تا $+45^\circ$ از سکوی متحرک و با در نظر گرفتن تمامی محدودیت‌های حرکتی و پارامترهای نامی ربات نشان داده شده است. مطابق این تصویر، برای $h_i=+20$ بیشترین حجم فضای کاری در زوایای مابین صفر و ده درجه، به دست می‌آید. اما برای $h_i=0$ ، بیشترین حجم فضای کاری در حوالی $+20^\circ$ درجه و برای $h_i=-20^\circ$ درجه و $+30^\circ$ می‌باشد. با وجود آنکه حجم فضای کاری برای دو حالت $h_i=0$ و $h_i=-20^\circ$ در زوایای نزدیک $+45^\circ$ بیشتر از حالت $h_i=+20$ می‌باشد، اما در مابقی مناطق، حجم فضای کاری عمومی و همچنین کل حجم فضای قابل دسترس برای حالت بالای سکو، بیشتر می‌باشد. این موضوع، باعث قدرت عملکرد بیشتر ربات در حالتی که سکوی متحرک در حالت $h_i=+20$ خواهد شد. چرا که فضای کاری قابل دسترس ربات در مجموع موقعیت‌های قابل دسترس برای عملگر نهایی، بیشتر می‌باشد.



شکل ۵ مقایسه فضای کاری عمومی ربات در حالت‌های پیشنهادی سکو

خطای نهایی موقعیتی و زاویه‌ای سکوی متحرک: مطابق

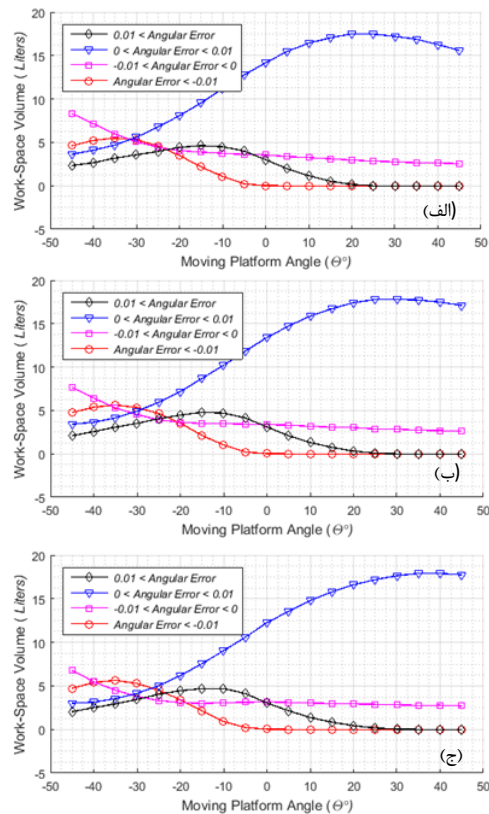
شکل ۶، تغییرات حجم فضای کاری با توجه به خطای نهایی موقعیتی سکوی متحرک بدست آمده است. مطابق شکل مشاهده می‌شود با حرکت از زوایای -45° به سمت $+45^\circ$ ، میزان نقاط با خطای بالا کاسته شده و بر حجم نقاط با دقت بالا، افزوده می‌شود. شکل تغییرات تقریباً در هر سه حالت مشابه هم می‌باشد، اما حجم نقاط دقیق در $h_i=+20$ ، بیشتر از دو حالت دیگر می‌باشد. به طور مشابه و مطابق شکل ۷، حجم تغییرات نقاط با بررسی خطای نهایی زاویه‌ای سکوی متحرک در هر سه حالت سکو حالتی مشابه هم دارد. اما حجم نقاط با دقت بالاتر در

چالاکي: چالاکي ربات از طريق دو فاکتور قابليت کنترل پذيری همگن شده و معکوس عدد حالت مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۰، میزان قابليت کنترل پذيری همگن شده در نقاط مختلف فضای کاری برای سه حالت سکوی متحرک پیشنهادی نشان داده شده است. هر چه مقدار این فاکتور بیشتر باشد به معنی دوری از نقاط تکين و بالا بودن چالاکي سیستم می باشد. در این تصویر مشاهده می شود که با افزایش زاويه دوران سکوی متحرک از ۴۵- به ۴۵+ برای حالت $h_i=+20$ ، ابتدا قابليت کنترل پذيری تا ۱۵- درجه، روندی کاهشی داشته و سپس تا ۳۰+ روندی افزایشی را تجربه می کند و مجدداً بعد از این زاويه، کاهش می یابد. برای $h_i=-20$ به طور کلی قابليت کنترل پذيری تقریباً به طور مداوم در حال کاهش می باشد. برای حالت سکوی $h_i=0$ نیز تغییرات به صورت نوسانی بوده و به طور کلی مقادير عددی پائینی را از بابت قابليت کنترل پذيری نشان می دهد. غیر از بازه ۴۵- تا ۱۰- که مقدار این شاخص در $h_i=+20$ کمتر از حالت $h_i=-20$ می باشد، در مابقی بازه کاری، قابليت کنترل پذيری برای سکوی با ارتفاع مثبت، به صورت معنی داری بیشتر از دو حالت دیگر می باشد. بنابراین، کارایی ربات در حالت $h_i=+20$ بیشتر از دو حالت دیگر سکوی متحرک خواهد بود.

در شکل ۱۱ تغییرات حجم نقاط با توجه به چالاکي کلی در نقاط مختلف فضای کاری بر اساس عدد حالت نشان داده شده است. عدد حالت عددی بین ۱ تا بینهایت می باشد. در نتیجه چالاکي عددی بین صفر تا ۱ می باشد. این عدد هر چه به ۱ نزدیک باشد، ربات در آن نقطه دارای شرایط عملکردی مطلوب و چالاکي بالایی می باشد. با توجه به محاسبات صورت گرفته، در ربات C4 در هیچ یک از نقاط فضای کاری برای سه حالت سکوی متحرک عدد حالت برابر ۱ نمی باشد. بنابراین نقاط ایزوتروپیک در فضای کاری آن وجود ندارد. اما به طور کلی برای هر سه حالت سکوی، شاخص کلی چالاکي با افزایش زاويه سکوی متحرک، افزایش می یابد. این نمودار تغییرات برای هر سه حالت سکوی روندی مشابه را نشان می دهد. البته در بازه ۴۵- تا ۲۰+، چالاکي با سکوی $h_i=+20$ بیشتر از دو سکوی دیگر می باشد.

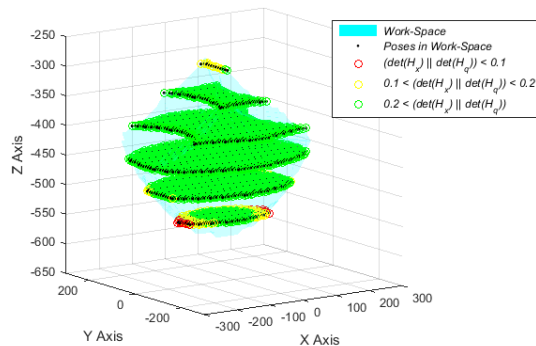
۴- نتیجه گیری

با توجه به ارزیابی های انجام شده بر روی سه حالت مختلف پیشنهادی برای سکوی متحرک ربات ۴ درجه آزادی C4 که به منظور بهبود طراحی و ارتقاء کیفیت فضای کاری ربات صورت گرفته است، معیارهای مختلفی بررسی گردید. ابتدا فضای عمومی قابل دسترس ربات برای استفاده در سه حالت پیشنهادی سکوی متحرک، با کدنویسی شرایط ربات و پارامترهای سینماتیکی، محاسبه گردید. سپس با مدلسازی خطا برای ۴۸ پارامتر مختلف، مدل خطا شبیه سازی و معادلات لازم استخراج و در نرم افزار متلب کدنویسی گردید. در ادامه، با استفاده از مدل

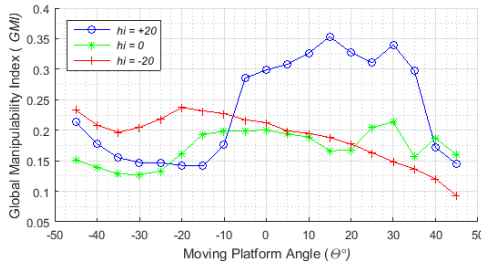


شکل ۷) خطای نهایی زاویه ای سکوی متحرک

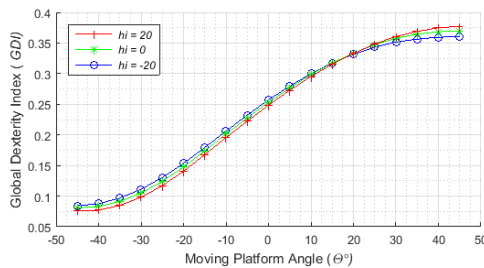
نقاطی با دترمینان کمتر از تیلانس تکینگی، به عنوان نقاط تکين در نظر گرفته شد. با توجه به عدد حالت که همسایگی نقاط تکين متاثر از تکینگی را مشخص می کند، نقاط با دترمینانی در بازه مشخص شده به عنوان نقاط شبه تکين در نظر گرفته شد. در شکل ۸ بر اساس تغییر زاويه سکوی متحرک، حجم فضایی که نقاط از نظر تکینگی در سه بخش تکين، شبه تکين و غیر تکين بوجود آورده اند، نشان داده شده است. در شکل ۹، یک نمونه از فضای کاری ربات با نمایش تکینگی برای یک حالت از حالات مختلف سکوی آورده شده است. مطابق این تصویر، در فضای کاری، نقاط قرمز رنگ، نقاطی هستند که دترمینان ماتریس های h و x کوچکتر از تیلانس تکینگی ϵ می باشند. بنابراین، این نقاط به عنوان نقاط تکين در نظر گرفته شده است. همچنین نقاط زرد رنگ نشان دهنده نمونه ای از نقاط شبه تکين هستند که اثرات کم تکینگی در آنها نیز وجود. نقاط سبز رنگ فضای کاری دارای شرایط مطلوبی از لحاظ تکینگی می باشد. نوع تکینگی ربات C4 از نوع تکینگی موازی است که به جهت سکوی متحرک بستگی دارد. با توجه به نتایج به دست آمده، نحوه تغییر حجم فضای کاری با در نظر گرفتن تکینگی در هر سه سکوی پیشنهادی، تغییرات مشابه هم را نشان می دهند. اما در مجموع، حجم کلی نقاط بدون اثرپذیری از تکینگی، به مقدار اندکی، در سکوی با $h_i=+20$ بیشتر از دو حالت دیگر سکوی می باشد.



شکل ۹) یک نمونه از فضای کاری با لحاظ تکینگی نقاط



شکل ۱۰) قابلیت کنترل پذیری همگن شده کلی در نقاط مختلف فضای کاری ربات برای حالت های مختلف سکوی متحرک



شکل ۱۱) شاخص چالاکی کلی برای حالت های مختلف سکوی متحرک

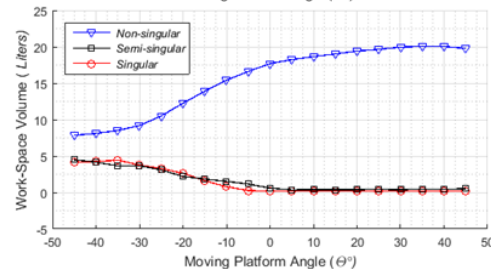
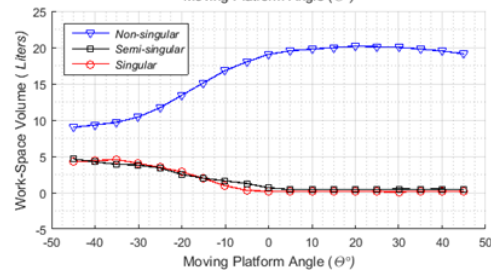
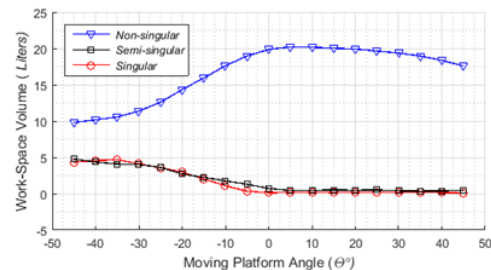
مراجع

- 1- Lambert, P., Parallel robots with configurable platforms. 2013: TU Delft, Delft University of Technology.
- 2- Mahboubkhah M, Barari A. Design and development of a novel 4-DOF parallel kinematic coordinate measuring machine (CMM). International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2019 Aug 3;32(8):750-60.
- 3- Cubero, S., Industrial robotics: Theory, modelling and control. 2006: Pro Literatur Verlag.
- 4- Li, Wei, and Jorge Angeles. "A novel three-loop parallel robot with full mobility: kinematics, singularity, workspace, and dexterity analysis." Journal of Mechanisms and Robotics 9, no. 5 (2017).
- 5- Jiang, Yao, Tiemin Li, Liping Wang, and Feifan Chen. "Kinematic error modeling and identification of the over-constrained parallel kinematic machine." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 49 (2018): 105-119.
- 6- Huang, Tian, Pujun Bai, Jiangping Mei, and Derek G. Chetwynd. "Tolerance design and kinematic

خطا، خطای نهایی موقعیت و زاویه ای برای سکوی متحرک در فضای کاری برای سه حالت مختلف سکو، بررسی گردید. تکینگی نقاط فضای کاری ربات و چالاکی ربات در انجام حرکات، مورد ارزیابی واقع شد. چالاکی ربات با استفاده از دو معیار معکوس عدد حالت و قابلیت کنترل پذیری سیستم، بررسی شد. از آنجائی که هدف از این بررسی، انتخاب طراحی سکوی متحرک برای بالاترین کارایی سیستم می باشد، با توجه به نتایج به دست آمده، سکوی متحرک با $h_i=+20$ به عنوان طراحی برتر مورد استفاده قرار می گیرد. چرا که با توجه به نتایجی که حاصل گردید، در استفاده از این حالت سکو، کارایی سیستم نسبت به دو سکوی دیگر با توجه به پارامترهای بررسی شده، بالاتر می باشد.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله برای اولین بار و صرفاً برای دومین کنفرانس ملی ماشینکاری و ماشینهای ابزار پیشرفته ارسال می شود و پیش از این به هیچ مجله یا کنفرانس دیگری ارسال نشده است.
تعارض منافع: گواهی می شود هیچگونه تعارض منافی در این مقاله وجود ندارد.

منابع مالی: این مقاله در هیچ یک از مراحل تحقیقی و اجرایی از هیچ منبع مالی منتفع نشده است.



شکل ۸) الف شاخص محلی تکینگی برای سه حالت (الف) سکوی با ارتفاع مثبت، (ب) سکوی با ارتفاع صفر و (ج) سکوی با ارتفاع منفی

- 21-Pusey, Jason, Abbas Fattah, Sunil Agrawal, and Elena Messina. "Design and workspace analysis of a 6-6 cable-suspended parallel robot." *Mechanism and machine theory* 39, no. 7 (2004): 761-778.
- calibration of a four-degrees-of-freedom pick-and-place parallel robot." *Journal of Mechanisms and Robotics* 8, no. 6 (2016).
- 7- Lou, Y. J., G. F. Liu, and Z. X. Li. "A general approach for optimal design of parallel manipulators." *IEEE Transactions on Automation science and engineering* (2005).
- 8- Khan, Suleman, Kjell Andersson, and Jan Wikander. "Jacobian matrix normalization-a comparison of different approaches in the context of multi-objective optimization of 6-dof haptic devices." *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 79, no. 1 (2015): 87-100.
- 9- Merlet, J.-P., *Parallel robots*. Vol. 74. 2012: Springer Science & Business Media.
- 10-Klein, Charles A., and Bruce E. Blaho. "Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators." *The international journal of robotics research* 6, no. 2 (1987): 72-83.
- 11-Zhang, Dan, Lihui Wang, Zhen Gao, and Xiaoping Su. "On performance enhancement of parallel kinematic machine." *Journal of Intelligent Manufacturing* 24, no. 2 (2013): 267-276.
- 12-Patel, Sarosh, and Tarek Sobh. "Manipulator performance measures-a comprehensive literature survey." *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 77, no. 3-4 (2015): 547-570.
- 13-Kucuk, Serdar, and Zafer Bingul. "Comparative study of performance indices for fundamental robot manipulators." *Robotics and Autonomous Systems* 54, no. 7 (2006): 567-573.
- 14-Yoshikawa, Tsuneo. "Manipulability of robotic mechanisms." *The international journal of Robotics Research* 4, no. 2 (1985): 3-9.
- 15-Anvari, Zolfa, Parnyan Ataei, and Mehdi Tale Masouleh. "Collision-free workspace and kinetostatic performances of a 4-DOF delta parallel robot." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 41, no. 2 (2019): 99.
- 16-Elkady, Ayssam Yehia, Mohammed Mohammed, and Tarek Sobh. "A new algorithm for measuring and optimizing the manipulability index." *Journal of Intelligent and Robotic systems* 59, no. 1 (2010): 75-86.
- 17-Stan, Sergiu-Dan, Milos Manic, Cristian Szep, and Radu Balan. "Performance analysis of 3 DOF Delta parallel robot." In *2011 4th International Conference on Human System Interactions, HSI 2011*, pp. 215-220. IEEE, 2011.
- 18-Aboulissane, Badreddine, Dikra El Haiek, and Larbi El Bakkali. "3-UPU robotic mechanism performance evaluation through kinematic indexes." *Procedia Manufacturing* 22 (2018): 468-475
- 19-Cui, Guohua, Muyuan Sun, Weijian Meng, Haiqiang Zhang, and Chuanrong Sun. "The research of kinematic performances of 3-UPU-UPU parallel mechanism for automobile assembly line." In *2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pp. 2514-2520. IEEE, 2015.
- 20-Gosselin, Clement, and Jorge Angeles. "A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators." (1991): 220-226.