Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(4) (2021) 491-494
DOI: 10.22060/mej.2020.17759.6661

Kinematic and dynamic performance evaluation of a four degrees of freedom parallel robot

P. Ghaf-Ghanbari, M. Taghizadeh* , M. Mazare

School of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT: In this paper, the performance four-degree-of-freedom parallel manipulator with Schönflies motion is evaluated from kinematic and dynamic points of view. Its low inertia makes it a suitable choice for pick-and-place applications, which demand high velocity and acceleration. So, the dynamic characteristics of the robot are of high importance. Moreover, parallel robots suffer from a small workspace, on which their singularities put additional constrain. Hence, this paper studies the kinematic and dynamic behavior of the robot in-depth to give a clear perspective to path planning and its applications. To perform kinematic analysis, constraint equations are derived based on the geometric method, and then Jacobian matrices are determined via velocity analysis. By considering the constraint equations and joint limits, reachable workspace is determined, applying point-to-point search algorithm and singularities are identified by the inverse and direct Jacobian matrices. For dynamic modeling, Euler-Lagrange formulation is applied and both kinematic and dynamic models are verified by the results obtained from mechanism simulation in ADAMS software. Furthermore, for evaluation of the robot performance, pressure angles are employed to show the equality of motion/force transmission, and dynamic indices based on joint space inertia matrix are applied to illustrate its dynamic behavior.

Review History:

Received: Jan. 19, 2020
Revised: Mar. 14, 2020-03-14
Accepted: May, 03, 2020
Available Online: May, 16, 2020

Keywords:

four-degree-of-freedom parallel robot
Schönflies motion
Kinematics
Dynamics
Performance Evaluation

1- Introduction

Parallel Kinematic Manipulators (PKM) are closed-loop kinematic chain mechanisms comprising of several independent serial chins, connecting the end-effector to the base. This constrained structure gives them capabilities like high accuracy, velocity, stiffness, payload capacity, and great dynamic performance, and makes them an excellent choice for Pick-and-place (PnP) applications. Thanks to their light-weight and low-inertia structure, delta type Schönflies motion (3T1R) PKMs are extensively employed for PnP applications. Aside from all positive points, PKMs suffer from some drawbacks such as small workspace and singular configurations. These limitations together with the demanding tasks for which they are planned have been the motivation behind numerous researches on performance evaluation criteria [1-4].

2- Methodology

The PKM under study is a modification on the redundantly actuated Veloce [5], which is composed of four identical R-(SS)2 arms, connecting the base to the end-effector. As shown in Fig. 1, by shifting the connection of two opposite arms to the end-effector along with opposite directions and adding a couple of revolute joints, the mechanism will be able to generate Schönflies motion, with rotation around the horizontal axis [6].

The structure of one arm of the manipulator is illustrated in Fig. 2. The loop-closure equation for the ith arm is written as

$$\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\mathbf{w}}_i = l_1 \hat{\mathbf{e}}_i + l_2 \hat{\mathbf{u}}_i + l_3 \hat{\mathbf{v}}_i \tag{1}$$

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \sec\beta_i & i=1,4 \\ -\sec\beta_i & i=2,3 \end{cases} \tag{2}$$

where, $\mathbf{r}_P = \begin{bmatrix} x_p & y_p & z_p \end{bmatrix}^T$.

Squaring both sides of Eq. (1) and simplifying the result yields the inverse kinematic equation as

$$\begin{gathered} \theta_i = 2\arctan\left(\frac{-C_{i1} \pm \sqrt{C_{i1}^2 - \left(C_{i3}^2 - C_{i2}^2\right)}}{C_{i3} - C_{i2}} \right) \\ C_{i1} = 2l_2\left(\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\mathbf{w}}_i - \mathbf{r}_{Ai}\right) \cdot \hat{\xi}_3 \\ C_{i2} = -2l_2\left(\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\mathbf{w}}_i - \mathbf{r}_{Ai}\right) \cdot \left\{\hat{\xi}_1 c\alpha_i + \hat{\xi}_2 s\alpha_i\right\} \\ C_{i3} = \left(\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\mathbf{w}}_i - \mathbf{r}_{Ai}\right)^2 + l_2^2 - l_3^2 \\ \hat{\xi}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,\ \hat{\xi}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T,\ \hat{\xi}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \end{gathered} \tag{3}$$

*Corresponding author's email: mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

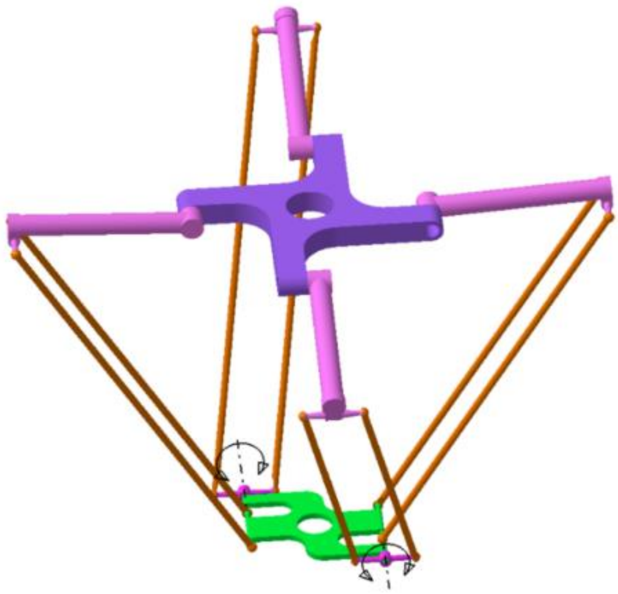


Fig. 1. CAD model of the Schönflies PKM

For velocity analysis, Eq. (1) is differentiated with respect to time, which gives the Jacobian matrix, mapping the joints' velocity to the velocity of the end-effector.

$$\boldsymbol{J}_{\theta}\dot{\boldsymbol{\Theta}} = \boldsymbol{J}_X \dot{\boldsymbol{\mathcal{X}}}$$

$$J_{\theta i}=l_2(\hat{\boldsymbol{n}}_i \times \hat{\boldsymbol{u}}_i).\hat{\boldsymbol{v}}_i, \qquad \boldsymbol{J}_{\theta}=\mathrm{diag}\begin{bmatrix} J_{\theta 1} & J_{\theta 2} & J_{\theta 3} & J_{\theta 4}\end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{J}_{Xi}=\begin{bmatrix}\hat{\boldsymbol{v}}_i^T & \left(\hat{\xi}_2 \times \mathbf{r}_{PCi}^{O}\right).\hat{\boldsymbol{v}}_i\end{bmatrix}, \ \boldsymbol{J}_X=\begin{bmatrix}\boldsymbol{J}_{X1}^T & \boldsymbol{J}_{X2}^T & \boldsymbol{J}_{X3}^T & \boldsymbol{J}_{X4}^T\end{bmatrix}^T \tag{4}$$

Applying Euler-Lagrange formulation, the dynamic model is obtained as,

$$\boldsymbol{\tau}=\boldsymbol{\mathcal{M}}\ddot{\boldsymbol{\mathcal{X}}}+\boldsymbol{\mathcal{C}}\dot{\boldsymbol{\mathcal{X}}}+\boldsymbol{\mathcal{G}}+\boldsymbol{\mathcal{F}}$$
$$\boldsymbol{\mathcal{M}}=\boldsymbol{M}_a\boldsymbol{J}+\boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{M}_P \quad , \quad \boldsymbol{\mathcal{C}}=\boldsymbol{M}_a\dot{\boldsymbol{J}} \tag{5}$$
$$\boldsymbol{\mathcal{G}}=\boldsymbol{G}_a+\boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{G}_P \quad , \quad \boldsymbol{\mathcal{F}}=-\boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{F}$$

where,

$$\boldsymbol{M}_a=\frac{1}{6}l_2^2(2m_U+3m_L)\boldsymbol{I}_{4\times 4}, \qquad \boldsymbol{G}_a=-\frac{1}{2}l_2(m_U+m_L)\mathrm{g}\cos\boldsymbol{\Theta}$$
$$\boldsymbol{M}_P=\begin{bmatrix}(m_e+2m_L)\boldsymbol{I}_{3\times 3} & \boldsymbol{0}_{3\times 1}\\ \boldsymbol{0}_{1\times 3} & I_{P_{yy}}^{P}+2m_L l_4^2\end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{G}_P=-(m_e+2m_L)\begin{bmatrix}\mathbf{g}^T & 0\end{bmatrix}^T, \qquad \boldsymbol{J}=\boldsymbol{J}_{\theta}^{-1}\boldsymbol{J}_X$$

3- Performance Evaluation

To describe the motion/force transmission ability of a parallel mechanism, two distinct pressure angles are defined.

$$\mu_i=\cos^{-1}\hat{\boldsymbol{v}}_i^T(\hat{\boldsymbol{n}}_i \times \hat{\boldsymbol{u}}_i) \tag{6}$$

$$\vartheta=\cos^{-1}\frac{(\hat{\mathbf{v}}_{14}\times\hat{\mathbf{v}}_{23})^T\hat{\mathbf{s}}}{\hat{\mathbf{v}}_{14}\times\hat{\mathbf{v}}_{23}} \tag{7}$$

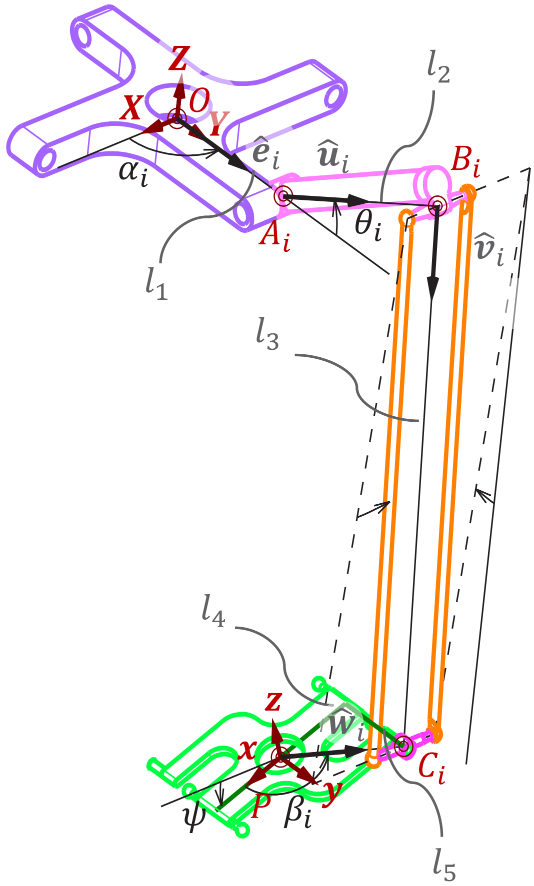


Fig. 2. Coordinate frames and variables of the arm

where μ_i shows the motion/force transmitted from the active joint of the i-th arm to the end-effector, and ϑ indicates the force transmitted from the end-effector to the passive joints of the other arms when their active joints are locked. The local transmission index for kinematic evaluation of the mechanism is defined as,

$$\mathrm{LTI}=\min\{|\cos\mu_i|,|\cos\vartheta|\} \tag{8}$$

PnP applications require high acceleration devices, and this makes the inertia forces of the robot a decisive factor. Thus, the mean value of the principal elements of the joint space inertia matrix is defined as Joint-Reflected Inertia (JIR) and represents the overall inertial level of the parallel manipulator for inertia matching [7]. The Coefficient of Variation of joint-space Inertia (CVI) index is another dynamic index, showing the imbalance of inertia property among arms, and is defined [8],

$$\mathrm{CVI}=\frac{1}{I_{\mathrm{ave}}}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(I_{ii}-I_{\mathrm{ave}})^2} \tag{9}$$

4- Simulation Results

Three performance indices for a section cut crossing the workspace at z=-700 mm are shown in Figs. 3 to 5. As depicted in Fig. 3, the PKM demonstrates poor performance when ψ=0°, however as this angle increases to -45°, this index increases to

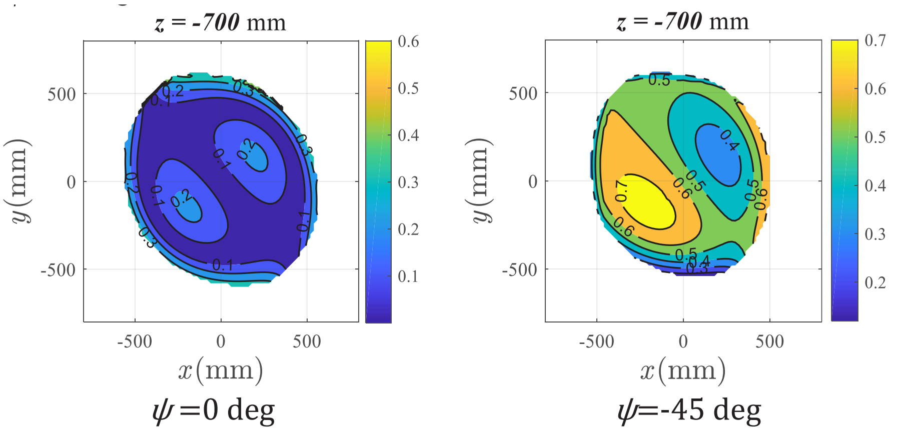


Fig. 3. LTI at *z*=-700 mm

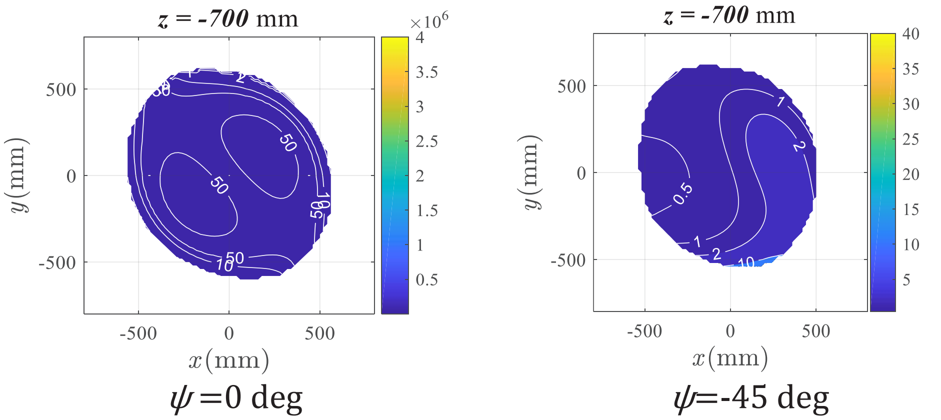


Fig. 4. JRI at *z*=-700 mm

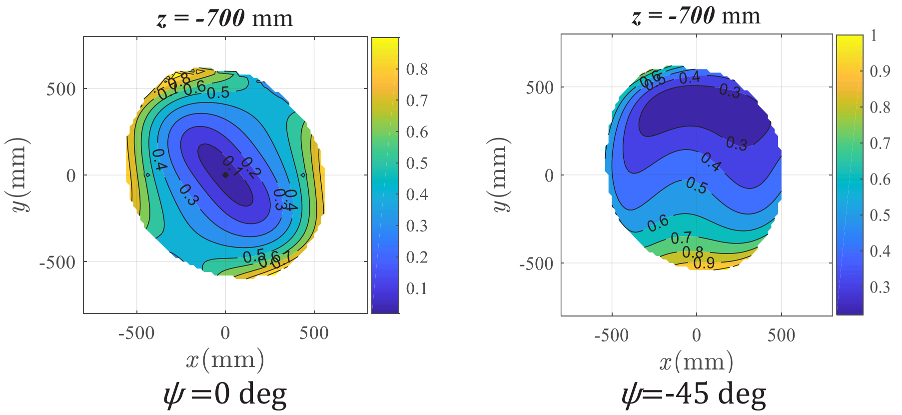


Fig. 5. CVI at *z*=-700 mm

higher values. JRI distribution illustrated in Fig. 4 reveals that when ψ =-45° this index is less than 10 for central area, while for horizontal configuration this index increases considerably.

According to Fig. 5, for ψ =-45° the distribution of CVI over the section is more uniform. For ψ =0° the central area offers better performance.

5- Conclusion

This paper addressed the performance evaluation of a Schönflies robot. It was shown that this robot demonstrates poor performance in the horizontal configuration of the end-effector, while for other configurations, the performance improves.

References

[1] P. C. Lee, J. J. Lee, On the kinematics of a new parallel mechanism with Schoenflies motion, Robotica, 34(9) (2016) 2056–2070.

[2] M. Mazare, M. Taghizadeh, m. R. Najafi, Kinematic analysis and design of a novel 3-DOF translational parallel robot, International Journal of Automation and Computing, 14(4) (2016) 432–441.

[3] S. Liu, T. Huang, J. Mei, X. Zhao, P. Wang, Optimal Design of a 4-DOF SCARA Type Parallel Robot Using Dynamic Performance Indices and Angular Constraints, ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 4(3)(2012) 031005-031005-10.

[4] H. Shao, L. Wang, L. Guan, J. Wu, Dynamic manipulability and optimization of a redundant three DOF planar parallel manipulator, in: 2009 ASME/IFToMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, London, 2009.

[5] "Penta Veloce," [Online]. Available: https://pentarobotics.com/products/#brochure.

[6] G. Wu, Kinematic Analysis and Optimal Design of a Wall-mounted Four-limb Parallel Schönflies-motion Robot for Pick-and-place Operations, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 85(3-4) (2016) 663–677.

[7] Z. F. Shao, X. Tang, X. Chen, L. P. Wang, Research on the inertia matching of the Stewart parallel manipulator, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 28 (2012) 649–659.

[8] J. Mo, Z. F. Shao, L. Guan, F. Xie, X. Tang, Dynamic performance analysis of the X4 high-speed pick-and-place parallel robot, Robotics and Computer–Integrated Manufacturing, 46(2017) 48-57.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

P. Ghaf-Ghanbari, M. Taghizadeh, M. Mazare, Kinematic and dynamic performance evaluation of a four degrees of freedom parallel robot, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(4) (2021) 491-494

DOI: 10.22060/mej.2020.17759.6661

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۴، سال ۱۴۰۰، صفحات ۲۰۵۵ تا ۲۰۷۲
DOI: 10.22060/mej.2020.17759.6661

ارزیابی عملکرد سینماتیکی و دینامیکی یک ربات موازی چهار درجه آزادی

پگاه ق- قنبری، مصطفی تقی‌زاده*، محمود مزارع

مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

خلاصه: در این مقاله عملکرد یک ربات موازی چهار درجه آزادی با حرکت شون‌فلیس بررسی شده است. اینرسی پایین این ربات، مزیتی برای کاربری جابجایی اشیاء سبک است. این کاربرد، عموماً سرعت و شتاب بالایی نیاز دارد؛ لذا عملکرد دینامیکی ربات از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرفی در ربات‌های موازی، فضای کار محدود بوده و تکینگی‌های درون آن، فضای کاری را محدودتر نیز می‌کنند. از این‌رو با تمرکز بر دو حوزه سینماتیک و دینامیک، رفتار عملکردی ربات در فضای کار مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور انجام تحلیل سینماتیک، با استفاده از روش هندسی، معادلات قید استخراج و سپس با تحلیل سرعت، ماتریس‌های ژاکوبین تعیین شده‌اند. فضای کار ربات با لحاظ‌نمودن معادلات قید و محدودیت مفاصل به صورت جستجوی نقطه به نقطه فضا، به‌دست آمده و با مطالعه ماتریس‌های ژاکوبین معکوس و مستقیم، وضعیت و نوع تکینگی‌ها درون فضای کار تعیین شده است. در ادامه، معادلات دینامیکی حاکم بر ربات به روش اویلر- لاگرانژ استخراج، و نتایج حل مسائل سینماتیک و دینامیک با خروجی شبیه‌سازی مکانیزم در نرم‌افزار ادمز اعتبارسنجی شده است. علاوه بر این به منظور ارزیابی عملکرد ربات، زوایای فشار برای نشان‌دادن کیفیت انتقال حرکت/نیرو و شاخص‌های مبتنی بر ماتریس اینرسی برای به‌تصویرکشیدن رفتار دینامیکی به‌کارگرفته شده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۹
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۲/۲۷

کلمات کلیدی:
ربات موازی چهار درجه آزادی
حرکت شون‌فلیس
سینماتیک
دینامیک
ارزیابی عملکرد

۱- مقدمه

ربات‌های موازی به دلیل دارا بودن مزایایی از جمله، دقت، سرعت، سختی و ظرفیت بالای حمل بار در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. هر چند در ابتدا محققان بیشتر بر ربات‌های ۶ درجه آزادی تمرکز داشتند، در سال‌های اخیر مطالعات عمدتاً بر ربات‌های با درجات آزادی کمتر متمرکز شده‌اند. دلیل این محبوبیت از محاسبات ساده‌تر و هزینه پایین ساخت این ربات‌ها نشأت می‌گیرد. از طرفی، برای کاربردهای مختلف در رباتیک همیشه به شش درجه آزادی نیازی نیست. ربات‌های چهار درجه آزادی پر سرعت، پتانسیل خوبی برای استفاده در صنایع بسته‌بندی دارند؛ زیرا در عین سادگی و سبکی دارای سختی بالایی هستند و می‌توانند حرکتی پرسرعت ایجاد کنند.

حرکت مطلوب در این حوزه سه درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی دورانی[1] است، که اصطلاحاً شون‌فلیس یا اسکارا نامیده می‌شود. از کاربردهای خاص این حوزه می‌توان به نصب یا قراردادن قطعات روی تسمه متحرک خط تولید، بازرسی و کنترل کیفیت، بسته‌بندی قطعات، و جداسازی و مرتب‌سازی آن‌ها را نام برد [۱].

تاکنون ربات‌های مختلفی برای ایجاد حرکت شون‌فلیس پیشنهاد شده‌اند. پیِرو و همکاران [۲] یک ربات موازی چهار درجه آزادی به نام اچ ۴ [2] را بر پایه ربات دلتا پیشنهاد دادند که دارای صفحه متحرک مفصلی بود و ایده‌ای نو در سنتز توپولوژی ربات‌های موازی معرفی کرد. از دیگر کارهای این محققان [۳] بررسی سینماتیک و دینامیک

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mo_taghizadeh@sbu.ac.ir

1 3 Translational, 1 rotational (3T1R)
2 H4

یک ربات موازی شون‌فلیس موسوم به پارت ۴ و بهینه‌سازی آن برای کاربردهای بسته‌بندی بود. ریچارد و همکاران [۴] و همچنین کونگ و گوسلین [۵] مکانیزمی چهار درجه آزادی با حرکت شون‌فلیس به نام ربات کوادروپترون پیشنهاد دادند که هر بازوی آن دارای مفاصل لولا، کشویی و استوانه‌ای می‌باشد. کواترو، رباتی است که توسط شرکت تکنولوژی آدپت به تولید صنعتی رسید، و با شتاب بالغ بر پانزده برابر شتاب گرانش تحت بار دو کیلوگرم سریع‌ترین ربات موازی حال حاضر به شمار می‌رود.

در کنار مزایای قابل‌توجه، ربات‌های موازی دارای معایبی از جمله فضای کار کوچک و ترکیب‌بندی‌های تکین می‌باشند که لازم است در فرآیند طراحی مدنظر قرار گرفته و از عملکرد مطلوب ربات برای کاربرد مدنظر اطمینان حاصل شود. بر این اساس، ارزیابی عملکرد ربات‌های موازی به صورت گسترده مورد توجه محققین قرار گرفته است. لی [۶]، مزارع [۷] و همچنین برینکر [۸] ربات موازی را از دیدگاه سینماتیک مورد بررسی قرار دادند. شائو [۹] و لیو [۱۰] نیز عملکرد دینامیکی ربات موازی را مطالعه کردند.

معیارهای مختلفی برای ارزیابی عملکرد ربات‌های موازی پیشنهاد شده است. گوسلین و آنجلیز [۱۱] عکس عدد وضعیت را تحت عنوان شاخص وضعیت محلی[1] برای ارزیابی مهارت، دقت کنترل، ایزوتروپی و همینطور برای تعیین نزدیکی موقعیت مکانیزم به وضعیت تکین پیشنهاد دادند. آن‌ها این شاخص را به کل فضای کار تعمیم داده و شاخص وضعیت عمومی[2] را معرفی کردند [۱۲]. برای برخی کاربردها نیز دقت [۱۳] و سختی [۱۴] به عنوان شاخص در نظر گرفته شده است. استاک و میلر [۱۵] از شاخص توانایی تردستی برای بهینه‌سازی سینماتیکی پارامترهای هندسی ربات دلتا استفاده کردند. چویی و همکاران [۱۶] عملکرد سینماتیکی ربات اچ ۴را با استفاده از بیضی‌گون چالاکی ارزیابی کردند. یوآن و همکاران [۱۷]، با به‌کارگیری ضریب مجازی، شاخص‌های انتقالی را برای مکانیزم‌های فضایی پیشنهاد دادند. تاکدا و فوناباشی [۱۸] شاخص انتقالی برای مکانیزم‌های موازی ارائه داده و توان مجازی انتقالی از لینک‌های ورودی به لینک خروجی را لحاظ کردند. با ثابت نگه‌داشتن همه لینک‌های ورودی به جز یک لینک، مکانیزمی با یک درجه آزادی حاصل می‌شود و زوایای انتقال در اتصال بین لینک ورودی آزاد و لینک خروجی تحلیل می‌شود. وانگ و همکاران [۱۹]، با تلفیق مفهوم ضریب مجازی و رویکرد تاکدا مبنی بر ثابت نگه‌داشتن همه ورودی‌ها به استثنای یک مورد، روندی کلی برای مکانیزم‌های موازی فضایی پیشنهاد دادند. دو شاخص پیشنهادشده توسط این محققان عبارتند از شاخص انتقال ورودی[3] و شاخص انتقال خروجی[4]. حداقل مقدار این دو شاخص به عنوان شاخص انتقال محلی درنظر گرفته شده است. وو [۲۰] از این شاخص برای ارزیابی عملکرد و بهینه‌سازی یک ربات موازی چهار درجه آزادی دیواری استفاده کرد.

از شاخص‌های دینامیکی اصلی ارزیابی عملکرد ربات می‌توان مهارت، توانایی تردستی و ایزوتروپی دینامیکی را نام برد که بر مبنای مشخصه‌های جبری ماتریس اینرسی محاسبه می‌شوند. لیو و همکاران [۱۰] دو شاخص ارزیابی عملکرد دینامیکی بر مبنای ماتریس‌های اینرسی و کریولیس پیشنهاد دادند. مو و همکاران [۲۱] با اشاره به این نکته که ماتریس اینرسی فضای کار ربات‌های چهار درجه آزادی از لحاظ بعد سازگار نیست، دینامیک ربات ایکس ۴[5] پرسرعت را با استفاده از شاخص تصویر اینرسی در فضای مفصل[6] و شاخص ضریب تغییرات اینرسی فضای مفصل[7] برای به‌تصویرکشیدن یکنواختی شتاب هر عضو ربات تحلیل کردند.

در این مقاله، به مطالعه رفتار سینماتیکی و دینامیکی یک نوع ربات موازی چهار درجه آزادی با حرکت شون‌فلیس پرداخته شده است. این ربات که با اعمال تغییراتی در ساختار ربات سه درجه آزادی افزونه ولوچ [۲۲] ایجاد شده است، امکان دوران مجری نهایی حول محور افقی را فراهم می‌آورد. با توجه به این‌که در غالب ربات‌های چهار درجه آزادی موجود، دوران مجری نهایی حول محور قائم صورت می‌گیرد، این ربات می‌تواند جبرانی برای خلأ موجود باشد. در ابتدا، معادلات قیود سینماتیکی ربات بر مبنای روش برداری استخراج شده، و سپس با تحلیل سرعت، ماتریس‌های ژاکوبین تعیین شده‌اند. با درنظرگرفتن محدودیت مفاصل، فضای کاری ربات به صورت عددی تعیین و با استفاده از ماتریس‌های ژاکوبین، تکینگی‌های مکانیزم درون این فضا بررسی شده است. در ادامه، با استفاده از روش اویلر–لاگرانژ مدل دینامیکی ربات استخراج، و به منظور اعتبارسنجی

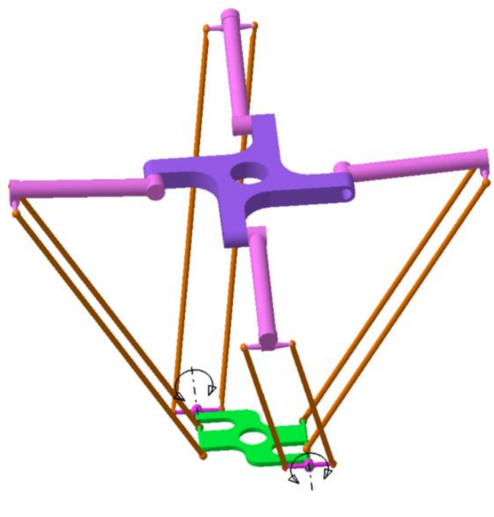
1 Local Conditioning Index (LCI)
2 Global Conditioning Index (GCI)
3 Input Transmission Index (ITI)
4 Output Transmission Index (OTI)
5 X4
6 Joint-Reflected Inertia (JIR)
7 Coefficient of variation of joint-space Inertia (CVI)

معادلات سینماتیک و دینامیک استخراجی، ربات در محیط نرم‌افزار ادمز مدل شده و نتایج حاصل از حل عددی مسائل سینماتیک و دینامیک با خروجی شبیه‌سازی مکانیزم در نرم‌افزار ادمز مقایسه شده است. در گام آخر، زوایای فشار برای نشان‌دادن کیفیت انتقال حرکت/ نیرو و شاخص‌های مبتنی بر ماتریس اینرسی در راستای ارزیابی رفتار دینامیکی ربات به‌کار گرفته شده است.

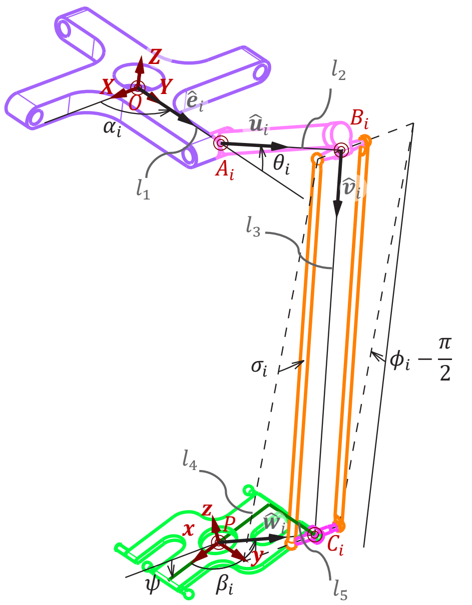
نوآوری‌های مقاله را می‌توان به شرح زیر برشمرد:

- استخراج معادلات سینماتیک و دینامیک مکانیزم موازی مورد مطالعه و صحت‌سنجی آن‌ها با نرم افزار ادمز
- استخراج فضای کار مکانیزم با توجه به قیود و محدودیت‌های حاکم
- شناسایی و تحلیل تکینگی‌های مکانیزم به تفکیک نوع آنها
- ارزیابی عملکرد ربات از دو دیدگاه سینماتیک و دینامیک با تمرکز بر شاخص‌های مرتبط با نوع و کاربرد مکانیزم

ساختار مقاله بدین‌صورت است: در بخش ۲ که به تحلیل سینماتیک اختصاص دارد، ابتدا مکانیزم ربات و پارامترهای آن معرفی شده و معادلات قید به روش هندسی استخراج می‌شوند. سپس با تحلیل سرعت، ماتریس ژاکوبین به‌دست می‌آید. فضای کاری ربات به روش عددی، با اعمال قیود و محدودیت اعضا تعیین شده و وضعیت تکینگی‌های درون آن مطالعه می‌گردد. در بخش ۳ معادلات دینامیک حاکم بر ربات به روش اویلر- لاگرانژ استخراج می‌گردد. بخش ۴ به معرفی شاخص‌های ارزیابی عملکرد سینماتیک و دینامیک می‌پردازد.



شکل ۱. مدل سه بعدی ربات با حرکت شون‌فلیس
Fig. 1. 3D model of the Schönflies motion robot



شکل ۲. پارامترهای ابعادی ربات
Fig. 2. Robot dimensional parameters

برای اعتبارسنجی مدل سینماتیک و دینامیک محاسباتی، مکانیزم در نرم‌افزار ادمز شبیه‌سازی شده است. در بخش ۵ ابتدا نتایج مدل سینماتیک و دینامیک محاسباتی با خروجی شبیه‌سازی مقایسه شده، وضعیت تکینگی‌ها درون آن شرح داده می‌شود. نهایتاً نتایج ارزیابی بر اساس شاخص‌های عمکردی ارائه می‌شود. مقاله در بخش ۶ با نتیجه‌گیری مطالعات به پایان می‌رسد.

۲- سینماتیک

ربات موازی این تحقیق با اعمال تغییراتی در ساختار ربات موازی سه درجه آزادی وِلوچ [۲۲] ایجاد شده است. ربات ولوچ در زمره ربات‌های عملگر- افزونه قرار می‌گیرد؛ چرا که با استفاده از چهار عملگر، سه درجه آزادی انتقالی را فراهم می‌کند. چهار بازوی این ربات مشابه بوده و از یک لینک و یک سازه متوازی‌الاضلاع تشکیل شده‌اند که با مفاصل لولا و کروی به هم متصل می‌گردند. بازوها با تقارنی مرکزی در اطراف پایه قرار گرفته و آن را به مجری نهایی متصل می‌کنند. با تغییر موقعیت اتصال دو متوازی‌الاضلاع متقابل در سمت مجری نهایی و افزودن دو لولای اضافی مطابق شکل ۱، ربات قادر به ایجاد حرکت شون‌فلیس شده و می‌تواند مجری نهایی را حول محور افقی حرکت دهد.

ساختار یک بازوی ربات در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشهود است، دو دستگاه مختصات تعریف می‌گردد که دستگاه مختصات مرجع روی مرکز هندسی پلتفرم ثابت و دستگاه مختصات متحرک روی مرکز هندسی مجری نهایی قرار دارد. رابطه زنجیره برداری نقطه اتصال بازو به مجری نهایی به‌صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود.

$$\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\boldsymbol{w}}_i = l_1 \hat{\boldsymbol{e}}_i + l_2 \hat{\boldsymbol{u}}_i + l_3 \hat{\boldsymbol{v}}_i \tag{۱}$$

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \sec\beta_i & i = 1, 4 \\ -\sec\beta_i & i = 2, 3 \end{cases} \tag{۲}$$

در آن، $\mathbf{r}_P = \begin{bmatrix} x_p & y_p & z_p \end{bmatrix}^T$ بردار موقعیت مجری نهایی است.

مطابق شکل ۲ بردارهای یکه به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\hat{\boldsymbol{e}}_i = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i & \sin\alpha_i & 0 \end{bmatrix}^T \tag{۳}$$

$$\hat{\boldsymbol{u}}_i = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i \cos\theta_i & \sin\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\theta_i \end{bmatrix}^T \tag{۴}$$

$$\hat{\boldsymbol{w}}_i = \begin{bmatrix} \cos\beta_i \cos\psi & \sin\beta_i & -\cos\beta_i \sin\psi \end{bmatrix}^T \tag{۵}$$

معادله (۱) به‌گونه‌ای مرتب می‌شود که بردار متناظر با لینک متوازی‌الاضلاع در یک سمت و سایر جملات در سمت دیگر قرار گیرند.

$$\left(\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\boldsymbol{w}}_i - \mathbf{r}_{Ai}\right) - l_2 \hat{\boldsymbol{u}}_i = l_3 \hat{\boldsymbol{v}}_i \tag{۶}$$

اندازه بردارهای دو سمت رابطه فوق برابر است. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\begin{gathered} \left(\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\boldsymbol{w}}_i - \mathbf{r}_{Ai}\right)^2 + l_2^2 \\ -2l_2\left(\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\boldsymbol{w}}_i - \mathbf{r}_{Ai}\right).\hat{\boldsymbol{u}}_i = l_3^2 \end{gathered} \tag{۷}$$

اگر به جای بردار یکه لینک فوقانی معادل آن از رابطه (۴) در معادله (۷) جایگذاری شود، معادله قید حاصل می‌گردد.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{f}(\boldsymbol{\Theta}, \boldsymbol{\mathcal{X}}) = &\left(\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\boldsymbol{w}}_i - \mathbf{r}_{Ai}\right)^2 + l_2^2 \\ &-2l_2\left(\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\boldsymbol{w}}_i - \mathbf{r}_{Ai}\right)^T \hat{\boldsymbol{\xi}}_1 c\alpha_i\, c\theta_i \\ &-2l_2\left(\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\boldsymbol{w}}_i - \mathbf{r}_{Ai}\right)^T \hat{\boldsymbol{\xi}}_2 s\alpha_i\, c\theta_i \\ &+2l_2\left(\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\boldsymbol{w}}_i - \mathbf{r}_{Ai}\right)^T \hat{\boldsymbol{\xi}}_3 s\theta_i - l_3^2 \end{aligned} \tag{۸}$$

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{\xi}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad \boldsymbol{\xi}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \\ &\boldsymbol{\xi}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T, \quad \boldsymbol{\mathcal{X}} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_P^T & \psi \end{bmatrix}^T \\ &\boldsymbol{\Theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \tag{۹}$$

فرم بسته معادلات سینماتیک معکوس، با نوشتن جملات مثلثاتی برحسب تانژانت نصف کمان به‌صورت معادله درجه ۲ حاصل می‌شود.

$$\left(C_{i3} - C_{i2}\right)k_i^2 + 2C_{i1}k_i + \left(C_{i3} + C_{i2}\right) = 0 \tag{۱۰}$$

$$k_i = \tan\left(\theta_i / 2\right) \tag{۱۱}$$

$$C_{i1} = 2l_2\left(\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\boldsymbol{w}}_i - \mathbf{r}_{Ai}\right)^T \cdot \hat{\boldsymbol{\xi}}_3 \tag{۱۲}$$

$$C_{i2} = -2l_2\left(\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\boldsymbol{w}}_i - \mathbf{r}_{Ai}\right)^T \cdot \left\{\hat{\boldsymbol{\xi}}_1 c\alpha_i + \hat{\boldsymbol{\xi}}_2 s\alpha_i\right\} \tag{۱۳}$$

$$C_{i3} = \left(\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\boldsymbol{w}}_i - \mathbf{r}_{Ai}\right)^T + l_2^2 - l_3^2 \tag{۱۴}$$

معادله سینماتیک معکوس ربات به صورت رابطه (۱۵) به‌دست می‌آید.

$$\theta_i = 2\arctan\left(\frac{-C_{i1} \pm \sqrt{C_{i1}^2 - \left(C_{i3}^2 - C_{i2}^2\right)}}{C_{i3} - C_{i2}}\right) \tag{۱۵}$$

در ربات مورد مطالعه علامت تفریق در صورت کسر پاسخ مسأله است. بردار یکه لینک متوازی‌الاضلاع را می‌توان با استفاده از ماتریس‌های دوران به‌صورت زیر نوشت.

$$\hat{\boldsymbol{v}}_i = \begin{bmatrix} c\alpha_i c\phi_i c\sigma_i - s\alpha_i s\sigma_i \\ s\alpha_i c\phi_i c\sigma_i + c\alpha_i s\sigma_i \\ -s\phi_i c\sigma_i \end{bmatrix} \tag{۱۶}$$

از طرفی، از رابطه برداری هر بازو، این بردار یکه به صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$\hat{\boldsymbol{v}}_i = \left(\mathbf{r}_P + \varepsilon_i l_4 \hat{\boldsymbol{w}}_i - \mathbf{r}_{Ai} - l_2 \hat{\boldsymbol{u}}_i\right) / l_2 \tag{۱۷}$$

از برابر قراردادن دو رابطه فوق، زوایای دوران لینک متوازی‌الاضلاع به‌صورت روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه می‌شوند.

$$\sigma_i = \arcsin\left(-v_{ix} \sin\alpha_i + v_{iy} \cos\alpha_i\right) \tag{۱۸}$$

$$\phi_i = \arccos\left(\left(v_{ix} \cos\alpha_i + v_{iy} \sin\alpha_i\right) / \cos\sigma_i\right) \tag{۱۹}$$

۲-۱- تحلیل سرعت

در این بخش ارتباط بین سرعت مفاصل فعال و سرعت مجری نهایی بررسی می‌شود. در این راستا، ماتریس ژاکوبین که مبین این ارتباط بوده و از عناصر اساسی تحلیل ربات‌های موازی به شمار می‌رود، استخراج می‌گردد. برای استخراج معادلات سرعت، از رابطه (۱) بر حسب زمان مشتق گرفته می‌شود.

$$\dot{\mathbf{r}}_P = l_2\left(\boldsymbol{\omega}_{Ui}\times\hat{\boldsymbol{u}}_i\right) + l_3\left(\boldsymbol{\omega}_{Li}\times\hat{\mathbf{v}}_i\right) - \dot{\boldsymbol{\psi}}\times\mathbf{r}_{PCi}^{O}$$
$$\dot{\boldsymbol{\psi}} = \begin{bmatrix}0 & \dot{\psi} & 0\end{bmatrix}^T = \dot{\psi}\xi_2 \qquad (۲۰)$$

سرعت زاویه‌ای لینک فوقانی به صورت ضرب اندازه آن در بردار یکه مربوطه تعریف می‌شود.

$$\boldsymbol{\omega}_{Ui} = \dot{\theta}_i\hat{\boldsymbol{n}}_i, \qquad \hat{\boldsymbol{n}}_i = \begin{bmatrix}-\sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0\end{bmatrix}^T \qquad (۲۱)$$

برای حذف جمله مربوط به لینک پایینی، طرفین رابطه (۲۰) در بردار یکه لینک متوازی‌الاضلاع ضرب داخلی می‌شود.

$$\dot{\mathbf{r}}_P\cdot\hat{\boldsymbol{v}}_i = l_2\dot{\theta}_i\left(\hat{\boldsymbol{n}}_i\times\hat{\boldsymbol{u}}_i\right)\cdot\hat{\boldsymbol{v}}_i - \dot{\psi}\left(\hat{\boldsymbol{\xi}}_2\times\mathbf{r}_{PCi}^{O}\right)\cdot\hat{\boldsymbol{v}}_i \qquad (۲۲)$$

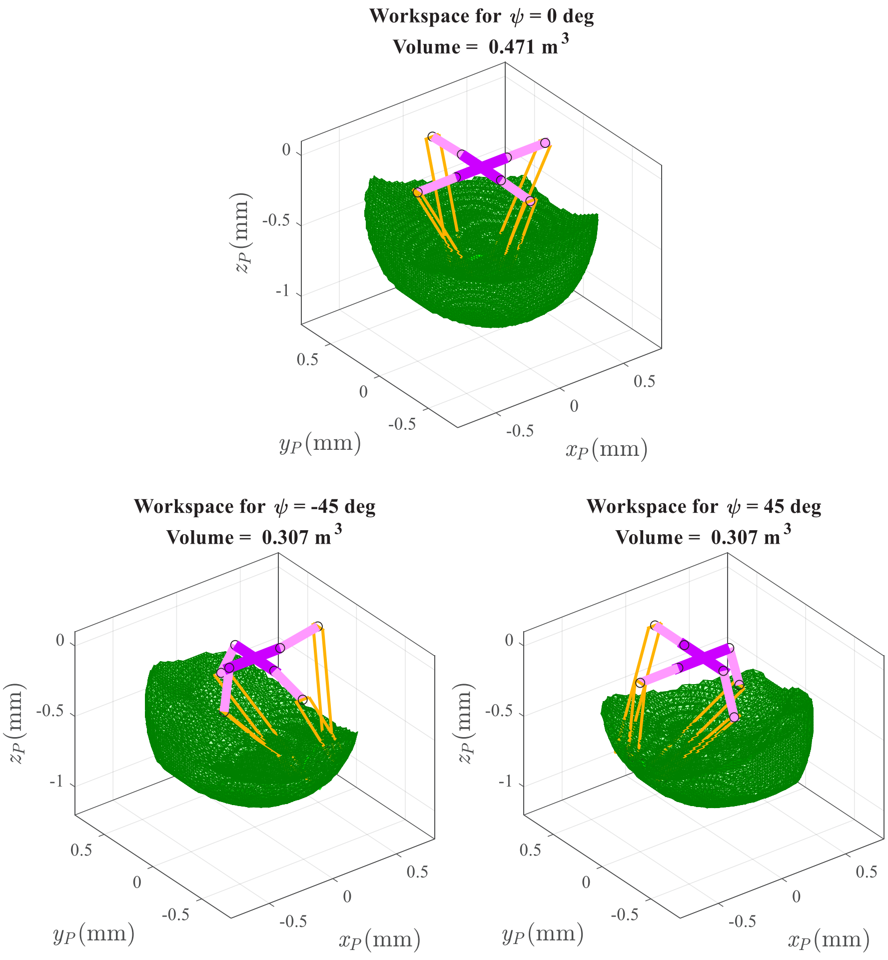
با نوشتن رابطه (۲۱) به‌صورت ماتریسی، ارتباط سرعت متغیرهای مفصلی و سرعت مجری نهایی به‌دست‌می‌آید.

$$\boldsymbol{J}_\theta\dot{\boldsymbol{\Theta}} = \boldsymbol{J}_X\dot{\boldsymbol{\mathcal{X}}} \qquad (۲۳)$$

$$J_{\theta i} = l_2\left(\hat{\boldsymbol{n}}_i\times\hat{\boldsymbol{u}}_i\right).\hat{\boldsymbol{v}}_i \qquad (۲۴)$$

$$J_{Xi} = \begin{bmatrix}\hat{\boldsymbol{v}}_i^T & \left(\hat{\boldsymbol{\xi}}_2\times\mathbf{r}_{PCi}^{O}\right)\cdot\hat{\boldsymbol{v}}_i\end{bmatrix} \qquad (۲۵)$$

$$\boldsymbol{J}_\theta = \mathrm{diag}\begin{bmatrix}J_{\theta 1} & J_{\theta 2} & J_{\theta 3} & J_{\theta 4}\end{bmatrix} \qquad (۲۶)$$



شکل ۳. فضای کاری دوران ثابت ربات

Fig. 3. Constant orientation workspace

$$\boldsymbol{J}_X = \left[\boldsymbol{J}_{X1}^T \quad \boldsymbol{J}_{X2}^T \quad \boldsymbol{J}_{X3}^T \quad \boldsymbol{J}_{X4}^T\right]^T \tag{۲۷}$$

که روابط (۲۶) و (۲۷) به ترتیب ماتریس‌های ژاکوبین معکوس و مستقیم را نشان می‌دهند. ماتریس ژاکوبین مکانیزم به صورت رابطه (۲۸) تعریف می‌شود.

$$\boldsymbol{J} = \boldsymbol{J}_\theta^{-1}\boldsymbol{J}_X \tag{۲۸}$$

۲-۲-تحلیل فضای کار

فضای کار قابل‌دسترس، به نقاطی از فضا اطلاق می‌شود که نقطه مرکزی مجری نهایی بدون توجه به جهت‌گیری می‌تواند دسترسی پیدا کند. محدودیت‌های ناشی از ارتباط بازوها، محدوده عملکردی مفاصل، طول اعضا و برخوردهای داخلی این فضا را تعیین می‌کنند. در این تحقیق برای استخراج فضای کار ربات مورد مطالعه، از روش عددی استفاده شده و محدودیت‌های زیر روی مفاصل اعمال گردیده است.

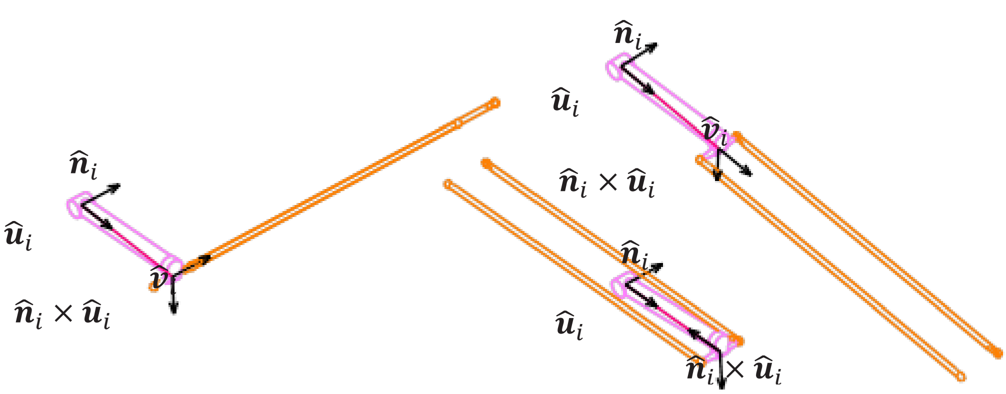
$$\begin{array}{ll} -\pi/2 \le \psi \le \pi/2 & -\pi/3 \le \theta_i \le \pi/2 \\ -\pi/3 \le \sigma_i \le \pi/3 & \pi/6 \le \gamma_i \le 5\pi/6 \end{array} \tag{۲۹}$$

که در آن، گاما زاویه بین لینک‌های بالایی و پایینی هر بازو را نشان می‌دهد. شکل ۳ فضای کار حاصل را به ازای سه دوران مختلف مجری نهایی نشان می‌دهد.

۲-۳-تحلیل تکینگی

ترکیب‌بندی‌های تکین یا بحرانی به ترکیب‌بندی‌هایی گفته می‌شود که در عملکرد سینماتیکی- استاتیکی مکانیزم تغییرات اساسی به‌وجود می‌آید. تکینگی منجر به افت صلبیت و مهارت شده و می‌تواند باعث ایجاد نیروهای غیرقابل‌کنترل در مجری نهایی شود. بر اساس دترمینان ماتریس‌های ژاکوبین سه نوع تکینگی تعریف می‌گردد [۲۳].

- $|\boldsymbol{J}_\theta| = 0$: این حالت با عناوین تکینگی معکوس یا نوع ۱ شناخته می‌شود. در این وضعیت امکان حرکت‌دادن مجری نهایی در برخی جهات با سرعت‌های مشخصی وجود ندارد و در واقع، ربات یک یا چند درجه آزادی خود را از دست می‌دهد. این تکینگی‌ها معرف محدودیت‌های فضای کاری قابل‌دسترس هستند و معمولاً در مرز فضای کار قرار می‌گیرند.
- $|\boldsymbol{J}_X| = 0$: این حالت با عناوین تکینگی مستقیم یا نوع ۲ شناخته می‌شود و متناظر با زمانی است که حرکت مجری نهایی تحت‌کنترل نباشد. در این ترکیب‌بندی‌ها با وجود قفل‌بودن مفاصل فعال، امکان حرکت مجری نهایی وجود دارد. بنابراین، درجات آزادی ربات یک یا چند درجه افزایش یافته و سختی ربات به صورت محلی از بین می‌رود. برخلاف تکینگی نوع ۱، این تکینگی می‌تواند درون فضای کار نیز رخ دهد و متناظر با حالتی است که دو شاخه مختلف پاسخ مسئله سینماتیک مستقیم به هم می‌رسند.
- $|\boldsymbol{J}_\theta| = 0$ و $|\boldsymbol{J}_X| = 0$: این نوع تکینگی که ترکیبی نامیده می‌شود، با دو نوع تکینگی قبل، اندکی متفاوت است. وقوع این



شکل ۴. وضعیت لینکها در تکینگی نوع ۱

Fig. 4. Relative position of links in type-I singularity

نوع تکینگی مستلزم وجود شرایط خاصی روی پارامترهای هندسی ربات است و تنها در برخی معماری‌های خاص اتفاق می‌افتد [۲۴]. در تکینگی ترکیبی، مجری نهایی امکان حرکت دارد در حالی‌که عملگرها قفل هستند و برعکس.

از روابط (۲۳) و (۲۵) می‌توان دترمینان ماتریس ژاکوبین معکوس را به‌صورت رابطه (۳۰) نوشت.

$$\left|\boldsymbol{J}_\theta\right| = l_2^4 \prod_{i=1}^{4} \hat{\boldsymbol{v}}_i^T \left(\hat{\boldsymbol{n}}_i \times \hat{\boldsymbol{u}}_i\right) \tag{۳۰}$$

در صورت تعامد بردارهای یکه لینک متوازی‌الاضلاع و بردار حاصل ضرب بردارهای یکه لینک فوقانی و سرعت زاویه‌ای آن، تکینگی نوع ۱ رخ می‌دهد. چند نمونه از حالاتی که منجر به تکینگی نوع ۱ می‌شود در شکل ۴ نشان داده شده است. برای بررسی تکینگی نوع ۲ می‌توان دترمینان ماتریس ژاکوبین مستقیم را به‌صورت رابطه (۳۱) نوشت:

$$\begin{aligned}\left|J_X\right| = &\left(\hat{\boldsymbol{\xi}}_2 \times \mathbf{r}_{PC1}^O\right)^T \hat{\boldsymbol{v}}_1\left(\hat{\boldsymbol{v}}_2 \cdot \left(\hat{\boldsymbol{v}}_3 \times \hat{\boldsymbol{v}}_4\right)\right)\\ &-\left(\hat{\boldsymbol{\xi}}_2 \times \mathbf{r}_{PC2}^O\right)^T \hat{\boldsymbol{v}}_2\left(\hat{\boldsymbol{v}}_1 \cdot \left(\hat{\boldsymbol{v}}_3 \times \hat{\boldsymbol{v}}_4\right)\right)\\ &-\left(\hat{\boldsymbol{\xi}}_2 \times \mathbf{r}_{PC3}^O\right)^T \hat{\boldsymbol{v}}_3\left(\hat{\boldsymbol{v}}_1 \cdot \left(\hat{\boldsymbol{v}}_2 \times \hat{\boldsymbol{v}}_4\right)\right)\\ &-\left(\hat{\boldsymbol{\xi}}_2 \times \mathbf{r}_{PC4}^O\right)^T \hat{\boldsymbol{v}}_4\left(\hat{\boldsymbol{v}}_1 \cdot \left(\hat{\boldsymbol{v}}_2 \times \hat{\boldsymbol{v}}_3\right)\right)\end{aligned} \tag{۳۱}$$

عبارات داخل پرانتز بردارهایی عمود بر صفحه تشکیل‌دهنده مجری نهایی هستند که می‌تواند به‌صورت رابطه (۳۲) تعریف شود.

$$\begin{gathered}\hat{\boldsymbol{\xi}}_2 \times \mathbf{r}_{PCi}^O = \delta_i l_4 \hat{\boldsymbol{s}}, \qquad \delta_i = \begin{cases}-1 & i=1,4\\ 1 & i=2,3\end{cases}\\ \hat{\boldsymbol{s}} = \begin{bmatrix}\sin\psi & 0 & \cos\psi\end{bmatrix}^T\end{gathered} \tag{۳۲}$$

با این وصف، رابطه (۳۱) به صورت رابطه (۳۳) بازنویسی می‌شود.

$$\left|\boldsymbol{J}_X\right| = 2l_4\left(\hat{\boldsymbol{v}}_{14} \times \hat{\boldsymbol{v}}_{23}\right)^T \hat{\boldsymbol{s}} \quad , \quad \begin{cases}\hat{\boldsymbol{v}}_{14} = \hat{\boldsymbol{v}}_1 \times \hat{\boldsymbol{v}}_4\\ \hat{\boldsymbol{v}}_{23} = \hat{\boldsymbol{v}}_2 \times \hat{\boldsymbol{v}}_3\end{cases} \tag{۳۳}$$

۳- دینامیک ربات

برای مدل‌سازی دینامیک سیستم، روش اویلر لاگرانژ به‌کار گرفته می‌شود. با توجه به این‌که ربات موازی، سیستمی مقید است، می‌توان از نوع مقید این فرمولاسیون استفاده کرد و ضرایب لاگرانژ را در معادلات وارد نمود. انرژی جنبشی و پتانسیل بازوها تنها برحسب مختصات مفاصل فعال، و انرژی جنبشی و پتانسیل مجری نهایی تنها بر حسب موقعیت و جهت‌گیری آن نوشته می‌شود. بنابراین، لاگرانژین سیستم به دو قسمت لاگرانژین بازوها و لاگرانژین مجری نهایی تفکیک می‌شود.

$$\mathcal{L}\left(\boldsymbol{\Theta},\dot{\boldsymbol{\Theta}},\boldsymbol{\mathcal{X}},\dot{\boldsymbol{\mathcal{X}}}\right) = \mathcal{L}_a\left(\boldsymbol{\Theta},\dot{\boldsymbol{\Theta}}\right) + \mathcal{L}_P\left(\boldsymbol{\mathcal{X}},\dot{\boldsymbol{\mathcal{X}}}\right) \tag{۳۴}$$

در این مسأله تنها نیروی پایستاری که به سیستم وارد می‌شود، نیروی گرانش است. از این‌رو انرژی پتانسیل بازوها و مجری نهایی به ترتیب به صورت روابط (۳۵) و (۳۶) نوشته می‌شوند.

$$U_a\left(\boldsymbol{\Theta}\right) = -\mathbf{g}^T \sum_{i=1}^{4}\left(m_U \mathbf{r}_{Di} + \frac{1}{2} m_L \mathbf{r}_{Bi}\right) \tag{۳۵}$$

$$U_P = -\left(m_e + 2m_L\right)\begin{bmatrix}\mathbf{g}^T & 0\end{bmatrix}^T \boldsymbol{\mathcal{X}} \tag{۳۶}$$

از آن‌جا که اینرسی لینک پایینی بسیار اندک است، با تقریب خوبی می‌توان آن را به‌صورت دو جرم متمرکز در دو انتها درنظر گرفت. بنابراین، انرژی جنبشی اعضا به‌صورت روابط (۳۷) و (۳۸) به‌دست‌می‌آید.

$$T_a\left(\dot{\boldsymbol{\Theta}}\right) = \frac{1}{12} l_2^2\left(2m_U + 3m_L\right)\dot{\boldsymbol{\Theta}}^T \dot{\boldsymbol{\Theta}} \tag{۳۷}$$

$$T_P = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\mathcal{X}}}^T \boldsymbol{M}_P \dot{\boldsymbol{\mathcal{X}}} \tag{۳۸}$$

که در آن،

$$\boldsymbol{M}_P = \begin{bmatrix}\left(m_e + 2m_L\right)\boldsymbol{I}_{3\times3} & 0_{3\times1}\\ 0_{1\times3} & I_{P_{yy}}^P + 2m_L l_4^2\end{bmatrix} \tag{۳۹}$$

بر این اساس دو دسته معادله دیفرانسیل به‌دست‌می‌آید. دسته اول، معادلات دینامیک مجری نهایی برحسب مختصات تعمیم‌یافته فضای کار و دسته دوم، معادلات دینامیک بازوها بر حسب مختصات تعمیم‌یافته فضای مفصل می‌باشد. پر واضح است که این دو بخش مستقل نیستند و با معادلات قید به هم مرتبط می‌شوند. مدل دینامیکی مجری نهایی برحسب مختصات تعمیم‌یافته فضای کار از معادله لاگرانژ سیستم‌های مقید به‌دست می‌آید.

$$\boldsymbol{M}_P\ddot{\boldsymbol{\mathcal{X}}}+\boldsymbol{G}_P=\boldsymbol{F}+\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{\mathcal{X}}}\right)^T\boldsymbol{\lambda} \tag{۴۰}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{G}_P&=-\left(m_e+2m_L\right)\left[\mathbf{g}^T \quad 0\right]^T\\ \boldsymbol{F}&=\left[F_x \quad F_y \quad F_z \quad \tau_\psi\right]^T\end{aligned} \tag{۴۱}$$

بردار نیروها وگشتاورهای خارجی وارد بر مجری نهایی در راستای محورهای مختصات ثابت بیان می‌شوند. معادلات لاگرانژ برای بازوها به صورت رابطه (۴۲) به‌دست می‌آید.

$$\boldsymbol{M}_a\ddot{\boldsymbol{\Theta}}+\boldsymbol{G}_a=\boldsymbol{\tau}+\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{\Theta}}\right)^T\boldsymbol{\lambda} \tag{۴۲}$$

$$\boldsymbol{M}_a=\frac{1}{6}l_2^2\left(2m_U+3m_L\right)\boldsymbol{I}_{4\times4} \tag{۴۳}$$

$$\boldsymbol{G}_a=-\frac{1}{2}l_2\left(m_U+m_L\right)\mathrm{g}\cos\boldsymbol{\Theta} \tag{۴۴}$$

برای استخراج مدل دینامیک معکوس ربات، دو مدل دینامیکی (۴۰) و (۴۲) ترکیب شده و ضرایب لاگرانژ آن‌ها حذف می‌گردد. برای این کار، ابتدا بردار ضرایب لاگرانژ از (۴۰) محاسبه و در معادله (۴۲) جایگذاری می‌شود.

$$\boldsymbol{\tau}=\boldsymbol{M}_a\ddot{\boldsymbol{\Theta}}+\boldsymbol{G}_a-\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{\Theta}}\right)^T\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{\mathcal{X}}}\right)^{-T}\left(\boldsymbol{M}_P\ddot{\boldsymbol{\mathcal{X}}}+\boldsymbol{G}_P-\boldsymbol{F}\right) \tag{۴۵}$$

مشتق‌گیری از دو سمت معادلات قید نسبت به زمان رابطه (۴۶) را نتیجه می‌دهد.

$$\dot{\boldsymbol{\mathcal{X}}}=-\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{\mathcal{X}}}\right)^{-1}\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{\Theta}}\dot{\boldsymbol{\Theta}} \tag{۴۶}$$

از سینماتیک سرعت می‌توان نوشت:

$$-\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{\Theta}}\right)^T\left(\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{\mathcal{X}}}\right)^{-T}=\boldsymbol{J}^{-T} \tag{۴۷}$$

در نتیجه، گشتاور عملگرها برای ایجاد یک ترجکتوری مشخص، به صورت رابطه (۴۸) حاصل می‌گردد.

$$\boldsymbol{\tau}=\boldsymbol{M}_a\ddot{\boldsymbol{\Theta}}+\boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{M}_P\ddot{\boldsymbol{\mathcal{X}}}+\boldsymbol{G}_a+\boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{G}_P-\boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{F} \tag{۴۸}$$

برای حذف شتاب زاویه‌ای مفاصل محرک از معادله (۴۸)، از رابطه سینماتیک سرعت مکانیزم بر حسب زمان مشتق‌گیری می‌شود.

$$\ddot{\boldsymbol{\Theta}}=\dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{\mathcal{X}}}+\boldsymbol{J}\ddot{\boldsymbol{\mathcal{X}}} \tag{۴۹}$$

با جایگذاری شتاب حاصل در رابطه (۴۸)، معادله دینامیک معکوس بر حسب متغیرهای فضای کار استخراج می‌شود.

$$\boldsymbol{\tau}=\boldsymbol{\mathcal{M}}\ddot{\boldsymbol{\mathcal{X}}}+\boldsymbol{\mathcal{C}}\dot{\boldsymbol{\mathcal{X}}}+\boldsymbol{\mathcal{G}}+\boldsymbol{\mathcal{F}} \tag{۵۰}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\mathcal{M}}&=\boldsymbol{M}_a\boldsymbol{J}+\boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{M}_P \quad , \quad \boldsymbol{\mathcal{C}}=\boldsymbol{M}_a\dot{\boldsymbol{J}}\\ \boldsymbol{\mathcal{G}}&=\boldsymbol{G}_a+\boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{G}_P \quad , \quad \boldsymbol{\mathcal{F}}=-\boldsymbol{J}^{-T}\boldsymbol{F}\end{aligned} \tag{۵۱}$$

۴- ارزیابی عملکرد

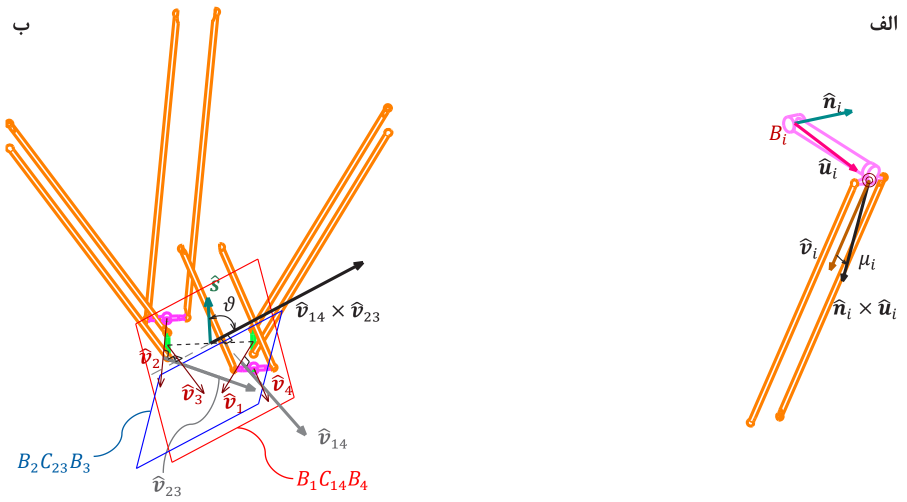
برای ارزیابی عملکرد ربات در فضای کار، رفتار آن از دو دیدگاه سینماتیک و دینامیک بررسی می‌شود.

۴-۱- عملکرد سینماتیکی

شاخص انتقال حرکت/نیرو از کارآمدترین شاخص‌ها برای ارزیابی ربات‌های موازی است. برای مکانیزم موازی که در آن مفاصل متصل به پایه ثابت، فعال هستند، حرکات قابل‌انتقال ناشی از نیروها و گشتاورهای ورودی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. ۱) حرکات منتقل‌شده از مفاصل فعال به مفاصل غیرفعال متصل به مجری نهایی درون یک بازو و ۲) حرکات منتقل‌شده از مجری نهایی به مفاصل غیرفعال سایر بازوها در حالی که مفاصل فعال سایر بازوها قفل هستند. بنابراین، هر نقصانی در اولین نوع انتقال منجر به تکینگی مستقیم و هر نقصانی در انتقال نوع دوم سبب تکینگی معکوس می‌شود. برای بیان قابلیت انتقال نیرو/ حرکت در مکانیزم موازی دو نوع زاویه فشار معرفی می‌شود که از ماتریس‌های ژاکوبین مستقیم و معکوس قابل‌استخراج هستند. زاویه فشار اول متناظر با انتقال حرکت یک بازو، یا به عبارت دیگر حرکت منتقل شده از مفصل فعال به مفصل غیرفعال متصل به مجری نهایی، به صورت رابطه (۵۲) تعریف می‌شود [۲۰].

$$\mu_i=\cos^{-1}\hat{\boldsymbol{v}}_i^T\left(\hat{\boldsymbol{n}}_i\times\hat{\boldsymbol{u}}_i\right) \tag{۵۲}$$

از سوی دیگر، زاویه فشار بین بازوها به صورت نیروی منتقل‌شده از مجری نهایی به مفاصل غیرفعال بازوهای دیگر، با فرض قفل‌بودن مفاصل فعال آن‌ها تعریف می‌شود، و از رابطه (۵۳) به دست



شکل ۵. زوایای فشار (الف) μ_i ، (ب) ϑ

Fig. 5. Pressure angles (a) μ_i, (b) ϑ

می‌آید [۲۰].

$$\vartheta = \cos^{-1}\frac{\left(\hat{\boldsymbol{v}}_{14}\times\hat{\boldsymbol{v}}_{23}\right)^T\hat{\mathbf{s}}}{\hat{\boldsymbol{v}}_{14}\times\hat{\boldsymbol{v}}_{23}} \qquad (۵۳)$$

برای نمایش فیزیکی این زاویه فشار می‌توان صورت کسر رابطه (۵۳) را به صورت عبارت زیر نوشت:

$$\left(\hat{\boldsymbol{v}}_{14}\times\hat{\boldsymbol{v}}_{23}\right)^T\hat{\mathbf{s}} = \hat{\boldsymbol{v}}_{14}^T\left[\hat{\boldsymbol{v}}_3\left(\hat{\boldsymbol{v}}_2.\hat{\mathbf{s}}\right) - \hat{\boldsymbol{v}}_2\left(\hat{\boldsymbol{v}}_3.\hat{\mathbf{s}}\right)\right]$$
$$= \hat{\boldsymbol{v}}_{23}^T\left[\hat{\boldsymbol{v}}_4\left(\hat{\boldsymbol{v}}_1.\hat{\mathbf{s}}\right) - \hat{\boldsymbol{v}}_4\left(\hat{\boldsymbol{v}}_1.\hat{\mathbf{s}}\right)\right] \qquad (۵۴)$$

به‌طور مشابه، در هنگام بروز تکینگی مستقیم، دترمینان ماتریس ژاکوبین مستقیم صفر می‌گردد، که معادل مقدار ۹۰° برای زاویه فشار دوم است. شاخص‌های انتقال ورودی (حرکت) و انتقال خروجی (نیرو)، در هر ترکیب‌بندی مشخص به صورت حداقل مقدار کسینوس زوایای فشار تعریف می‌شوند [۲۵].

$$\mathrm{ITI} = \min\left(\left|\cos\mu_i\right|\right) \qquad (۵۵)$$

$$\mathrm{OTI} = \left|\cos\vartheta\right| \qquad (۵۶)$$

شاخص انتقال محلی برای ارزیابی عملکرد سینماتیک ربات به صورت رابطه (۵۷) تعریف می‌گردد [۱۹].

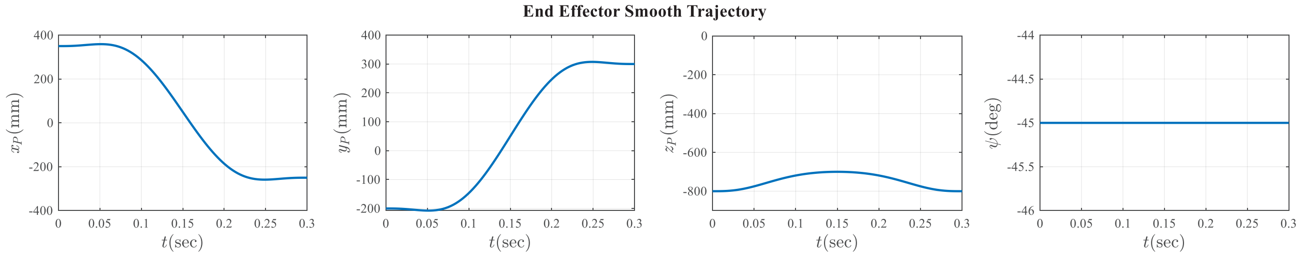
$$\mathrm{LTI} = \min\left\{\mathrm{ITI},\mathrm{OTI}\right\} = \min\left\{\left|\cos\mu_i\right|,\left|\cos\vartheta\right|\right\} \qquad (۵۷)$$

۴-۲- عملکرد دینامیکی

در کاربرد جابجایی اشیاء، شتاب حرکت بالاست و این باعث می‌شود که نیروهای اینرسی نقشی تعیین‌کننده در عملکرد ربات داشته باشند. از این‌رو، شاخص‌های ارزیابی عملکرد دینامیکی عموماً بر پایه ماتریس اینرسی بنا نهاده می‌شود. در ربات‌های چهار درجه آزادی، ماتریس اینرسی فضای کار از لحاظ بعد سازگار نیست. به‌عنوان راه حلی برای رفع این مشکل، ماتریس اینرسی فضای مفصل مبنای تعریف شاخص‌های ارزیابی قرار می‌گیرد که به صوت رابطه (۵۸) به‌دست می‌آید.

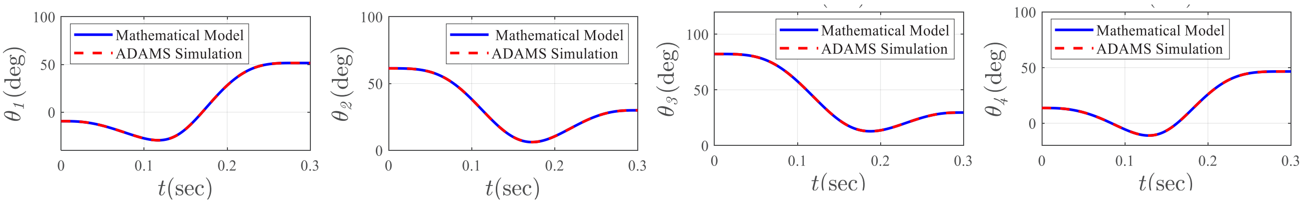
$$\mathcal{I}_J = \boldsymbol{J}^{-T}\ \boldsymbol{\mathcal{M}}\boldsymbol{J}^{-1} \qquad (۵۸)$$

مؤلفه‌های قطر اصلی ماتریس اینرسی فضای مفصل ویژگی‌های اینرسی بازوی متناظر را نشان می‌دهند، در حالی‌که سایر مؤلفه‌ها بیانگر کوپلینگ بین بازوهای ربات می‌باشند. مقدار متوسط مؤلفه‌های قطر اصلی ماتریس اینرسی فضای مفصل به عنوان شاخص تصویر اینرسی در فضای مفصل تعریف می‌شود و سطح اینرسی کلی ربات موازی را از نقطه نظر سازگاری اینرسی نشان می‌دهد [۲۶]. سازگاری اینرسی بدین معناست که نسبت بار اینرسی مکانیکی اعمال‌شده روی محور موتور به اینرسی موتور در محدوده معینی قرار گیرد. در این حالت بازده موتور بیشینه شده و سیستم، عملکرد دینامیکی خوبی خواهد داشت. در مقابل، ناسازگاری اینرسی اثراتی منفی از جمله



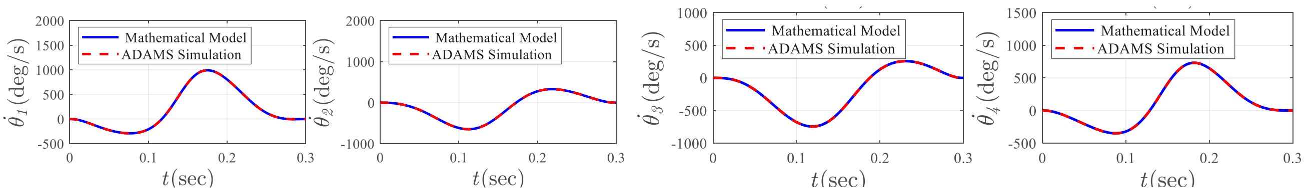
شکل ۶. ترجکتوری مرجع مجری نهایی

Fig. 6. Reference trajectory of the end-effector



شکل ۷. زاویه مفاصل فعال به ازای ترجکتوری مجری نهایی

Fig. 7. Active joint angles



شکل ۸. سرعت زاویه‌ای مفاصل فعال

Fig. 8. Angular velocity of the active joints

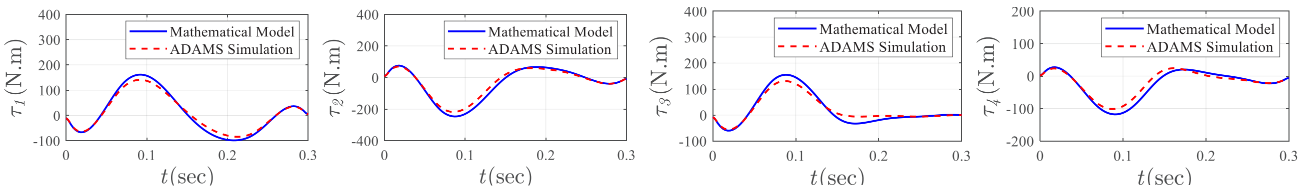
ارتعاشات، فراجهش و کندی پاسخ را به‌همراه دارد و از سوی دیگر، از ظرفیت موتور به‌خوبی استفاده نمی‌شود. اما شاخص تصویر اینرسی در فضای مفصل قادر به نشان‌دادن نامیزانی ویژگی‌های اینرسی بین بازوها نیست. شاخص ضریب تغییرات اینرسی فضای مفصل برای نشان‌دادن این ویژگی ارائه شده است که به صورت ضریب تغییرات مؤلفه‌های قطر اصلی ماتریس فضای مفصل تعریف می‌شود [۲۱].

$$\mathrm{CVI}=\frac{1}{I_{\mathrm{ave}}}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(I_{ii}-I_{\mathrm{ave}}\right)^2} \qquad (۵۹)$$

هر چه شاخص ضریب تغییرات اینرسی فضای مفصل کوچک‌تر باشد، ویژگی‌های اینرسی و شتاب بازوها تشابه بیشتری دارد. استفاده از این دو شاخص به صورت هم‌زمان دید جامعی از عملکرد دینامیکی ربات ارائه می‌دهد.

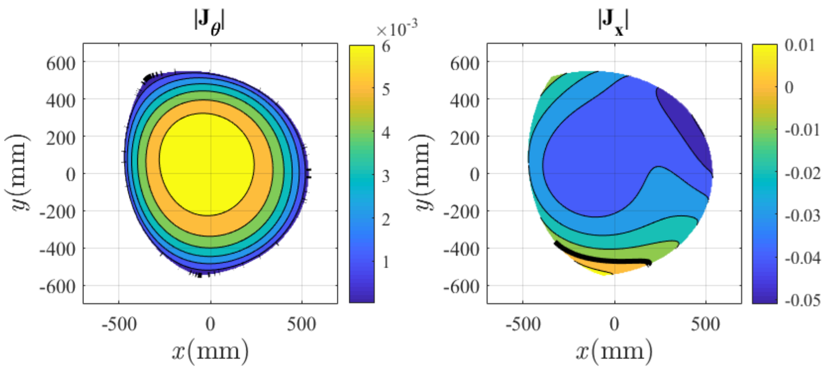
۵- نتایج

برای حصول اطمینان از صحت معادلات سینماتیک و دینامیک استخراج‌شده که مبنای ارزیابی عملکرد قرار می‌گیرند، مکانیزم ربات در نرم‌افزار ادمز شبیه‌سازی شده، سپس به ازای ترجکتوری شکل ۶، پاسخ دو مدل تحلیلی و ادمز مقایسه شده است. ترجکتوری‌ها منحنی‌های اسپیلاین پایه درجه پنج هستندکه حرکتی هموار را ایجاد کرده و فاقد جهش در نقاط ابتدایی و انتهایی می‌باشند. حل سینماتیک معکوس در شکل ۷ و حل تحلیل سرعت در شکل ۸ انطباق بسیار خوبی را بین دو روش نشان می‌دهند. برای صحه‌گذاری مدل دینامیک معکوس ربات، شتاب متناظر با ترجکتوری مرجع



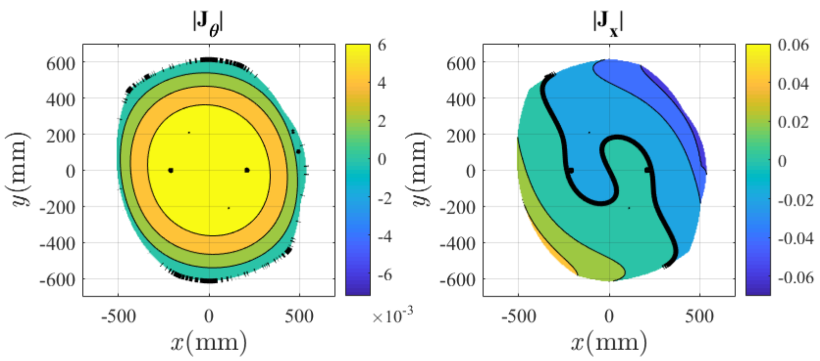
شکل ۹. گشتاور عملگرها، حاصل از حل دینامیک معکوس

Fig. 9. Actuator torques from inverse dynamics



شکل ۱۰. توزیع دترمینان ماتریس‌های ژاکوبین در $z=-800\,\text{mm}$ و $\psi=-\pi/4$

Fig. 10. Inverse and forward Jacobian determinant over $z=-800\,\text{mm}$ and $\psi=-\pi/4$

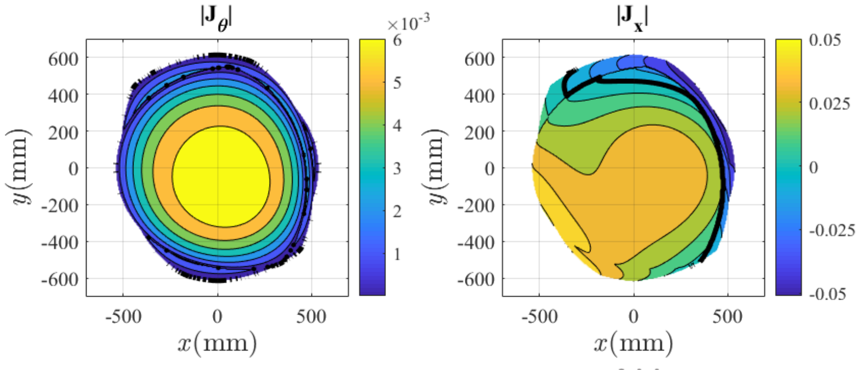


شکل ۱۱. توزیع دترمینان ماتریس‌های ژاکوبین در $z=-800\,\text{mm}$ و $\psi=0$

Fig. 11. Inverse and forward Jacobian determinant over $z=-800\,\text{mm}$ and $\psi=0$

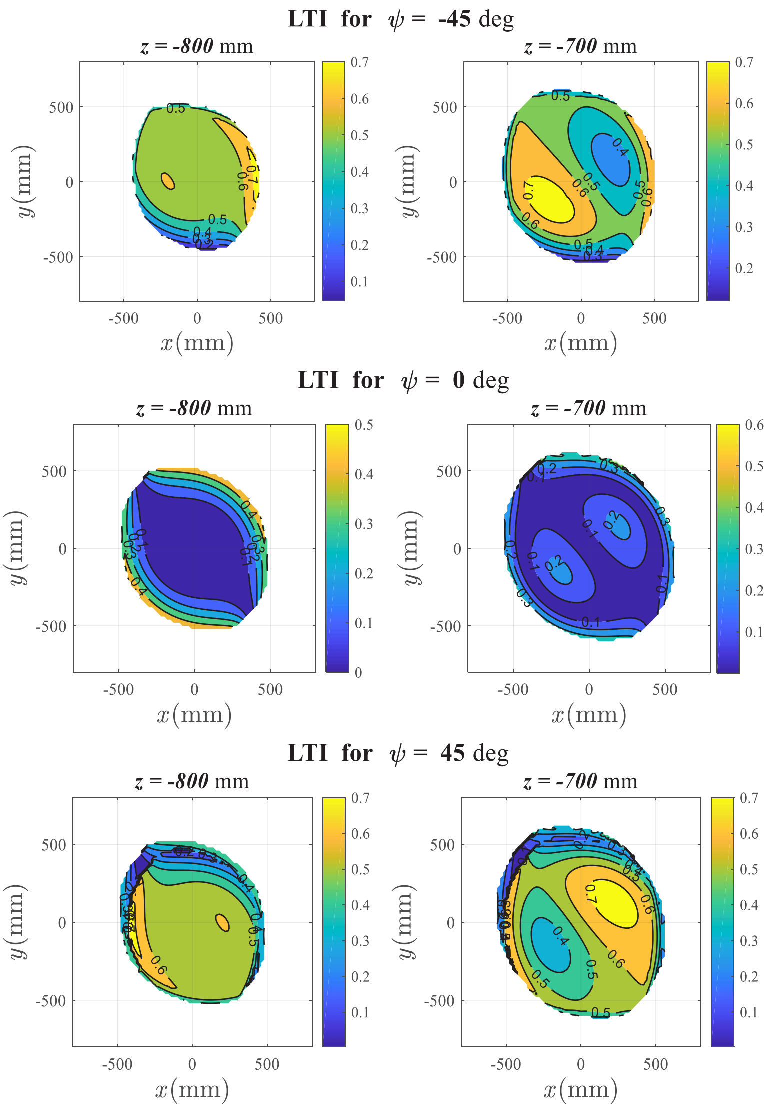
به مدل ریاضی اعمال شد و گشتاور عملگرها به عنوان حل مدل دینامیکی، با خروجی شبیه‌سازی ادمز مقایسه شد. این نتایج که در شکل ۹ ارائه شده‌اند، رفتاری مشابه را نشان می‌دهند، هر چند که اندازه گشتاورها دارای مقداری اختلاف می‌باشد.

تفاوت بین پاسخ‌های مسأله دینامیک از فرضیاتی ناشی می‌شود که در مدل‌سازی سیستم لحاظ شده است. فرض اول، قرارگیری مرکز ثقل لینک‌های بالایی در وسط خط واصل مرکز لولای دو سر آن‌ها بود. در صورتی‌که در مدل ادمز، موقعیت مرکز ثقل از این نقطه اندکی انحراف دارد. فرض دوم، چشم‌پوشی از اینرسی لینک‌های پایینی بازوها بود که اثر آن‌ها به صورت دو جرم متمرکز یکسان در دو انتهای



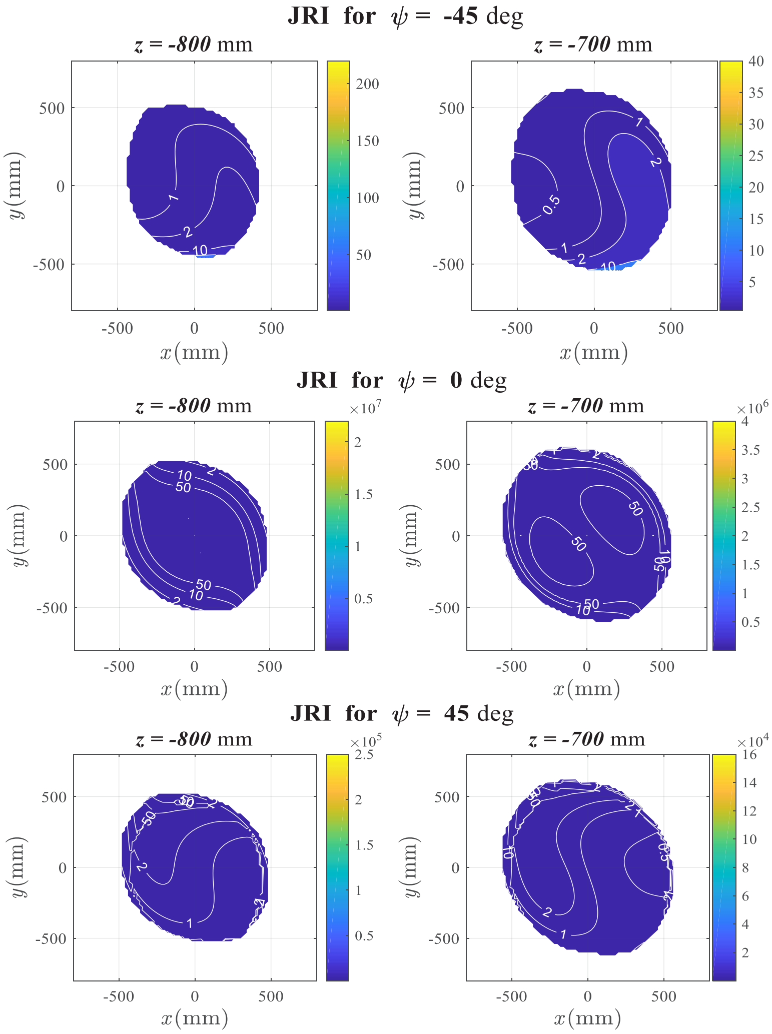
شکل ۱۲. توزیع دترمینان ماتریس‌های ژاکوبین در $z=-800\,\mathrm{mm}$ و $\psi=\pi/4$

Fig. 12. Inverse and forward Jacobian determinant over $z=-800\,\mathrm{mm}$ and $\psi=\pi/4$



شکل ۱۳. توزیع شاخص انتقال محلی در فضای کار

Fig. 13. LTI distribution over the workspace



شکل ۱۴. توزیع شاخص تصویر اینرسی در فضای مفصل روی برش‌های افقی فضای کار

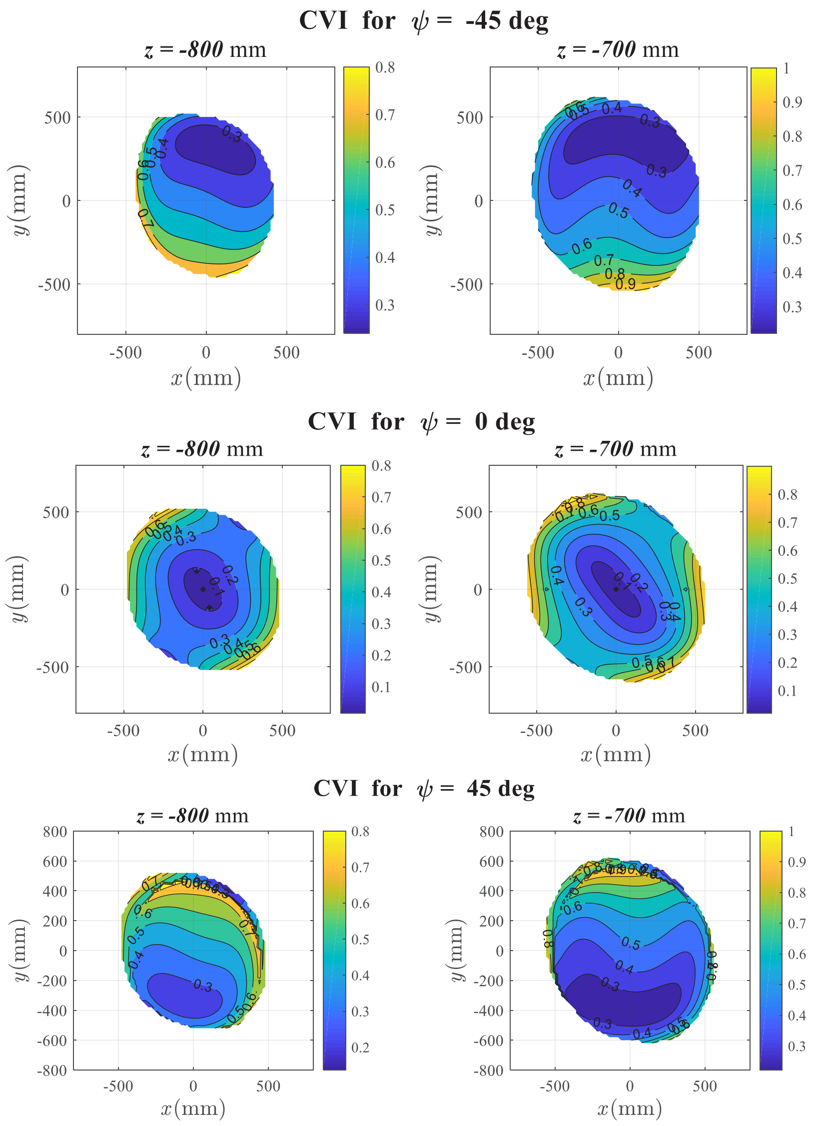
Fig. 14. JRI distribution over the workspace

لینک مدل شد.

برای تحلیل تکینگی، توزیع مقدار دترمینان ماتریس‌های ژاکوبین مستقیم و معکوس در برش افقی فضای کار در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ رسم شده است. کانتور صفر که با خطوط مشکی ضخیم متمایز شده‌اند، نشان‌دهنده مرز بین نواحی با دترمینان مثبت و منفی می‌باشد و مکان هندسی نقاط تکین را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج حاصل، به ازای زاویه دوران°۴۵- مجری نهایی، تکینگی‌ها اندک بوده و در نزدیکی مرزها واقع شده‌اند. در زاویه دوران°۴۵ مجری نهایی تکینگی‌ها به مرکز فضای کار نزدیک‌تر شده، آن را محدودتر می‌کنند. زمانی‌که مجری نهایی افقی است، تکینگی‌ها، فضای کار را به دو ناحیه مجزا تقسیم می‌کنند. نکته دیگری که می‌توان از نتایج دریافت این است که تکینگی نوع ۱ در نواحی مرزی واقع شده است، اما تکینگی نوع ۲ درون فضای کار نیز روی می‌دهد و آن را به نواحی مختلفی تقسیم می‌کند.

توزیع شاخص انتقال محلی روی برش‌های افقی فضای کار در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که از تحلیل تکینگی حاصل شد، ربات در جهت‌گیری افقی مجری نهایی عملکرد سینماتیکی مطلوبی ندارد؛ به‌طوری‌که در عمده حجم فضای کار، شاخص انتقال محلی مقداری کمتر از ۰/۱ دارد. در مقابل، به ازای زاویه دوران°۴۵- این شاخص مقادیر بیشتری به‌خود می‌گیرد و در سهم بزرگی از فضای کار به بیش از ۰/۵ می‌رسد. به ازای زاویه دوران°۴۵ نیز اگر چه در حواشی فضای کار افت عملکرد سینماتیکی مشاهده می‌شود، ولی



شکل ۱۵. توزیع شاخص ضریب تغییرات اینرسی فضای مفصل روی برش‌های افقی فضای کار

Fig. 15. CVI distribution over the workspace

قسمت اعظم فضا قابل‌استفاده می‌باشد. همچنین، مقایسه شاخص در ارتفاعات مختلف فضای کار حاکی از این است که اینرسی ربات در قسمت پایین فضای کار وضعیت یکنواخت‌تری دارد.

شاخص تصویر اینرسی در فضای مفصل روی برش‌های افقی فضای کار در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. در زوایای غیر صفر مجری نهایی، مقدار این شاخص در بیشتر نقاط فضای کار کمتر از ۱۰ می‌باشد؛ هر چند که به ازای زاویه دوران °۴۵ مجری نهایی مقدار حداکثر شاخص در نواحی نزدیک به مرز به‌شدت افزایش می‌یابد. در جهت‌گیری افقی مجری نهایی روند تغییرات برعکس است و با حرکت از مرزها به سمت مرکز فضای کار، سطح اینرسی ربات به شدت افزایش می‌یابد.

شکل ۱۵ توزیع شاخص ضریب تغییرات اینرسی فضای مفصل را روی برش‌های افقی فضای کار نشان می‌دهد. برای زاویه دوران°۴۵- مجری نهایی، تغییرات اینرسی فضای مفصل یکنواخت‌تر است و با حرکت از مقادیر مثبت محور عمودی به سمت مقادیر منفی، مقدار شاخص افزایش می‌یابد. به ازای جهت‌گیری افقی، شاخص ضریب تغییرات اینرسی فضای مفصل در مرکز فضا وضعیت مطلوبی دارد، اما در نزدیکی مرز فضای کار و در ربع دوم و چهارم برش‌های افقی، مقدار شاخص افزایش می‌یابد. برای جهت‌گیری °۴۵ مجری نهایی، بهترین عملکرد از دیدگاه این شاخص در مقادیر منفی محور عمودی

اتفاق می‌افتد و با افزایش این مختصه، اختلاف سطح اینرسی بازوها افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه روند تغییرات شاخص در ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد که با دورشدن مجری نهایی از پلتفرم ثابت، سطح شاخص کاهش می‌یابد.

به‌طور کلی، این ربات عملکرد خوبی را در جهت‌گیری افقی مجری نهایی ارائه نمی‌دهد و بهتر است که برنامه‌ریزی حرکت آن در زوایای غیر صفر صورت گیرد. همچنین، رفتار سینماتیکی و دینامیکی ربات در قسمت‌های پایین فضای کار یکنواخت‌تر و مطلوب‌تر است و تکینگی‌های کمتری نیز در این نواحی وجود دارد.

۶- نتیجه‌گیری

هدف از مقاله، ارزیابی عملکرد سینماتیکی و دینامیکی یک ربات چهار درجه آزادی با حرکت شون‌فلیس بود. دارابودن سه درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی دورانی باعث می‌شود که این ربات گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای جابجایی اشیاء باشد که در آن، سرعت و شتاب حرکتی بالایی مورد نیاز است. مطالعات با استخراج معادلات سینماتیکی ربات بر مبنای روش هندسی آغاز، و سپس به تحلیل سرعت پرداخته شد.

با استفاده از معادلات سینماتیکی استخراجی و همچنین محدودیت‌های مفاصل، فضای کار ربات به صورت عددی تعیین و حالت‌های تکین مکانیزم در این فضا بررسی گردید. در گام بعد، از آنجایی‌که مکانیزم مورد مطالعه یک سیستم مقید می‌باشد، معادلات حاکم بر دینامیک این مکانیزم با استفاده از روش لاگرانژ برای سیستم‌های مقید استخراج شد و به منظور اعتبارسنجی معادلات سینماتیک و دینامیک، ربات در محیط نرم‌افزار ادمز شبیه‌سازی، و نتایج حاصل از حل عددی معادلات مذکور با خروجی ادمز مقایسه شد. در ادامه برای ارزیابی عملکرد، در کنار شاخص سینماتیکی انتقال حرکت/ نیرو، دو شاخص دینامیکی برای ارزیابی سطح کلی اینرسی در فضای کار و میزان نابالانسی اینرسی بین بازوها نیز مورد مطالعه قرار گرفت. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی برآمد، در حالت افقی برای مجری نهایی، تکینگی‌ها، فضای کار را به دو ناحیه مجزا تقسیم کردند که طراحی مسیر ربات را با مشکلات زیادی مواجه می‌کند. علاوه براین، تکینگی نوع ۱ در نواحی مرزی، و تکینگی نوع ۲ علاوه بر این نواحی، درون فضای کار نیز اتفاق افتاد و آن را به نواحی مختلفی تقسیم کرد. مشابه آن‌چه از تحلیل تکینگی حاصل شد، ربات در جهت‌گیری افقی مجری نهایی عملکرد سینماتیکی مطلوبی نداشت؛ به‌طوری‌که در عمده حجم فضای کار، شاخص انتقال محلی مقداری کمتر از ۰/۱ دارا بود. با مقایسه شاخص انتقال در ارتفاع‌های مختلف فضای کار، دیده شد که اینرسی ربات در قسمت پایین فضای کار وضعیت یکنواخت‌تری دارد.

بر اساس نتایج بررسی شاخص تصویر اینرسی، در زوایای غیر صفر مجری نهایی، مقدار این شاخص در بیشتر نقاط فضای کار کمتر از ۱۰ بود؛ هر چند که به ازای دیگر زوایا از قبیل 45° مقدار حداکثر شاخص در نواحی نزدیک به مرز به‌شدت افزایش یافت. مشاهده شد که در جهت‌گیری افقی مجری نهایی روند تغییرات برعکس بوده و با حرکت از مرزها به سمت مرکز فضای کار، سطح اینرسی ربات به شدت افزایش یافت.

بررسی توزیع شاخص ضریب تغییرات اینرسی فضای مفصل نشان داد که این شاخص تغییرات یکنواخت‌تری داشت و با حرکت از مقادیر مثبت محور عمودی به سمت مقادیر منفی و برعکس، مقدار شاخص افزایش یافت. اما بر خلاف رفتار شاخص قبل، در جهت‌گیری افقی این شاخص در مرکز فضا وضعیت مطلوبی داشت درحالی‌که در نزدیکی مرز فضای کار و در ربع دوم و چهارم برش‌های افقی، مقدار شاخص مجددا افزایش یافت. با این وجود، مقایسه روند تغییرات شاخص در ارتفاع‌های مختلف نشان داد که با دورشدن مجری نهایی از پلتفرم ثابت، سطح شاخص روند کاهش داشت.

بنابراین، به طور کلی، نتایج نشان داد که این ربات در جهت‌گیری افقی مجری نهایی عملکرد مناسبی ندارد. از سوی دیگر، رفتار سینماتیکی و دینامیکی آن در قسمت‌های پایینی فضای کار مطلوب‌تر است.

مراجع

[1] “Bastian solutions,” [Online]. Available: https://www.bastiansolutions.com/solutions/service/industrial-robotics/industrial-robotic-solutions/pick-and-place/.

[2] F. Pierrot, F. Marquet, O. Company, H4 Parallel Robot: Modeling, Design and Preliminary Experiments, in: Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Seoul, South Korea, 2001.

[3] F. Pierrot, V. Nabat, S. Krut,P. Poignet, Optimal Design of a 4-DOF Parallel Manipulator: From Academia to Industry, IEEE Transactions on Robotics, 25(2) (2009) 213-224.

[4] P. L. Richard, C. M. Gosselin, X. W. Kong, Kinematic analysis and prototyping of a partially decoupled 4-DOF 3T1R parallel manipulator,Journal of Mechanical Design, 129(12) (2007) 611-616.

[5] X. W. Kong., C. M. Gosselin, Type synthesis of 3T1R 4-DoF parallel manipulators based on screw theory, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 20(2) (2004) 181-190.

[6] P. C. Lee, J. J. Lee, On the kinematics of a new parallel mechanism with Schoenflies motion, Robotica, 34(9) (2016) 2056–2070.

[7] M. Mazare, M. Taghizadeh, m. R. Najafi, Kinematic analysis and design of a novel 3-DOF translational parallel robot, International Journal of Automation and Computing, 14(4) (2016) 432–441.

[8] J. Brinker, B. Corves, Y. Takeda, Y., Kinematic performance evaluation of high-speed Delta parallel robots based on motion/force transmission indices, Mechanism and Machine Theory, 125 (2018) 111-125.

[9] H. Shao, L. Wang, L.Guan, J. Wu, Dynamic manipulability and optimization of a redundant three DOF planar parallel manipulator, in: 2009 ASME/IFToMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, London, 2009.

[10] S. Liu, T. Huang, J. Mei, X. Zhao, P. Wang, Optimal Design of a 4-DOF SCARA Type Parallel Robot Using Dynamic Performance Indices and Angular Constraints, ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 4(3)(2012) 031005-031005-10.

[11] C. M. Gosselin, J. Angeles, The optimum kinematic design of a spherical three-degree- offreedom parallel manipulator freedom parallel manipulator, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 111(2) (1989) 202-207.

[12] C. M. Gosselin, J. Angeles, A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators, ASME. Journal of Mechanical Design, 113(3) (1991) 220-226.

[13] J. Ryu, J. Cha, Optimal architecture design of parallel manipulators for best accuracy, in 2001 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems, IEEE press, Piscataway, N.J., Maui, Hawwaii, 2001.

[14] H. S. Kim, L. W.Tsai, Design optimization of a Cartesian parallel manipulator, Journal of Mechanical Design, 125(1) (2003) 43-51.

[15] M. Stock, K. Miller, Optimal kinematic design of spatial parallel manipulators: application to linear delta robot, ASME Journal of Mechanical Design, 125 (2003) 291-301.

[16] H. B. Choi, A. Konno, M. Uchiyama, Design, Implementation, and Performance Evaluation of a 4-DOF Parallel Robot, Robotica, 28(1) (2010) 107-118.

[17]M. C. Yuan, F. F. Freudenstein , L. S. Woo, Kinematic Analysis of Spatial Mechanisms by Means of Screw Coordinates. Part 2—Analysis of Spatial Mechanisms, ASME Journal of Engineering for Industry, 93(1) (1971) 67-73.

[18] Y. Takeda, H. Funabashi, Motion Transmissibility of In-Parallel Actuated Manipulators, JSME international journal. Ser. C, Dynamics, control, robotics, design and manufacturing, 38(4) (1995) 749-755.

[19] J. Wang, C. Wu, X. J. Liu, Performance evaluation of parallel manipulators: Motion/force transmissibility and its index, Mechanism and Machine Theory, 45(10) (2010) 1462-1476.

[20] G. Wu, Kinematic Analysis and Optimal Design of a Wall-mounted Four-limb Parallel Schönflies-motion Robot for Pick-and-place Operations, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 85(3-4) (2016) 663–677.

[21] J. Mo, Z. F. Shao, L. Guan, F. Xie, X. Tang, Dynamic performance analysis of the X4 high-speed pick-and-place parallel robot, Robotics and Computer–Integrated Manufacturing, 46(2017) 48-57.

[22] "Penta Veloce," [Online]. Available: https://pentarobotics.com/products/#brochure.

[23]H. Taghirad, Parallel Robots: Mechanics and Control, CRC Press, 2013.

[24] C. Gosselin, Parallel computational algorithms for the kinematics and dynamics of planar and spatial parallel

manipulators, Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 118(1) (1996) 22-28.

[25] X. Liang, Y. Takeda, Transmission index of a class of parallel manipulators with 3-RS(SR) primary structures based on pressure angle and equivalent mechanism with 2-SS chains replacing RS chain, Mechanism and Machine Theory, 139 (2019) 359-378.

[26] Z. F. Shao, X. Tang, X. Chen, L. P. Wang, Research on the inertia matching of the Stewart parallel manipulator, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 28 (2012) 649–659.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

P. Ghaf-Ghanbari, M. Taghizadeh, M. Mazare, Kinematic and dynamic performance evaluation of a four degrees of freedom parallel robot, AmirKabir J. Mech Eng., 53(4) (2021) 2055-2072

DOI: 10.22060/mej.2020.17759.6661

این صفحه عمداً خالی است