ماهنامه علمى يژوهشى



mme modares ac ir

مهندسی مکانیک مدر س

بهینهسازی چند هدفه ساختار ربات موازی هگزا براساس شاخصهای سینماتیکی ديناميكي

عرفان میرشکاری¹، افشین قنبرزاده^{2*}، کوروش حیدریشیرازی³

چکیدہ 🔹

1 - دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران، اهواز 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران، اهواز 3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران، اهواز * اهواز، صندوق پستى: 6135743337 shanbarzadeh.a@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله

در مقاله حاضر تأثیر پارامترهای ساختاری ربات موازی شش درجه آزادی هگزا بر شاخصهای عملکردی سینماتیکی و دینامیکی مورد بررسی	مقاله پژوهشی کامل
قرار گرفته و ساختار ربات با استفاده از الگوریتم بهینهسازی زنبور عسل چندهدفه بهینه میشود. پس از تشریح ساختار و تعیین پارامترهای	دريافت: 14 ارديبهشت 1395
هندسی سازنده ریات، روابط مربوط به سینماتیک معکوس آن استخراج شده و ماترس ژاکوین که ارتباطدهنده میان مؤلفههای بردار ساعت	پذیرش: 21 مرداد 1395 1200 - 21
	ارائه در سایت: 21 شهریور 1395
مجری نهایی و بردار سرعتهای زاویهای مفصلی است، بهدست میاید. از طریق محاسبه مجموع انرژی جنبشی اجزا ربات به صورت ضریبی از	کلید واژگان:
بردار سرعت دورانی مفاصل عمل کننده، ماتریس اینرسی استخراج میشود. معکوس عدد وضعیت سینماتیکی محلی و سراسری بر پایه ماتریس	ربات موازی هگزا
ژاکوبین بیبعد بهعنوان اندیس اندازهگیری مهارت سینماتیکی ربات منظور میشود. با تعیین ماتریس جرم بهعنوان ارتباط دهنده مؤلفههای بردار	مهارت سینماتیکی
شتاب مجری نهایی و بردار گشتاوری مفاصل عمل کننده، شاخص برآورد مهارت دینامیکی محلی و سراسری ربات ارائه میشود. با در نظر گرفتن	مهارت دینامیکی
شاخص هاي عملكادي سنماتيكي واديناميكي در فضاي كاري مكعبي بهعنوان توابع هدف، ساختار ريات هگزا با استفاده از الگوريتيم زنيور عسا	بهینهسازی چندهدفه
	الگوريتم زنبور عسل
چند هدفه، بهینه میشود. بدین منظور قیدهای هندسی مناسب شامل محدودیت حرکتی مفاصل یونیورسال و کروی، و قیدهایی برای دوری از	
موقعیتهای تکین در نظر گرفته میشوند. نمودار پارتو مربوط به بهینهسازی چندهدفه که نشاندهنده پاسخهای نامغلوب است، ارائه شده است،	
همچنین نمودارهای تأثیر تغییر پارمترهای ساختاری ربات هگزا بر مقادیر شاخصهای عملکردی سینماتیکی و دینامیکی بهینه ترسیم شده و در	
نهایت توزیع شاخصهای عملکردی در فضای کاری مورد نظر نشان داده شده است.	

Multi-objective optimization of Hexa parallel manipulator based on kinematic and dynamic indicies

Erfan Mirshekari, Afshin Ghanbarzadeh^{*}, Kourosh Heidari Shirazi

Mechanical Engineering Department, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. * P.O.B. 6135743337 Ahvaz, Iran, ghanbarzadeh.a@scu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

S. 15

ABSTRACT

Original Research Paper Received 03 May 2016 Accepted 11 July 2016 Available Online 11 September 2016

Keywords. Hexa Parallel Robot Kinematic Dexterity Dynamic Dexterity Multi-Objective Optimization Bees Algorithm

In this study, the effects of geometrical parameters of 6-DOF Hexa parallel robot on kinematic, and dynamic performance indices are investigated and its structure is optimized using the intelligent multiobjective Bees Algorithm. In this way, after describing the structure and specifying the geometrical parameters of the robot, inverse kinematic relations of the robot are obtained. Jacobian matrix that maps velocity from joint space to Cartesian space is developed. Mass matrix is obtained from calculating the total kinetic energy of the manipulator in terms of the actuated joints vector. Inverse of the homogen jacobian-based condition number is considered as an index to evaluate the kinematic dexterity. Based on mass matrix as relation between acceleration vector of the end effecter and torque vector of actuated joints, dynamic dexterity index is presented. Using the multi-objective Bees Algorithm and considering dynamic and kinematic performance indices in a pre-determined workspace as the objective functions, structure of Hexa parallel robot is optimized. In this way, the proper geometrical constraints such as limitation of universal and spherical joints, and singularity avoidance constraints are considered. Pareto front of the multi objective optimization of the robot is drawn. Diagrams of the kinematic and dynamic performance indices variation in the workspace and the effects of geometrical parameters variation on them are presented.

استفاده قرار می گیرند. این رباتها از یک صفحه متحرک تشکیل شدهاند که به وسیله تعدادی بازو به صورت موازی به صفحه ثابتی متصل می شوند. رباتهای موازی را می توان براساس درجه آزادی، تعداد بازوها، تر تیب مفاصل

رباتهای موازی به دلیل دقت مکانیابی، ظرفیت حمل بار بالا و مشخصات عملکردی دینامیکی مناسب به صورت روزافزون در کاربردهای مختلف مورد

1-مقدمه

Please cite this article using: E. Mirshekari, A. Ghanbarzadeh, K. Heidari Shirazi , Multi-objective optimization of Hexa parallel manipulator based on kinematic and dynamic indicies, *Modares Mechanical* Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 365-374, 2016 (in Persian)

به کار رفته در هر بازو و نوع عملگر تقسیمبندی کرد [1]. بر این اساس انواع مختلف رباتهای موازی 6 درجه آزادی ارائه شده است. یکی از مهم ترین انواع آنها، ربات هگزاست که به ترتیب مفاصل لولایی، یونیورسال¹ و کروی در هر بازوی آن مورد استفاده قرار گرفته است. در هر دو بازوی مجاور فاصله مفاصل لولایی دارای عملگر بر دورانی روی صفحه ثابت برابر با فاصله مفاصل کروی بر صفحه متحرک است. یکی از مهم ترین مزایای ربات هگزا این است که به دلیل نصب موتور در صفحه ثابت وزن بخشهای متحرک کمتر است و می توان از موتورهای الکتریکی بزرگ تر و ارزان تر استفاده کرد. احتمال تداخل آنها با یکدیگر به دلیل استفاده از میلههای واصل به صفحه متحرک باریکتر کاهش می یابد [2]. از دیگر مزایای مهم این نوع ربات این است که می توان آن را به صورت استاتیکی متعادل کرد [3]. البته ربات هگزا دارای معایبی مانند امکان ایجاد خمش در میلههای واصل به صفحه متحرک و تحلیل سینماتیکی پیچیدہ است.

نخستین بار ربات هگزا توسط [4] براساس ربات سه درجه آزادی دلتا [5] ارائه شد. این ربات مزایای ربات دلتا یعنی سرعت بالا را داراست، علاوهبر این دارای سه درجه آزادی دورانی نیز است [6] و در کاربردهای جابهجایی با شتاب بالا مورد استفاده قرار می گیرد. نخستین مدل از این نوع ربات توسط [7] ساخته شد. تکینگیهای سینماتیک مستقیم نوع هگزا توسط [8] بررسی شد. كاليبراسيون اين نوع ربات توسط [6] صورت گرفته است. در مرجع [9] سختی استاتیکی توسط تکینگیهای معکوس بهبود داده شد. انواع مختلف این نوع ربات با کاربریهای صنعتی ارائه شده است [1]. به طور کلی نسبت به سایر انواع شش درجه آزادی (مانند ربات استوارت با عملگر خطی هیدرولیکی) مطالعه کمتری بر این نوع ربات صورت گرفته است.

بهینهسازی پارامترهای هندسی و ساختاری، یکی از عناوین مورد علاقه محققین در حوزه رباتهای موازی است [10-11]. جهت برآورد عملکرد و بهینهسازی رباتهای موازی معیارهای زیادی ارائه شدهاند که می توان آنها را به دو دسته معیارهای سینماتیکی و دینامیکی تقسیم کرد.

یکی از مهمترین معیارهای سنجش عملکرد سینماتیکی رباتهای موازی، مهارت² است. موازی عدد وضعیت³ و توانایی تردستی⁴ [12] از پرکاربردترین شاخصهای برآورد مهارت سینماتیکی ربات است. بر این اساس مراجع بسیاری به بررسی [13] و بهینهسازی [14] رباتهای موازی پرداختند. از این شاخصها که براساس ماتریس ژاکوبین است میتوان بهعنوان تقریبی جهت اندازه گیری فاصله ربات از موقعیتهای تکین استفاده کرد. البته شاخصهای یادشده دارای مشکلاتی از لحاظ یکا و تعبیر فیزیکی هستند، زیرا درایههای ماتریس ژاکوبین دارای ابعاد یکسان نیست. از روشهایی مانند تقسیم بخشی از ماتریس ژاکوبین که دارای بعد طول است بر ضریبی با نام طول مشخصه⁵ استفاده می شود [16-15].

غيرخطى بودن مدل هاى بهدست آمده از ديناميك ربات پيش بينى عملكرد دینامیکی را با مشکل مواجه میکند. به همین دلیل روشهایی برای درک بهتر ساختار دینامیکی ارائه شدند تا تغییرات لازم برای بهبود دینامیک اعمال شود. دینامیکی مرجع [17] یکی از نخستین روشهای شرح مشخصات بود که رابطه میان انرژی سینتیک و سرعت تعمیم یافته مکانیزم را بررسی کرد و روش بيضوى اينرسى تعميميافته (GIE⁶) را ارائه داد. [18] روش بيضى

اینرسی نواری (BIE⁷) را بر پایه روش (GIE) ارائه کرد و با استفاده از این روش به تحليل ديناميكي مكانيزم افزونه⁸ پرداخت. [19] رابطه ميان شتابهای تعمیمیافته و نیروهای تعمیمیافته را بررسی کرده و روش بیضوی توانایی تردستی دینامیکی (DME⁹) را ارائه نمود. بر این اساس مراجع مختلف به بررسی و بهینهسازی ساختار رباتهای موازی پرداختند [20-20]. به دلیل پیچیدگی مدل دینامیکی ربات موازی در مقایسه با روشهای برآورد نحوه عملکرد سینماتیکی کارهای به مراتب کمتری در زمینه برآورد عملکرد ديناميكي صورت گرفته است.

بهینهسازی رباتهای موازی دارای مشکلاتی است. نخست این که این مسئله چندهدفه و چندمعیاره و براساس مشخصات عملکردی متفاوت است و گاهی مشخصات مورد نظر رابطه عکس با یکدیگر دارند. یکی دیگر از مسائل موجود وجود نداشتن ارتباط مستقیم بین مشخصات عملکردی و پارامترهای ساختاری است و حل مسائل بهینهسازی دارای چند پاسخ خواهد بود. استفاده از روشهای بهینهسازی چندهدفه پاسخهای بهتری براساس کاربردهای متفاوت ارائه میدهد. مراجع مختلف با در گرفتن همزمان شاخصهای عملکردی مختلف به بهینهسازی رباتهای موازی پرداختند [11]. توابع هدف در بهینهسازی ربات موازی، غیرخطی و دارای پارمترهای زیاد طراحی است و عملاً امکان استفاده از روشهای کلاسیک حل وجود ندارد و جهت حل این مسائل از روشهای هوشمند استفاده می شود. به منظور حل مسائل بهنهسازی چندهدفه از الگوریتمهایی مانند NSGA [22] و NSGA-II [22] و [23] كه بر پايه مفهوم جبهه پارتو استوار شدهاند، استفاده می شود. الگوريتم هوشمند زنبور عسل¹⁰ یکی از روشهای تکاملی که به تازگی ارائه شده و مورد استقبال محققين جهت حل مسائل بهينهسازى تكهدفه و چندهدفه قرار گرفته است [23].

با بررسیهای صورت گرفته مرجعی که ربات هگزا را از نظر شاخصهای عملکردی به خصوص شاخصهای دینامیکی بررسی کند، ملاحظه نشد، همچنین مسئله بهینهسازی چندهدفه ساختار این نوع ربات با منظور کردن همزمان اندیسهای دینامیکی و سینماتیکی مسئله بهینهسازی چندهدفه ربات هگزا با در نظر گرفتن قیدهای مورد نیاز و با استفاده از الگوریتمهای هوشمند بررسی نشده است. استفاده از الگوریتم هوشمند زنبور عسل چندهدفه [24] جهت حل مسئله بهینهسازی از دیگر نکات مطالعه کنونی است.

پس از تعیین پارامترهای هندسی و ساختاری ربات موازی هگزا، سینماتیک معکوس و ماتریس ژاکوبین آن استخراج می شود. انرژی جنبشی هر كدام از اجزا ربات برحسب بردار سرعت زاویه ای مفاصل لولایی دارای عملگر استخراج شده و از مجموع آنها ماتریس اینرسی ربات بهدست می آید. سپس شاخصهای برآورد مهارت سینماتیکی و دینامیکی ارائه میشوند. با معرفی روش بهینهسازی چندهدفه زنبور عسل و ارائه قیدهای مورد نیاز، نمودار پارتو مربوط به بهینهسازی چندهدفه ساختار ربات بهدستآمده و تأثیر تغییر پارامترهای ساختاری بر مشخصات عملکردی بهینه بررسی می شود.

2-تحليل مكانيكي ربات هگزا

1-2- شرح مدل ربات

¹ Universal

Dexterity Condition number

Manipulability Characteristic length

⁶ Generalized inertia ellipsoid

⁷ Belted inertia ellipsoid method

Manipulability

 ⁹ Dynamic manipulability ellipsoid
 ¹⁰ The Bees Algorithm

نمونه اولیه ربات هگزا و یک نمونه صنعتی آن در شکل 1 نشان داده شده است.

مشخصات هندسی ربات موازی هگزا در شکل 2 مشخص شده است. مطابق با این شکل، B و P به ترتیب مرکز دستگاه مختصات واصل به صفحه ثابت و صفحه متحرک است. مفاصل لولایی، یونیوسال و کروی در بازوی نام به ترتيب توسط U_i ، B_i و U_i نشان داده می شوند. طول بازوی واصل به صفحه ثابت l_1 و طول میله متصل به صفحه متحرک l_2 است. فاصله میان مفاصل لولايي مجاور بر صفحه ثابت برابر با فاصله ميان مفاصل كروى مجاور بر صفحه متحرک بوده و برابر با d است. شعاع صفحه ثابت و صفحه متحرک به ترتیب r_B و r_P زاویه قرار گیری دو مفصل بر صفحه ثابت و صفحه متحرک به ترتيب $\theta_B \, \, e_B$ است.

همان طور که ملاحظه می شود با توجه به برابر بودن فاصله میان مفاصل مجاور بر صفحه ثابت و متحرک، مقدار سه پارامتر $heta_B$ ، $heta_B$ و b از یکدیگر مستقل نیست و با تعیین یکی از آنها سایر پارمترها بهدست میآیند؛ بنابراین بردار پارامترهای مستقل ساختاری ربات هگزا مطابق با رابطه (1) در نظر گرفته می شود.

 $\gamma = [r_B \quad r_P \quad \theta_P \quad l_1 \quad l_2]$ (1)پارامتر $heta_B$ که در استخراج سینماتیک معکوس ربات مورد استفاده قرار می گیرد برحسب سایر پارمترهای هندسی از رابطه (2) به دست می آید.





Fig. 1 Hexa parallel robot [1]

شکل 1 ربات موازی هگزا [1]



Fig. 2 Geometrical parameters of the Hexa parallel robot شکل 2 پارامترهای هندسی ربات موازی هگزا

2-2-سينماتيك معكوس

در سینماتیک معکوس با داشتن مختصات مجری نهایی، مختصات متناظر مفاصل عمل كننده مورد نظر است. جهت استخراج سينماتيك معكوس ربات U_i هگزا از این نکته استفاده می شود که براساس رابطه (3) اندازه بردار واصل به P_i ثابت و برابر با l₂ است.

 $||^{B} P_{i}^{B} U_{i}|| = l_{2} i = 1,2,...,6$ (3)و U_i و U_i به ترتیب بردار موقعیت نقاط P_i و U_i نسبت به مرکز دستگاه P_i مختصات ثابت **B** است و از رابطه (4) بهدست می آیند.

 $^{B}P_{i} = ^{B}x_{P} + ^{B}R_{P} \times ^{P}P_{i}$ ^B $U_i = {}^B B_i + {}^{B_i} U_i$ (4) $^{B}R_{P}$ موقعیت مرکز صفحه متحرک نسبت مبدا مختصات ثابت است. $^{B}R_{P}$ ماتریس دوران صفحه متحرک بوده و با رابطه (5) قابل بیان است.

> cash Γςαςφ $-\mathbf{s}\alpha$

 ${}^{B}R_{P} = \left[\mathbf{c}\phi\mathbf{s}\alpha\mathbf{s}\psi - \mathbf{c}\psi\mathbf{s}\phi \quad \mathbf{c}\psi\mathbf{c}\phi + \mathbf{s}\psi\mathbf{s}\alpha\mathbf{s}\phi \right]$ sψca $[s\psi s\phi + c\psi c\phi s\alpha - c\phi s\psi + c\psi s\alpha s\phi c\psi c\alpha]$ (5) در جایی که ϕ ، ϕ و ψ به ترتیب مقادیر زوایای دوران صفحه متحرک حول محورهای x ،x و z مربوط به مختصات مرجع است. c و x نشان دهنده کسینوس و سینوس زاویه هستند. $P_i^{P_i}$ مختصات P_i نسبت به مرکز دستگاه مختصات متحرك **P** و مطابق با رابطه (6) است.

$${}^{P}P_{i} = [r_{P}\cos\theta_{Pi}, r_{P}\sin\theta_{Pi}, 0]$$
(6)

در جایی که θ_{Pi} درایه *i*ام از ماتریس θ_P به صورت رابطه (7) است.

$$\theta_{P} = \left[-\frac{\theta_{P}}{2} \quad \frac{\theta_{P}}{2} \quad \mathbf{120} - \frac{\theta_{P}}{2} \quad \mathbf{120} + \frac{\theta_{P}}{2} \\ -\mathbf{120} - \frac{\theta_{P}}{2} - \mathbf{120} + \frac{\theta_{P}}{2} \right]$$
(7)

ورت رابطه (8) تعريف مي شود.

$$^{B}B_{i} = [r_{B}\cos\theta_{Bi}, r_{B}\sin\theta_{Bi}, 0]$$

$$\theta_B = \begin{bmatrix} -\frac{\theta_B}{2} & \frac{\theta_B}{2} & 120 - \frac{\theta_B}{2} & 120 + \frac{\theta_B}{2} \\ -120 - \frac{\theta_B}{2} - 120 + \frac{\theta_B}{2} \end{bmatrix}$$
(9)

بددار موقعیت U_i نسبت به B_i بوده و براساس رابطه (10) بهدست $^{B_i}U_i$ مي آيد.

$${}^{B_i} U_i = l_1 \begin{bmatrix} \cos\theta_i \cos\theta_{Bi} \\ \cos\theta_i \sin\theta_{Bi} \\ \sin\theta_i \end{bmatrix}, \quad i = 1,2,\dots,6$$
(10)

در جایی که مطابق شکل 1، θ_i زاویه بازوی *i*ام نسبت به سطح صفحه ثابت است با تعیین بردارهای $P_i = U_i^B P_i^B$ و جای گذاری آنها در رابطه (3) معادله مثلثاتی رابطه (11) استخراج میشود.

$$a_i \cos \theta_i + b_i \sin \theta_i = c_i$$
 , $i = 1,2,...,6$ (11)
و همچنین رابطه (12) را به شرح زیر داریم.

$$a_{i} = {}^{B} P_{ix} - r_{B} \cos \theta_{Bi}$$

$$b_{i} = {}^{B} P_{iz}$$

$$c_{i} = \frac{\left({}^{B} P_{ix} - r_{B} \cos \theta_{Bi} \right)^{2} + \left({}^{B} P_{iy} - r_{B} \sin \theta_{Bi} \right)^{2} }{+ {}^{B} P_{iz}^{2} + {}^{1} {}^{2} - {}^{2} {}^{2} } \right)}{2 l_{1}}$$
(12)

و الطه (11) و الطه الحل العلم الحل (12) و $B P_i$ مؤلفه العام (12) و $B P_{ix}$ ، $B P_{ix}$ ، $B P_{ix}$ ، $B P_{ix}$ مفاصل عمل كننده از رابطه (13) استخراج مى شوند. بهینهسازی چند هدفه ساختار ربات موازی هگزا براساس شاخصهای سینماتیکی و دینامیکی

$$\theta_{i} = 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{b_{i} \pm \sqrt{b_{i}^{2} - c_{i}^{2} + a_{i}^{2}}}{a_{i} + c_{i}} \right)$$

$$i = 1,2,...,6$$
(13)

3-2-ماتريس ژاكوبين

ماتریس ژاکوبین جهت مشخص کردن ارتباط میان بردار سرعت زاویهای مفاصل عمل کننده و بردار سرعت مجری نهایی مورد استفاده قرار می گیرد. جهت استخراج ماتریس ژاکوبین، طرفین رابطه (3) به توان 2 رسانده می شود و رابطه (14) را به شرح زیر خواهیم داشت.

$${}^{(B)}P_i - {}^{B)}U_i {}^{(T)} {}^{(B)}P_i - {}^{B)}U_i {}^{(T)} = {}^{l_2} {}^{2}$$

$$i = 1, \dots, 6$$
(14)

با جای گذاری رابطه (4) در رابطه (14) و مشتق گیری از این عبارت، رابطه (15) بهدست می آید.

$$\lambda_i^{TB} \dot{x}_p + \lambda_i^{TB} \dot{R}_p^{P} P_i - \lambda_i^{TB_i} \dot{U}_i = \mathbf{0}$$

$$i = \mathbf{12,...,6}$$
(15)

در جایی که بردار
$$\lambda_i$$
 به صورت رابطه (16) تعریف می شود.
 $\lambda_i = {}^B P_i = {}^B II_i$

$$i = 12, \dots, 6$$
 (16)
 $i = 12, \dots, 6$ (16)
 $a_{i} = \frac{B_{i}}{2}$ (18)

عبارت
$$U_i$$
 و مشیق ماتریس چرخش R_p از روابط (۱۵,۱۱) به دست میآیند.

$${}^{B_i}\dot{U}_i = l_1\dot{\theta}_i \begin{bmatrix} -\sin\theta_i\cos\theta_{Bi} \\ -\sin\theta_i\sin\theta_{Bi} \\ \cos\theta_i \end{bmatrix}, \quad i = 1,2,\dots,6$$
(17)

$${}^{B}\dot{R}_{P} = \begin{vmatrix} \mathbf{0} & -\dot{\alpha} & \phi \\ \dot{\alpha} & \mathbf{0} & -\dot{\psi} \\ -\dot{\phi} & \dot{\psi} & \mathbf{0} \end{vmatrix} {}^{B}R_{P}$$
(18)

با جایگذاری روابط (18،17) در رابطه (15)، رابطه (19) استخراج میشود. $\lambda_i^{TB} \dot{x}_P + (({}^B R_P{}^P P_i) \times \lambda_i)^T \omega_P = \lambda_{ai} \dot{\theta}_i$

$$i = 12, \dots, 6$$
 (19)

$${}^{B}x_{p} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \]^{\mathrm{T}} \& \omega_{p} = [\dot{\theta} \ \dot{\phi} \ \dot{\psi}]^{\mathrm{T}}$$

$$\lambda_{qi} = \lambda_i^{\mathrm{T}} l_1 \begin{bmatrix} -\sin\theta_i \cos\theta_{Bi} \\ -\sin\theta_i \sin\theta_{Bi} \\ \cos\theta_i \end{bmatrix}$$
(20)

در نهایت ارتباط میان بردارهای سرعت در فضای کارتزین و فضای مفصلی مطابق با رابطه (21) بهدست میآید.

(21)
$$J_q \dot{\theta} = J_X \dot{X}$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$(21)$$

$$($$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} B & \dot{X}_P \\ \omega_P \end{bmatrix} ,$$

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 & \dot{\theta}_2 & \dot{\theta}_3 & \dot{\theta}_4 & \dot{\theta}_5 & \dot{\theta}_4 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$L_{i} = \left[\lambda_{i}^{\mathrm{T}} \quad \left(\left({}^{B}R_{P}^{P}P_{i}\right) \times \lambda_{i}\right)^{\mathrm{T}}\right]$$
(23)

$$\mathcal{D} = JX \quad J = J_q^{-1} J_X \tag{25}$$

3-استخراج ماتريس اينرسي

جهت استخراج ماتریس اینرسی ربات، انرژی جنبشی مجموع اجزا آن شامل

صفحه متحرک، بازوها و میلهها برحسب بردار سرعت زاویهای مفاصل عملکننده به دست میآید.

1-3-انرژی جنبشی صفحه متحرک

$$k_p = \frac{1}{2} \omega_P^{TB} I_P \omega_P + \frac{1}{2} {}^B \dot{x}_P^T m_P{}^B \dot{x}_P$$
 (26)
در جایی که m_P جرم صفحه متحرک است. I_P تانسور ممان اینرسی نسبت
به مختصات مرجع است و با فرض این که I_P ممان اینرسی حول مرکز جرم
صفحه متحرک باشد از رابطه (27) بهدست میآید.

$${}^{B}I_{P} = {}^{B}R_{P}{}^{T}I_{P}{}^{B}R_{P}$$

$$\tag{27}$$

سرعتهای خطی و زاویهای صفحه متحرک برحسب بردار سرعت زاویهای مفاصل عمل کننده با استفاده از ماتریس ژاکوبین مطابق رابطه (28) قابل بیان هستند.

$${}^{B}\dot{x}_{P} = J^{-1}{}_{(1:3;i)}\dot{\theta} , \qquad \omega_{P} = J^{-1}{}_{(4:6;i)}\dot{\theta}$$
(28)

با جایگذاری روابط (28,27) در رابطه (26)، انرژی جنبشی صفحه متحرک از رابطه (29) بهدست میآید.

$$k_{P} = \frac{1}{2} \dot{\theta}^{T} [J^{-1}_{(4:6,)}]^{T_{B}} R_{P}^{T} I_{P}^{B} R_{P} J^{-1}_{(4:6,)} + m_{P}$$

$$J^{-1}_{(1:3,)}]^{T} J^{-1}_{(1:3,)}]\dot{\theta}$$
(29)

3-2-انرژی جنبشی بازوها

انرژی جنبشی بازوی ilم که با سرعت زاویهای *θ* حول محور همجهت با مفصل لولایی دوران میکند از رابطه (30) بهدست میآید.

$$k_{ai} = \frac{1}{2} (I_a + m_a (\frac{l_1}{2})^2) \dot{\theta_i}^2$$
(30)
در جایی که *m* جرم هر بازو و *I*_a ممان اینرسی حول محور گذرنده از مرکز
جرم است. فرض می شود که مرکز جرم هر بازو در وسط میله قرار دارد.
در نهایت مجموع انرژی جنبشی بازوهای ربات به فرم ماتریسی و
برحسب بردار سرعت زاویهای مفاصل عمل کننده مطابق با رابطه (31) خواهد
بعد.

$$k_a = \frac{1}{2} \dot{\theta}^{\mathrm{T}} M_a \dot{\theta} \tag{31}$$

 M_a = diag[IM IM IM IM IM IM IM] $IM = I_a + \frac{m_a l_1^2}{4}$ (32)

3-3-انرژی جنبشی میلهها

انرژی جنبشی هر میله واصل به صفحه متحرک که ناشی سرعت خطی مرکز
جرم و دوران حول مرکز جرم است و از رابطه (33) به دست می آید.
$$k_{ri} = \frac{1}{2} \omega_{ri} {}^{TB} I_{ri} \omega_{ri} + \frac{1}{2} v_{ri} {}^{T} m_{ri} v_{ri}$$
 (33)
در جایی که $\omega_{ri} u_{ri} v_{ri}$ به ترتیب سرعت زاویه ای و سرعت خطی مرکز جرم
میله واصل به صفحه متحرک و $I_{ri} {}^{B}$ ممان اینرسی میله است که همگی
نسبت مختصات پایه منظور می شوند، همچنین m_{ri} مقدار جرم میله است.
سرعت مرکز جرم میله محرک از رابطه (34) به دست می آید.

$$v_{ri} = \omega_{ai} \times B_i U_i + \omega_{ri} \times \frac{U_i P_i}{2}$$
(34)

ww368SID.ir

_{ai} بردار سرعت زاویهای بازو نسبت به سیستم مختصات مرجع و این بردار مطابق با رابطه (35) است.

$$\omega_{ai} = R_{Bi} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{1} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \dot{\theta}_i \tag{35}$$

در جایی که ماتریس R_{Bi} ماتریس دوران از مختصات محلی واصل به محور لولایی نسبت به مختصات مرجع است. بردار سرعت زاویهای بازو به صورت ضریبی از بردار سرعتهای مفصلی $\hat{\theta}$ را میتوان به صورت رابطه (36) نوشت. $\omega_{ai} = I_{ai} \omega_{ai} \delta_{ai} \epsilon_{ai} \delta_{ai}$

$$J_{ai}(\mathbf{c},\mathbf{k}) = \begin{cases} R_{Bi} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{1} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{3} \times \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad k = i \\ k \neq i \end{cases}$$

جهت استخراج سرعت زاویهای میله _{wri}، سرعت مطلق نقطه P_i به دو روش با استفاده از معادلات (38,37) نوشته میشود.

(36)

(11)

$$v_{P_i} = v_{U_i} + v_{P_i} U_i = \omega_{ai} \times B_i U_i + \omega_{ri} \times U_i P_i$$
(37)

$$v_{P_i} = {}^B \dot{x}_P + \omega_P \times PP_i \tag{38}$$

با مساوی قرار دادن طرفین دو معادله و ضرب خارجی طرفین در بردار *،U_iP*، بردار سرعت زاویهای میله برحسب بردار سرعتهای زاویهای عملگرها *ف* به صورت رابطه (39) خواهد بود.

$$\omega_{ri} = \frac{1}{|U_i P_i|^2} (J_{ai} \dot{\theta} \times B_i U_i \times U_i P_i - J^{-1} (1:3;) \dot{\theta} \times U_i P_i - J^{-1} (4:6;) \dot{\theta} \times PP_i \times U_i P_i)$$
(39)
$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39)$$

$$(39$$

عمل کننده مطابق رابطه (40) است. $\omega_{ri} = J_{ri}\dot{\theta}$

$$J_{ri} = \frac{1}{|U_i P_i|^2} [[\times U_i P_i]]^{-1} (1:3.) -$$

 $\begin{bmatrix} (40) \\ (40) \\ (40) \\ (410$

$$\begin{aligned} p_{ri} &= J_{ai}\dot{\theta} \times B_i U_i + J_{ri}\dot{\theta} \times \frac{U_i P_i}{2} \\ &= [-[\times B_i U_i]J_{Ui} - [\times \frac{U_i P_i}{2}]J_{ri}]\dot{\theta} \end{aligned}$$

$${}^{B}I_{ri} = R_{ri}{}^{T}I_{ri}R_{ri}$$

$$\tag{42}$$

در جایی که _{Rri} ماتریس دوران میله نسبت به مختصات مرجع است که به صورت رابطه (43) حاصل می شود.

$$R_{ri} = \begin{bmatrix} n_{xi} & n_{yi} & n_{zi} \end{bmatrix}$$
(43)

در جایی که محور xi در راستای میله i^lم بوده و n_{xi} بردار یکه در راستای این محور است که از رابطه (44) بهدست میآید.

$$n_{xi} = \frac{U_i P_i}{|U_i P_i|} \tag{44}$$

با تعریف بردار یکه z در جهت محور z، سایر بردارهای یکه مربوط به دستگاه مختصات واصل به مرکز جرم میله به صورت رابطه (45) نوشته میشوند.

$$n_{yi} = z \times n_{xi}$$

$$n_{zi} = n_{xi} \times n_{yi}$$
(45)

با جایگذاری روابط (40-42) در رابطه (33) انرژی جنبشی مربوط به هر میله از رابطه (46) استخراج میشود.

$$k_{ri} = \frac{1}{2} \dot{\theta}^{\mathrm{T}} J_{ri}^{\mathrm{T}} R_{ri}^{\mathrm{T}} I_{ri} R_{ri} J_{ri} \dot{\theta} + \frac{1}{2} [\dot{\theta}^{\mathrm{T}} [-[\times B_{i} U_{i}] J_{ai} - [\times \frac{U_{i} P_{i}}{2}] J_{ri}] \dot{\theta}]$$
(46)
$$[\times \frac{U_{i} P_{i}}{2}] J_{ri}]^{\mathrm{T}} m_{ri} [[-[\times B_{i} U_{i}] J_{ai} - [\times \frac{U_{i} P_{i}}{2}] J_{ri}] \dot{\theta}]$$
(46)
$$gas_{\mathrm{excur}} a_{\mathrm{od}} b_{\mathrm{excur}} a_{\mathrm{excur}} a_{\mathrm{od}} b_{\mathrm{excur}} a_{\mathrm{excur}} a_{\mathrm{excu$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x} & \frac{U_i P_i}{2} \mathbf{y}_{ri} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} m_{ri} \begin{bmatrix} -\begin{bmatrix} \mathbf{x} & B_i U_i \end{bmatrix} \mathbf{y}_{ai} - \begin{bmatrix} \mathbf{x} & \frac{U_i P_i}{2} \end{bmatrix} \mathbf{y}_{ri} \end{bmatrix} \mathbf{b} \dot{\theta}$$

$$(47)$$

در نهایت با جمع کردن روابط (47,31,29) انرژی جنبشی نهایی ربات موازی هگزا از رابطه (48) بهدست میآید.

$$E = \frac{1}{2} \dot{\theta}^{\mathrm{T}} M \dot{\theta} \tag{48}$$

$$+ \sum_{i=1}^{6} J_{ri}^{\mathrm{T}} R_{ri}^{\mathrm{T}} I_{ri} R_{ri} J_{ri} + [[-[\times B_{i} U_{i}]]_{ai} [\times \frac{U_{i} P_{i}}{2}]_{ri}]^{\mathrm{T}}$$
$$m_{ri} [[-[\times B_{i} U_{i}]]_{ai} - [\times \frac{U_{i} P_{i}}{2}]_{ri}]]$$
(49)

4-معیارهای عملکردی ربات

1-4-مهارت سينماتيكي

مهارت، توانایی مجری نهایی در انجام بسیار دقیق و آسان جابهجاییهای اختیاری بسیار کوچک حول یک نقطه در فضای کاری است. ربات در صورت داشتن مهارت بالا توانایی انجام کارهایی با دقت بالا را دارا و مناسب جهت استفاده برای مکاندهی دقیق و شبیه سازی است. همان طور که در مقدمه مقاله اشاره شد شاخصهای ارائه شده جهت برآورد مهارت ربات دارای مشکلاتی از لحاظ یکا و تعبیر فیزیکی هستند، زیرا درایه های ماتریس ژاکوبین دارای ابعاد یکسان نیست. درایه هایی از این ماتریس که دارای بعد طول است جهت بی بعد سازی ماتریس ژاکوبین بر طول مشخصه تقسیم می شوند. این طول مطابق با مرجع [15] برابر با شعاع صفحه متحرک منظور می شود. بر این اساس ماتریس ژاکوبین بی عد مطابق با رابطه (50) است. (50)

$$J_d = \mathbf{U}_T \quad \frac{J_R}{r_P} \mathbf{J} \tag{5}$$

در جایی که ماتریسهای _TT و _R قسمتهای انتقالی و دورانی ماتریس ژاکوبین است که ابعاد هرکدام 6×3 است.

یکی از مهم ترین شاخصهای برآورد مهارت سینماتیکی، عدد وضعیت است که نشاندهنده ارتباط میان خطای موجود در مفاصل عمل کننده و خطای مجری نهایی در فضای کارتزین است. عدد وضعیت ماتریس ژاکوبین بیبعد از رابطه (51) بهدست میآید.

$$k_{J} = \|J_{d}\| \|J_{d}^{-1}\|$$
(51)

عدد وضعيت برحسب مقادير ويژه ماتريس J_h مطابق رابطه (52) خواهد بود.

$$k_{J} = \frac{\sigma_{\max} \mathbf{O}_{d}}{\sigma_{\min} \mathbf{O}_{d}}$$
(52)

در جایی که $(\sigma_{min} (U_d) = \sigma_{min} (U_d)$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار ویژه مربوط به ماتریس ژاکوبین بیبعد است معکوس k_j بهعنوان شاخص عدد وضعیت سینماتیکی منظور می شود. در جایی که مقدار این شاخص از 0 تا 1 تغییر می کند بهترین وضعیت ربات از لحاظ مهارت سینماتیکی مربوط به

مقدار شاخص برابر با 1 است. در چنین وضعیتی ربات از لحاظ مهارت سینماتیکی ایزوتروپ خواهد بود.

شاخص ارائهشده وابسته به موقعیت مکانیزم است، به همین دلیل می توان به جای مشخص کردن شاخص در وضعیتی مشخص از شاخص وضعیت سراسری که میانگینی از شاخص عدد وضعیت در سراسر فضای کاری مورد نظر است مطابق رابطه (53) استفاده کرد.

$$\eta_j = \frac{\int_W \frac{1}{k_j} dW}{\int_W dW} = \frac{\int_W \frac{1}{k_j} dW}{W}$$
(53)

2-4-مهارت دینامیکی

(56)

(57)

(58)

دینامیک ارتباط میان سرعت و شتاب مجری نهایی با نیروها و گشتاورهای وارد بر مفاصل را بررسی میکند. این ارتباط توسط یک سری معادلات دیفرانسیل بیان میشود که همان معادلات حرکت است. معادله دینامیکی حاکم بر حرکت ربات به صورت رابطه (54) تعریف می شود.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + N(\dot{\theta}, \theta) = \tau$$
(54)

 $M(\theta)$ ماتریس اینرسی، $N(\dot{\theta}, \theta)$ بخش های ناشی از سرعت و گرانش ربات و au بردار گشتاور وارد بر مفاصل است. یکی از پارمترهای مهم عملکرد دینامیکی رباتهای موازی مهارت دینامیکی است. مهارت دینامیکی توانایی شتاب دادن به مجری نهایی در هر نقطه و جهت دلخواه در وضعیت مشخص ربات را بیان میکند. جهت استخراج شاخصی جهت اندازه گیری مهارت دینامیکی از طرفین رابطه (1) مطابق با رابطه (55) مشتق گرفته میشود. (55)

با جایگذاری رابطه (56) در رابطه (55) و صرفنظر از بخشهای غیرخطی و بخشهای وابسته سرعت [21]، رابطه (56) بهدست میآید.

 $\tau =$

مطابق با این رابطه ماتریس جرم *M*I ارتباطدهنده میان مؤلفههای شتاب مجری نهایی و بردار گشتاور وارد بر مفاصل عملکننده خواهد بود. برای استخراج شاخصی جهت اندازه گیری مهارت دینامیکی فرض می شود که اندازه بردار گشتاورهای اعمال شده بر مفاصل عملکننده مطابق با رابطه (57) کمتر از یک باشد.

$$\tau^{\mathrm{T}} \tau \leq \mathbf{1}$$

با جایگذاری رابطه (56) در رابطه (57)، رابطه (58) بهصورت زیر بهدست خواهد آمد.

$$\ddot{X}^{\mathrm{T}}(J^{\mathrm{T}}M^{\mathrm{T}}M)\ddot{X} \leq \mathbf{1}$$



Fig. 3 The acceleration ellipsoid of the robot end effecter $$\rm mathanton \ scalar \ scalar$

$$k_M = \frac{\sigma_{\max}(M/)}{\sigma_{\min}(M/)}$$
(59)

معکوس _M بهعنوان شاخص اندازه گیری مهارت دینامیکی مورد استفاده قرار می گیرد. مقدار این شاخص نیز بین 0-1 تغییر می کند. مقدار 1 نشاندهنده بهترین وضعیت از لحاظ مهارت دینامیکی است و ربات در چنین وضعیتی، ایزوتروپ دینامیکی نامیده می شود.

شاخص مهارت دینامیکی نیز مانند شاخص عدد وضعیت سینماتیکی وابسته به موقیت مجری نهایی ربات و وضعیت قرارگیری اعضاست؛ بنابراین از اندیس مهارت دینامیکی سراسری در فضای کاری مورد نظر به صورت رابطه (60) استفاده می شود.

$$\eta_M = \frac{\int_W \frac{1}{k_M} dW}{\int_W dW} = \frac{\int_W \frac{1}{k_M} dW}{W}$$
(60)

5-فضای کاری

فضای کاری مناسب یکی از مهمترین پارامترها در انتخاب ساختار رباتهای موازی است به خصوص زمانی که ربات وظیفه انتقال و جابهجایی اجسام را بر عهده گیرد. فضای کاری مجموع تمام پیکربندیهایی است که مجری نهایی با انتخاب متناسب مختصات مفاصل میتواند به آن دست یابد. عموماً فضای کاری در رباتهای موازی بسیار محدود است. این عامل یکی از مهمترین فاکتورها در طراحی است.

در مقاله کنونی توزیع شاخصهای عملکردی سینماتیکی و دینامیکی در فضای کاری مشخص مورد نظر است، از روش گسستهسازی برای استخراج فضای کاری استفاده میشود. در این روش فضا به بخشهای کوچک تر تقسیم میشود، سپس با استفاده از سینماتیک معکوس زوایای مفصلی متناظر نقاط مختلف را بهدست میآیند، اگر زوایای بهدستآمده در محدوده مجاز باشند و قیدهای اعمال شده را برآورده نمایند، آن نقطه متعلق به فضای کاری خواهد بود.

6-بهینهسازی چند هدفه

در بهینهسازی چندهدفه به جای بهدست آوردن یک پاسخ، مجموعهای از بهترین پاسخها مشخص می شوند. در چنین شرایطی معمولاً مسئله دارای بیش از یک پاسخ بهینه خواهد بود که به آنها پاسخهای بهینه پارتو¹ گفته می شود. یک مفهوم مهم در روشهای بهینهسازی مبتنیبر پارتو، مفهوم «غالب بودن²» است. مطابق شکل 4، پاسخی مانند A بر C غلبه دارد، اگر در هیچ یک از توابع هدف بهتر از C نباشد و حداقل در یک تابع هدف بهتر از آن باشد. مجموعه پاسخهایی که این شرایط را نسبت به همه پاسخها داشته باشند

¹ Parito ² Dominate



Fig. 4 Pareto frontier

شکل 4 نمودار پارتو

«جبهه پارتو » نامیده میشوند. هدف بهینهسازی چندهدفه، یافتن پاسخهای پارتو با بهدست آوردن مجموعه پاسخهای نامغلوب مسأله است.

1-6-الگوريتم زنبور عسل چندهدفه

الگوریتم زنبور عسل، یک الگوریتم جستجوی هوشمند برای حل مسائل بهینهسازی است که نخستین بار در سال 2006 ارائه شد [25]. این الگوریتم براساس شبیهسازی رفتار جستجوی غذای گروههای زنبور عسل در طبیعت است. از این الگوریتم میتوان در حل مسائل بهینهسازی تکهدفه و چندهدفه استفاده کرد. مراحل حل مسائل بهینهسازی با استفاده از الگوریتم زنبور عسل چندهدفه مبتنیبر استخراج جبهه پارتو به این شرح است [24]. 1- جمعیت اولیه بهصورت تصادفی شامل n زنبور اکتشاف در فضای جستجو تشکیل شده و مقدار توابع هدف مربوط به هر کدام از اعضا بهدست میآید. 2- اعضای جمعیت با یکدیگر از لحاظ غالب بودن مقایسه شده و بر این اساس مرتب میشوند. اعضای نامغلوب جمعیت، مجموعه پارتو را تشکیل میدهند. 3- m عضو اول حمعیت مرتب شده براساس درجه غالب بودن، بهعنوان انتخابهای برتر منظور میشوند.

4- شعاع همسایگی ngh برای هر یک از m عضو در نظر گرفته شده و nsp عضو در این شعاع همسایگی به صورت تصادفی انتخاب می شوند.

5- توابع هدف مربوط به اعضای موجود در شعاع همسایگی محاسبه شده و از لحاظ غالب بودن با یکدیگر مقایسه شده و مجموعه پارتو هر همسایگی تشکیل میشود.

6- با به توجه مجموعه پارتو هر همسایگی، بهترین عضو با عضو مرکزی جایگزین می شود.

7- مجموعه پارتو کلی با توجه به تغییرات در هر همسایگی اصلاح میشود. 8- (n-m) زنبور باقیمانده بهصورت تصادفی انتخاب میشوند.

9- جمعیت جدید تشکیل شده و مراحل 2-8، تا رسیدن به تعداد مناسب پاسخهای نامغلوب تکرار می شود.

7-فرمول بندى مسئله بهينه سازى

مسئله بهینهسازی میتواند در کل فضای کاری قابل دسترس یا در فضای کاری از پیش تعیین شده مشخصی مانند یک مکعب یا سیلندر اعمال شود. در این مطالعه هدف پیدا کردن برداری از پارامترهای ساختاری بهینه γ مطابق رابطه (1) به گونهای است که همزمان شرایط رابطه (61) را در فضای کاری مکعبی برآورده سازند، همچنین قیدهایی که در ادامه معرفی خواهند

شد باید برقرار باشند.

(61)

$$\max\{\eta_J,\eta_M\}$$

1-7-قیدهای هندسی مربوط به مسئله بهینهسازی ساختار ربات هگزا قیدهای هندسی قیدهای محدودکننده حرکت هستند که ناشی از محدودیت حرکت مفاصل و اجزا ربات است. نخستین قید منظورشده محدوده زوایای α_{i1} و α_{i2} مربوط به مفاصل کروی و یونیورسال است که به صورت رابطه (62) بیان می شود.

 $\begin{aligned} \alpha_{i1} &= \cos^{-1}(n_{l_i} \cdot n_p) , \quad 90^{\circ} < |\max(\alpha_{i1})| < 180^{\circ} \\ \alpha_{i2} &= \cos^{-1}(n_{a_i} \cdot n_{l_i}) , \quad 30^{\circ} < |\max(\alpha_{i2})| < 180^{\circ} \\ (62) \\ \alpha_{i2} &= \cos^{-1}(n_{a_i} \cdot n_{l_i}) , \quad 30^{\circ} < |\max(\alpha_{i2})| < 180^{\circ} \\ (62) \\ \alpha_{i2} &= n_{i1} \\ \alpha_{i2} &= n_{i2} \\ \alpha_{i2} &= n_{i1} \\ \alpha_{i2} &= n_{i1} \\ \alpha_{i2} &= n_{i2} \\ \alpha_{i2} &= n_{i2} \\ \alpha_{i2} &= n_{i1} \\ \alpha_{i2} &= n_{i2} \\ \alpha_{i2} &= n_{i1} \\ \alpha_{i2} &= n_{i2} \\ \alpha_{i2} &= n_{i1} \\ \alpha_{i2} &= n_{i1} \\ \alpha_{i2} &= n_{i2} \\ \alpha_{i2} &= n_{i2} \\ \alpha_{i2} &= n_{i1} \\ \alpha_{i2} &= n_{i2} \\ \alpha_{i2} &= n_{i1} \\ \alpha_{i2} &= n_{i2} \\ \alpha_{i2} &= n_{i1} \\ \alpha_{i2} &= n_{i2} \\ \alpha_{i3} &= n_{i2} \\ \alpha_{i2} &= n_{i2} \\ \alpha_{i3} &= n_{i3} \\ \alpha_{i4} &= n_{i4} \\ \alpha_{i4}$

2-7-قیدهای مربوط به تکینگی

(64)

استفاده بهعنوان شاخصی جهت بررسی تکینگی ربات موازی یکی از مهم ترین کاربردهای عدد وضعیت است. به منظور اطمینان از این که ربات موازی در هیچ نقطهای از فضای کاری به وضعیت تکین نزدیک نمی شود، قید (64) بر شاخص های محلی عدد وضعیت سینماتیکی و مهارت دینامیکی در نظر گرفته می شود.

$$\frac{1}{k_J} \ge 2$$
 & $\frac{1}{k_M} \ge .04$

3-7- محدوده تغییرات پارامترهای ساختاری ربات

محدوده تغییرات پارامترهای ساختاری ربات به گونهای منظور میشود که محدوده فضای کاری مورد نیاز، پوشش داده شود. نخست شعاع صفحه ثابت ربات $r_{\rm g}$ باید به گونهای باشد که جا برای نصب موتورها وجود داشته باشد و در مقابل نباید آن قدر بزرگ باشد که ربات حجم زیادی را اشغال کند. شعاع صفحه متحرک $r_{\rm g}$ و زاویه قرارگیری دو مفصل مجاور $q_{\rm b}$ باید در محدودهای باشند که جا برای نصب مجری نهایی و اتصال میله به صفحه متحرک وجود داشته باشد. محدوده ابعاد بازوهای واصل به صفحه ثابت $r_{\rm l}$ و میلههای واصل صفحه متحرک $s_{\rm l}$ باید به گونهای انتخاب شوند که صفحه متحرک قابلیت رسیدن به کرانههای فضای کاری را داشته باشده بانباراین محدوده تغییرات



Fig. 5 The distance between two links

شکل 5 فاصله میان دو عضو

A

پارامترهای طراحی مطابق با رابطه (65) در نظر گرفته می شود.

$$\begin{array}{l} \textbf{0.15 m} \leq r_B \leq \textbf{0.3 m} \\ \textbf{20^\circ} \leq \theta_P \leq \textbf{120^\circ} \\ \textbf{0.1 m} \leq r_P \leq \textbf{0.15 m} \\ \textbf{0.15 m} \leq l_1 \leq \textbf{0.25 m} \\ \textbf{0.2 m} \leq l_2 \leq \textbf{0.45 m} \end{array} \tag{65}$$

8-نتايج

جهت حل مسئله بهینهسازی از الگوریتم زنبور عسل با پارامترهایی مطابق با جدول 1 استفاده می شود.

شعاع بازوها و میلهها و ضخامت صفحه متحرک 0.01 متر، و جنس همه اعضا از آلومینیوم در نظر گرفته شده است. فضای کاری ربات مکعبی به طول ضلع 0.1 متر در میانه فضای کاری و در ارتفاع z=0.25 تا z=0.35 منظور شده است. نمودار پارتو مربوط به بهینهسازی چندهدفه ساختار ربات موازی هگزا مطابق با رابطه (62) و با در نظر گرفتن قیدها و محدوده پارمترهای رابطه (66-63)، در شکل 6 نشان داده شده است. نمودار پارتو با استفاده از 120 پاسخ نامغلوب با توزيع مناسبی که ملاحظه می شود استخراج شده است. مشخصات برخی از نقاط مشخص شده در جبهه پارتو که در ابتدا، انتها و میانه نمودار قرار دارند در جدول 2 آورده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود رباتی با مشخصات نقطه 1 دارای بهترین وضعیت از لحاظ مهارت دینامیکی است و میتوان در کاربردهایی با شتاب بالا از آن استفاده کرد، همچنین رباتی با ویژگیهای نقطه 120 دارای بهترین وضعیت مهارت سینماتیکی و مناسب جهت استفاده در کاربریهایی با دقت بالاست. از آنجا که همه پاسخهای مناسب در فضای کاری مورد نظر بهدست آمدهاند می توان متناسب با نیاز از یکی از آنها استفاده کرد.

جهت بررسی تأثیر پارمترهای ساختاری بر مشخصههای عملکردی ربات هگزا و تعیین حدود مناسب آنها متناسب با عملکرد مورد نیاز، روند تغییر

جدول 1 پارامترهای مورد استفاده در روش زنبور عسل چندهدفه

Table 1 Parameters of the multi objective Bees Algorithm							
زه	اندا	توضيحات	پارامتر				
	150	تعداد جمعيت اوليه	n				
7	0	تعداد انتخاب های بر تر	m				
3	0	تعداد انتخابها حول انتخابهاي برتر	nsp				
	02	شعاع همسایگی برای کمیتهای از جنس طول	ngh				
	2	شعاع همسایگی دای کمیتهای از جنس زاویه	ngh				



Fig. 6 Obtained Pareto-front using the multi objective Bees Algorithm

شکل 6 نمودار پارتو بهدست آمده با استفاده از الگویتم زنبور عسل چندهدفه

جدول 2 پارامترهای مربوط به نقاط منتخب از نمودار پارتو

Table 2 Parameters of selected points of Pareto front								
l ₂ (m)	l_1 (m)	θ_P	<i>r_P</i> (m)	<i>r_B</i> (m)	η_M	η_J		
0.4492	0.2486	119.4262	0.1500	0.2152	0.0802	0.4303	1	
0.4488	0.2497	119.6254	0.1494	0.2122	0.0800	0.4319	2	
0.4464	0.2498	119.6315	0.1499	0.2120	0.0799	0.4330	3	
0.4164	0.2497	119.9856	0.1500	0.1912	0.0760	0.4490	59	
0.4162	0.2500	119.9891	0.1498	0.1912	0.0759	0.4493	60	
0.4147	0.2497	119.9809	0.1497	0.1919	0.0758	0.4495	61	
0.3773	0.2499	119.9918	0.1481	0.1701	0.0699	0.4571	118	
0.3761	0.2498	119.9858	0.1482	0.1703	0.0699	0.4572	119	
0.3727	0.2496	119.9961	0.1496	0.1698	0.0695	0.4573	120	

مقدار پارامترهای ساختاری برحسب مقدار شاخصهای عملکردی بهینه در شکلهای 7-11 نشان داده شده است.

مطابق با شکل 7، تأثیر شعاع صفحه ثابت بر شاخصهای عملکردی به گونهای است که با افزایش آن از $r_B = 0.1698$ تا $r_B = 0.2152$ شاخص مهارت دینامیکی سراسری افزایش مییابد، ولی در مقابل مقدار شاخص سراسری عدد وضعیت سینماتیکی کاهش می یابد. این پارامتر تأثیری معنادار و متقابل بر شاخص های عملکردی دارد.

روند تغییرات شعاع صفحه متحرک در شکل 8 ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می شود اگر چه پاسخهایی با شاخص عدد وضعیت سینماتیکی سراسری مناسبتر، دارای rp نسبت کمتری است، ولی به طور کلی بازه تغییرات این پارامتر کوچک بوده و مقدار آن نزدیک به انتهای بازه انتخاب شده برای این پارامتر یعنی $r_p=0.15$ است. با انتخاب این پارامتر در این حدود هر دو شاخص مهارت سینماتیکی و دینامیکی وضعیت مناسبی خواهند



Fig. 7 The evolution of r_B with respect to the variation of performance indices



Fig. 8 The evolution of r_p with respect to the variation of performance indices

شکل 8 تغییرات پارامتر r_P با تغییر شاخصهای عملکردی

با بررسی بازه تغییرات 120 $P_p < 0.61$ در شکل 9، ملاحظه می شود که اگر چه مقدار این پارامتر مربوط به تعدادی از نقاط به دست آمده با وضعیت مهارت دینامیکی مناسب در حد پایین این بازه قرار دارد، ولی به طور کلی این بازه کوچک بوده و با انتخاب پارامتر نزدیک به مقدار 120 درجه، وضعیت مهارت دینامیکی و سینماتیکی ربات مناسب خواهد بود. به بیان دیگر برای داشتن رباتی با بهترین وضعیت مهارت دینامیکی و سینماتیکی باید مفاصل کروی مربوط به دو بازوی موازی مجاور دارای بیشترین فاصله ممکن از یکدیگر باشند.

تأثیر تغییرات طول میله بازوی واصل به صفحه ثابت بر شاخصهای عملکردی بهینه در شکل 10 نشان داده شده است. ملاحظه میشود که محدوده تغییرات این پارامتر برای همه پاسخها نزدیک به حد بالایی میباشد که برای آن در نظر گرفته شده است. برای مناسب بودن همزمان مقادیر این شاخصها بهتر است که این پارامتر را نزدیک به 2.5هارا انتخاب کرد.

تغییرات طول میله واصل به صفحه متحرک با تغییر شاخصهای عملکردی بهینه در شکل 11 نشان داده شده است. مطابق شکل این پارامتر به صورت معناداری بر هر دو شاخص عملکردی مؤثر است، به طوریکه با افزایش آن از =20.3737 تا 20.4492 شاخص مهارت دینامیکی سراسری افزایش یافته، ولی در مقابل شاخص عدد وضعیت سینماتیکی سراسری کاهش می یابد.

به طور کلی میتوان گفت که باید سه پارامتر g_P r_P و I نزدیک به مقدار حد بالای بازه تغییرات خود انتخاب شوند تا ربات دارای وضعیت مناسب از لحاظ مهارت سینماتیکی و دینامیکی باشد، اما تأثیر دو پارمتر r_P و I_2 به گونهای است که افزایش آن ها سبب بهبود مهارت دینامیکی و متقابلاً کاهش مهارت سینماتیکی خواهد شد.



Fig. 9 The evolution of θ_P with respect to the variation of performance indices

شکل 9 تغییرات پارامتر $heta_p$ با تغییر شاخصهای عملکردی



Fig. 10 The evolution of l_1 with respect to the variation of performance indices

شكل 10 تغييرات پارامتر l_1 با تغيير شاخصهاى عملكردى



Fig. 11 The evolution of $l_{\rm 2}$ with respect to the variation of performance indices

شکل 11 تغییرات پارامتر l_2 با تغییر شاخصهای عملکردی

جهت بررسی توزیع شاخص عدد وضعیت سینماتیکی در فضای کاری، ربات موازی با پارامترهای ساختاری مربوط به پاسخ شماره 60 در میانه نمودار پارتو، در نظر گرفته میشود.

نمودار تغییرات شاخص عدد وضعیت در سه صفحه موازی در فضای کاری مکعبی در شکل 12 نشان داده شده است. با بررسی این شکل ملاحظه میشود که بیشترین مقدار شاخص عدد وضعیت در صفحه در فضای کاری، در میانه (mathetaic) آن رخ می دهد. همچنین میانگین مقادیر عدد وضعیت در صفحهای با بیشترین ارتفاع با مؤلفه 35.= انسبت به نقاط متناظر در صفحات پایین تر مقادیر بالاتری داشته و به مقادیر بهینه نزدیک تر است. نکته جالب این است که بیشترین مقدار عدد وضعیت مربوط به نقطهای در میانه پایین ترین صفحه 25.5 است. مقدار شاخص عدد وضعیت در این نقطه برابر با 20.51 است. مقدار شاخص عدد وضعیت در این نقطه برابر با 20.51 است. مقدار شاخص در مرکز صفحات 3.00 مح برابر با 20.51 است. همچنین ملاحظه میشود که به دلیل اعمال قید مربوط به تکینگی، هیچ نقطهای در فضای کاری در معرض تکینگی قرار نمی گیرد. کمترین مقدار عدد مربوط به گوشه انتهایی صفحه 25.05 مت

برای بررسی توزیع شاخص مهارت دینامیکی در فضای کاری، توزیع این شاخص در سه صفحه موازی در شکل 13 نشان داده شده است. برخلاف عدد وضعیت سینماتیکی، مقدار میانگین شاخص مهارت دینامیکی در صفحه پایین فضای کاری دارای بهترین مقادیر است و با افزایش ارتفاع در فضای کاری مقدار این شاخص کاهش مییابد. توزیع شاخص مهارت دینامیکی صفحات موازی نیز به گونهای است که بیشترین مقدار این شاخص مهارت مقاطی در میانه آنها رخ میدهد، به طوریکه مقدار شاخص مهارت دینامیکی در میانه مفحات 2.50=ی 0.30=ی و 2.55= به ترتیب برابر با دینامیکی در میانه مواری است.



Fig. 12 The Variation of conditioning number index in the workspace شکل 12 تغییرات شاخص عدد وضعیت در فضای کاری

Systems, Vol. 17, No. 3, pp. 159-170, 2000.

- [4] F. Pierrot, A new design of a 6-DOF parallel robot, *Robotics and Mechatronics*, Vol. 2, No. 4, pp. 308-315, 1990.
- [5] R. Clavel, a fast robot with parallel geometry, Proceedings of 18th Int Symp on Industrial Robots, Lausanne, pp. 91-100, 1988.
- [6] M. Dehghani, M. Ahmadi, A. Khayatian, M. Eghtesad, M. Yazdi, Vision-based calibration of a Hexa parallel robot, *Industrial Robot*, Vol. 41, No. 3, pp. 296-310, 2014.
- [7] M. Uchiyama, A 6 dof parallel robot HEXA, Advanced Robotics, Vol. 8, No. 6, pp. 601-601, 1993.
- [8] J. Hesselbach, C. Bier, A. Campos, H. Löwe, Direct kinematic singularity detection of a hexa parallel robot, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, pp. 3238-3243, 2005.
- [9] J. Aginaga, I. Zabalza, O. Altuzarra, J. jera, Improving static stiffness of the 6-RUS parallel manipulator using inverse singularities *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 28, No. 4, pp. 451-479, 2012.
- [10]F. Wang, Q. Chen, Q. Li, Optimal Design of a 2-UPR-RPU Parallel Manipulator, *Mechanical Design*, Vol. 137, No. 5, pp. 054501, 2015.
- [11]L. Wang, B. Zhang, J. Wu, Optimum design of a 4-PSS-PU redundant parallel manipulator based on kinematics and dynamics, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 0, No. 0, pp. 1-12, 2015.
- [12]P. Zhang, Z. Yao, Z. Du, Global performance index system for kinematic optimization of robotic mechanism, *Mechanical Design*, Vol. 136, No. 3, pp. 031001, 2014.
- [13]S. E. V. Rezania, A comparative study on the manipulability index of RRR planar manipulators, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 299-308, 2015. (in Persian نفرسی)
- [14]G. Cui, H. Zhang, F. Xu, C. Sun, Kinematics Dexterity Analysis and Optimization of 4-UPS-UPU Parallel Robot Manipulator, in: Intelligent Robotics and Applications, pp. 1-11, Netherlands: Springer, 2014.
- [15]A. M. Lopes, E. S. Pires, M. R. Barbosa, Design of a parallel robotic manipulator using evolutionary computing, *Advanced Robotic Systems*, Vol. 9, No. 26, pp. 159-178, 2012.
- [16]M. A. Hosseini, Cartesian dimensional homogeneous jacobian matrix for performance evaluation and optimization of complex dof parallel manipulator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 129-138, 2014 (in Persian (نفارسی))
- [17]H. Asada, Dynamic analysis and design of robot manipulators using inertia ellipsoids, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, pp. 94-102, 1984.
- [18]O. Khatib, Inertial properties in robotic manipulation: An objectlevel framework, *Robotics Research*, Vol. 14, No. 1, pp. 19-36, 1995.
- [19]T. Yoshikawa, Dynamic manipulability of robot manipulators, *Robotic Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 113-124, 1985.
- [20] Y. Zhao, Dynamic optimum design of a three translational degrees of freedom parallel robot while considering anisotropic property, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 29, No. 4, pp. 100-112, 2013.
- [21] J. Wu, J. Wang, T. Li, L. Wang, L. Guan, Dynamic dexterity of a planar 2DOF parallel manipulator in a hybrid machine tool, *Robotica*, Vol. 26, No. 1, pp. 93-98, 2008.
- [22]N.Srinivas, K.Deb, Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithms, *Evolutionary Computation*, Vol. 2, No. 3, pp. 221-248, 1994.
- [23]K. Deb, S. Agarwal, A. Pratap, T. Meyariva, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 182-197, 2002.
- [24]D. T. Pham, A. Ghanbarzadeh, Multi-Objective Optimisation using the Bees Algorithm, 3rd International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems, Whittles, Dunbeath, Scotland, pp. 6, 2007.
- [25]D. T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koc, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi, The Bees Algorithm a novel tool for complex optimisation problems, *Proceedings of the 2nd International Virtual Conference* on Intelligent Production Machines and Systems, Oxford, p.6, 2006.



Fig. 13 the Variation of dynamic dexterity index in the workspace شکل 13 تغییرات شاخص مهارت دینامیکی در فضای کاری

9-نتيجه گيري

در کار حاضر روندی برای طراحی و بهینه سازی چند هدفه ربات موازی شش درجه آزادی هگزا براساس شاخص های سینماتیکی و دینامیکی ارائه شد. بدین منظور سینماتیک معکوس و ماتریس ژاکوبین ربات استخراج شد. با استخراج انرژی جنبشی و ارائه روشی برای بیان آن به صورت ضریبی از بردار هرعت زاویه ای، ماتریس اینرسی به دست آمد. به دلیل رفتار غیر خطی توابع هر معن زاویه ای، ماتریس اینرسی به دست آمد. به دلیل رفتار غیر خطی توابع هرف و پارامترهای زیاد طراحی در بهینه سازی رباتهای موازی از الگوریتم موشمند زنبور عسل چندهدفه برای استخراج پاسخهای بهینه استفاده شد. نمودار پارتو به دست آمده از این روش همه پاسخهای بهینه نامغلوب را ارائه می دهد که متناسب با نیاز می توان از یکی از پاسخها ستفاده کرد. همچنین قیدهای اعمال شده این اطمینان را ایجاد می کند که ربات با پارمترهای انتخاب شده دارای مشکلی در حرکت در فضای کاری نبوده و در هیچ نقطه ای در موقعیتهای تکین قرار نخواهد گرفت.

با بررسی روند تغییرات پارامترهای ساختاری مربوط به پاسخهای بهینه ملاحظه میشود که سه پارامتر شعاع صفحه متحرک، زاویه قرار گیری مفاصل کروی بر صفحه متحرک و طول بازوی واصل به صفحه ثابت برای هر دو شاخص عدد وضعیت سینماتیکی و مهارت دینامیکی نزدیک به حد بالای بازه انتخابی برای تغییرات این پارامترهاست، اما افزایش مقادیر دو پارامتر شعاع صفحه ثابت و طول میله واصل به صفحه متحرک به صورت قابل ملاحظاهای بر شاخصهای سینماتیکی و دینامیکی موثر است به گونهای که با افزایش این دو پارامتر، مهارت دینامیکی سواسری رباتهای با ساختار بهینه افزایش و در مقابل عدد وضعیت سراسری سینماتیکی ربات کاهش می یابد.

همچنین بررسی توزیع شاخصهای عملکردی در فضای کاری مورد نظر نشان میدهد که اگر چه بیشترین مقدار شاخص عدد وضعیت مربوط به نقطه میانی صفحه پایین فضای کاری مکعبی است، ولی به طور میانگین نقاط صفحات بالایی دارای مقادیر بهتر و توزیع یکنواخت تر شاخص عدد وضعیت سینماتیکی است. در مقابل میانگین شاخص مهارت دینامیکی در سطوح پایین تر مناسب تر بوده و با بالا رفتن در فضای کاری مقدار این شاخص کاهش پیدا میکند.

10-مراجع

- J. P. Merlet, *Parallel robots*, Second Edittion, pp. 417, Netherlands: Springer, 2006.
- [2] I. A. Bonev, Geometric analysis of parallel mechanisms, PhD Thesis, Laval University, Quebec, 2002.
- [3] C. M. Gosselin, J. Wang, Static balancing of spatial six degree of freedom parallel mechanisms with revolute actuators, *Robotic*