



Position Optimization of a Redundant Haptic Device for Increasing the Simulating Virtual Damping Using Metaheuristic Methods based on Swarm Intelligence

Ahmad Mashayekhi^{1*}, Abbas Karami², Ali Zeinolabedin-Beygi³

¹Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

²Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

³MSc graduate, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 07.02.2023

Revised: 09.19.2023

Accepted: 10.29.2023

Keyword:

Haptic Device

Stability

Optimization

Artificial Bee Colony

Optimization

Crow Optimization Algorithm

Redundancy

***Corresponding Author:**

Ahmad Mashayekhi

Email:

Mashayekhi@sirjantech.ac.ir

ABSTRACT

In the present research, a three-degree-of-freedom haptic device was used to simulate a virtual object located on a point on a two-dimensional wall. Two spatial coordinates of the operating point on the wall were arbitrary. Therefore, the robot would have two degrees of freedom redundancy for this task. These two degrees of robot redundancy were specified by the artificial bee colony optimization and crow optimization algorithm in such a way that while ensuring the stability of the robot, the damping coefficient of the simulated virtual object was also maximized. The optimization process was performed in two different ways. In the first case, the stiffness of the robot was assumed to be a constant value in the whole workspace, while in the second case, the stiffness was considered a function of the robot configuration. In each case and at each operating point, first an effective mass, an effective damping coefficient, and an effective stiffness for the robot were obtained, and then using some theoretical relations, a stable operation boundary was obtained. Finally, the optimization methods specify the location of the operating point in such a way that the simulated damping coefficient was maximized. The results show that in the case of constant robot stiffness, both of the mentioned methods were able to simulate the maximum value of 1.825 for the virtual damping coefficient. However, in the case of variable robot stiffness, the crow and bee algorithms reached the values of 2502 and 2498, respectively as the maximum damping coefficient that could be simulated. In addition, although the number of cost function calculations is the same in both methods, the crow optimization algorithm was faster and more repeatable.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Haptic devices are used for simulating virtual objects via simulating force/torques for its operators. Since most real objects can be modelled by a spring and damper, the virtual objects are also modelled with discrete damper and spring. Most of the haptic devices have several degrees of freedom, enabling a good interaction between them and their users. While simulating virtual environments, vibrations are seen in the haptic device. In the case of a stable operation, these vibrations will damp but in the case of instability, the oscillations will diverge and may harm itself and even its operator. Thus, stability is a key challenge in haptic devices. If a haptic device has more degrees of freedom than the number of degrees of freedom needed to simulate a virtual object, then it can choose infinitely different arrangements for this task (based on its redundancy). These different arrangements have a great impact on the haptic device operation, the effective mass of the robot, the effective damping coefficient of the robot, the effective stiffness of the robot and the maximum amount of stiffness that can be simulated.

In this article, a three-degree-of-freedom haptic device was used to simulate a virtual object on a wall. The two redundant degrees of freedom in the robot were selected in such a way that the maximum virtual damping coefficient can be simulated by the robot. Then, in terms of the stability of haptic devices, the effective stiffness of these robots and the optimization methods of the artificial bee colony and the optimization algorithm of the crow were investigated. Finally, the desired optimization process was investigated by the methods of constant and variable stiffness of the robot and its results presented.

Methodology

A simplified model of a haptic device with an effective mass of m_d and effective viscous friction of b_d is depicted in Figure 1. These effective values depend on the configuration of the haptic device and vary with its configuration change. This haptic device is simulating a virtual object with stiffness of K_w and damping of B_w , while the sampling time and time delay in the control loop are T and t_d , respectively.

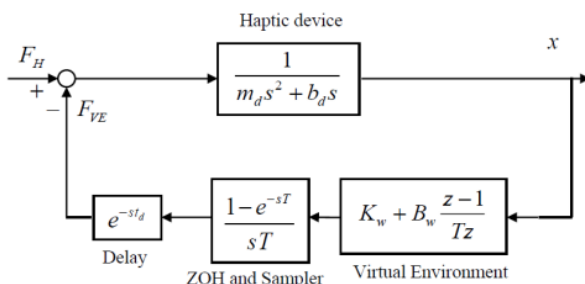


Figure 1. Schematic view of a haptic device, simulating a virtual object.

From one side, maximum value of the K_w which can be simulated by a haptic device, is limited to the stiffness of the haptic device (K_{Robot}); because in the case of $K_w > K_{Robot}$, the deflection of the haptic device will be significant compared with the penetration depth of the virtual object and thus the operator does not have a good feeling. From the other side, stability boundary of a haptic device is a function of its effective mass (m_d), effective viscous friction (b_d), sampling time (T), and time delay (t_d) as follows:

$$K_w = T\omega^2 \times \frac{m_d \omega \cos((T + t_d)\omega) + b_d \sin((T + t_d)\omega)}{\sin(T\omega)} \quad (1)$$

$$B_w = T\omega \times \frac{m_d \omega \sin((T/2 + t_d)\omega) - b_d \sin((T/2 + t_d)\omega)}{\sin(T\omega)}$$

Where K_w and B_w represent the boundary of stability of the haptic device. In this equation, ω is frequency and starts from zero to its maximum value of:

$$\omega_{max} = \frac{1}{T + t_d} \frac{(p_2 - aq_1) + \sqrt{(p_2 - aq_1)^2 - 4p_3(p_1 - a)}}{2(a - p_1)}$$

$$a = \frac{m_d}{(b_d(T + t_d))} \quad q_1 = -\pi/2 \quad p_1 = -0.4087 \quad (2)$$

$$p_3 = -0.07507 \quad p_2 = 1.325$$

Using these equations, a typical stability boundary of a haptic device can be determined and plotted as shown in Figure 2. The purpose is to maximize the B_{wmax} as shown in Figure 2. For this purpose, metaheuristic methods of artificial bee colony optimization (ABCO) and the crow search algorithm (CSA) were used to find a configuration which yields to effective values of mass, viscous and stiffness so that the maximum virtual damping can be simulated. The purpose was tracking in two different situations: (1) the stiffness of the haptic device is assumed to be constant in its workspace and (2) the stiffness of the haptic device is not constant and is determined based on its configuration.

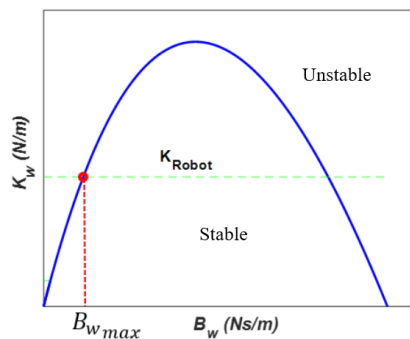


Figure 2. Stability boundary of a haptic device and stiffness of the haptic device. The goal is to maximum B_{wmax} using metaheuristic methods.

Results and discussion

First it is assumed that the stiffness of the haptic device is a constant value. The stiffness of the phantom haptic device in the middle of the working space and the orthogonal state of the links was approximately 3500 N/m. This stiffness value was considered for the total stiffness of the robot in the entire working space. In this case, the artificial bee colony method and the crow optimization algorithm select the y and z components of the working point in such a way that the B_{wmax} shown in Figure 2 is maximized. Both methods can obtain the desired spatial components with good accuracy in such a way that the simulated virtual attenuation coefficient is maximized. After the completion of the optimization process, an effective mass of 0.035 Kg and effective viscous coefficient of 0.062 Ns/m was determined by both methods, which yields to $B_{wmax}=1.825$ (Ns/m). In this case, the stability boundary is plotted as in Figure 3 (a). In the second case, it is assumed that the stiffness is not constant and is a function of the haptic device configuration. Again, the ABCO and CSA were used to find the best position which can maximums the B_{wmax} . In this case $B_{wmax}=2498$ (Ns/m) for the ABCO and $B_{wmax}=2502$ (Ns/m) for the CSA was obtained. Stability boundary of this case is plotted in Figure 3 (b).

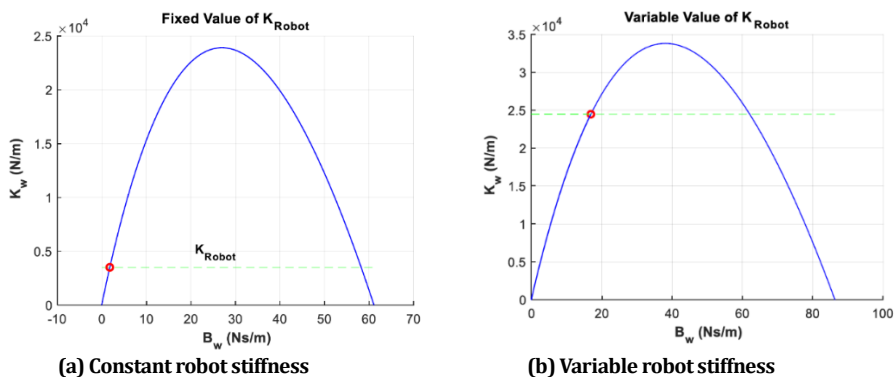


Figure 3. Output of the metaheuristic methods, in the case of constant stiffness of the haptic device.

Conclusion

In this article, using the bee colony optimization method and the crow optimization algorithm, an optimal working point for a haptic device was found. This optimal point has the feature that on the one hand, it guarantees the stability of the robot and on the other hand it maximizes the simulated virtual damping coefficient. The optimization process was carried out on the phantom haptic device and in two states of fixed and variable stiffness of the haptic device. Since the maximum stiffness that can be simulated by the tactile robot must be less than the stiffness of the tactile robot itself, the problem becomes complicated when the stiffness of the robot is variable. On the one hand, by changing the working point, the values of effective mass and viscosity change and therefore affect the stability of the system; on the other hand, the stiffness will also change. The results showed that in both mentioned cases, both the used optimization methods were able to solve the optimization problem well and the crow optimization algorithm was faster and more repeatable.



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۲۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



بهینه‌سازی موقعیت یک ربات لامسه‌ای افزونه برای افزایش ضریب میرایی مجازی قابل شبیه‌سازی با الگوریتم‌های فرا ابتکاری بر مبنای هوش جمعی

احمد مشایخی^{۱*}، عباس کریمی^۲، علی زین العابدین بیگی^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران.

۳- کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

در این مقاله از یک ربات لامسه‌ای سه درجه آزادی برای شبیه‌سازی جسمی مجازی واقع بر نقطه‌ای بر روی یک دیوار دو بعدی استفاده شده است. دو مؤلفه مکانی نقطه کاری روی دیوار دلخواه بوده و لذا این ربات دو درجه آزادی افزونه برای این کار خواهد داشت که توسط روش‌های بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی کلاغ به گونه‌ای مشخص شده‌اند تا ضمن تضمین پایداری ربات، ضریب میرایی جسم مجازی قابل شبیه‌سازی نیز بیشینه شود. فرایند بهینه‌سازی توسط هر روش در دو حالت مختلف انجام شده است. در حالت اول سفتی ربات در کل فضای کاری مقداری ثابت فرض شده و در حالت بعدی سفتی تابعی از پیکره‌بندی ربات در نظر گرفته شده است. در هر حالت، ابتدا مقادیر جرم، ضریب میرایی مؤثر و سفتی مؤثر ربات به دست آمده و سپس از روابط تئوری مرز عملکرد پایدار ربات به دست می‌آید. در نهایت روش‌های بهینه‌سازی مذکور، محل نقطه کاری را به گونه‌ای مشخص می‌کنند که ضریب میرایی قابل شبیه‌سازی بیشینه شود. نتایج نشان می‌دهند که در حالت ثابت بودن سفتی ربات، هر دو روش مذکور توانایی شبیه‌سازی مقدار بیشینه ۱/۸۲۵ را برای ضریب میرایی مجازی داشتند. حال آن‌که در حالت متغیر بودن سفتی ربات، الگوریتم کلاغ و زنبور عسل به ترتیب به مقادیر ۲۵۰۲ و ۲۴۹۸ به عنوان بیشینه ضریب میرایی قابل شبیه‌سازی رسیدند. همچنین با وجود آن‌که تعداد محاسبه تابع هزینه در هر دو روش یکسان است، اما الگوریتم بهینه‌سازی کلاغ سریع‌تر و تکرار پذیرتر است.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷

کلید واژگان:

ربات لامسه‌ای

پایداری

بهینه‌سازی

کلونی زنبور عسل مصنوعی

الگوریتم بهینه‌سازی کلاغ

افزونی

*نویسنده مسئول: احمد مشایخی

پست الکترونیکی:

Mashayekhi@sirjantech.ac.ir



مقدمه

ربات‌های لامسه‌ای^۱ برای شبیه‌سازی اجسام مجازی^۲ با کاربردهایی از قبیل آموزش جراحی [۱]، ساخت نمونه‌های مجازی و کمک به معلولین هستند [۲] (شکل ۱). از آنجایی که اغلب اجسام واقعی را می‌توان با فنر و میراگر مدل‌سازی کرد، مدل‌سازی جسم مجازی نیز با فنر مجازی^۳ (K_w) و میرایی مجازی^۴ (B_w) ممکن است. این ربات‌ها دارای زمان نمونه‌برداری^۵ ثابت T هستند و ممکن است در حلقه کنترلی آنها تأخیر زمانی t_d نیز وجود داشته باشد. این تأخیر زمانی جمع تمامی تأخیرهای زمانی ناشی از محاسبات، ارتباطات، حسگرها و عملگرهاست. سازه این ربات‌ها کاملاً صلب نیست و دارای سفتی محدود هستند.



شکل ۱. استفاده از ربات لامسه‌ای برای آموزش جراحی.

اگر رباتی لامسه‌ای دارای درجات آزادی بیش از تعداد درجات آزادی مورد نیاز برای شبیه‌سازی جسم مجازی باشد، آن‌گاه برای این کار بی‌نهایت پیکربندی^۶ مختلف می‌تواند اختیار کند. این پیکربندی‌های مختلف بر روی نحوه عملکرد ربات لامسه‌ای، جرم مؤثر ربات، ضریب میرایی مؤثر ربات، سفتی مؤثر ربات و مقدار بیشینه سفتی قابل شبیه‌سازی تأثیر به‌سزایی دارد.

اخیراً، محققان پژوهش‌های بسیاری را پیرامون پیش‌بینی و بهبودسازی پارامترها در مسائل مختلف مهندسی انجام داده‌اند [۳-۵]. برای پرداختن به مسائل پیچیده بهبودسازی در سیستم‌های مختلف، می‌توان از الگوریتم‌های ابتکاری^۷ و فرا ابتکاری^۸ (که از هوش جمعی بهره می‌برند) استفاده نمود. الگوریتم بهبودسازی کلاغ [۶]، روش بهبودسازی کلونی زنبورهای عسل مصنوعی [۷]، روش بهبودسازی گرگ خاکستری [۸؛ ۹]، روش بهبودسازی کلونی مورچه‌ها [۱۰]، الگوریتم بهبودسازی آموزش و یادگیری [۱۱]، روش بهبودسازی ازدحام ذرات [۱۲]، روش بهبودسازی ازدحام ماهی‌ها [۱۳] و روش بهبودسازی غذای باکتریایی [۱۴] چند نمونه از الگوریتم‌های هوش جمعی مشهور هستند که به‌طور کارا می‌توانند راه‌حل‌های بهینه را پیدا کنند.

1 Haptic devices
2 Virtual objects
3 Virtual stiffness
4 Virtual damping
5 Sampling time
6 Configuration
7 Heuristic
8 Meta-heuristic



شکل ۲. ربات لامسه‌ای VirSense دارای ۶ درجه آزادی و مکانیزم سری [۱].



شکل ۳. ربات لامسه‌ای Omega 6 دارای ۶ درجه آزادی و مکانیزم موازی [۱۵].

ربات‌های لامسه‌ای عموماً دارای چندین درجه آزادی و اغلب دارای مکانیزم سری هستند. لذا دارای دینامیکی غیرخطی و پیچیده بوده که تحلیل پایداری را دشوار می‌کند. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب ربات لامسه‌ای با ساختار سری و موازی را نشان می‌دهند. در مقالاتی نشان داده شده است که دینامیک چند درجه آزادی و غیرخطی ربات لامسه‌ای را می‌توان در نقطه کاری و در راستای مشخص و ثابتی ساده‌سازی نموده و با یک جرم ثابت، ویسکوز ثابت، کولومب ثابت و رزولوشن مؤثر و ثابت مدل‌سازی نمود [۱۶؛ ۱۷]؛ همچنین در تحقیق‌هایی دیده شده است که انرژی تلف شده توسط اصطکاک کولومب (اصطکاک خشک) همواره بیشتر از انرژی تولید شده در پلکانی شدن^۱ سنسورها است [۱۸-۲۰]. لذا این دو عامل غیرخطی یکدیگر را حذف کرده و مدل ساده شده یک ربات لامسه‌ای به صورت یک جرم و اصطکاک ویسکوز حاصل می‌شود. بررسی‌های تئوری و تجربی نشان داده‌اند که حضور دست کاربر، باعث افزایش محدوده عملکرد پایدار ربات لامسه‌ای می‌شود [۲۱-۲۳]. لذا برخی افراد، تحلیل پایداری سیستم لامسه‌ای را بدون در نظر گرفتن دست کاربر انجام می‌دهند تا از یک سو تحلیلی ساده‌تر داشته و از سوی دیگر به معیارهایی محتاطانه برای تعیین محدوده پایداری برسند (زیرا با توجه به اثر مثبت دست کاربر بر روی پایداری ربات لامسه‌ای، اگر ربات لامسه‌ای بدون دست کاربر پایدار باشد، آن‌گاه با حضور دست کاربر نیز پایدار خواهد بود) [۲۴-۲۸].

در این مقاله از یک ربات لامسه‌ای سه درجه آزادی برای شبیه‌سازی یک جسم مجازی روی دیواری استفاده می‌شود. مؤلفه مکانی این دیوار دارای مؤلفه X ثابت است؛ دو مؤلفه دیگر نقطه کاری (Y و Z بر روی دیوار مجازی) آزاد بوده و لذا

¹ Quantization

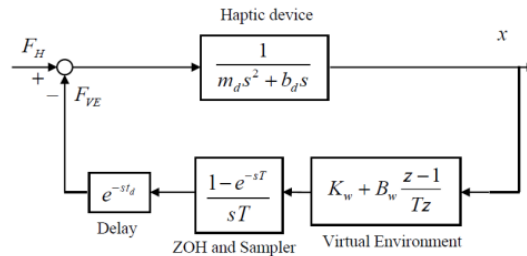
ربات دو درجه آزادی برای یافتن نقطه مورد نظر دارد. این دو درجه آزادی افزونه توسط روش‌های بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی کلاغ به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که در فضای کاری ربات باشند. پس از مشخص شدن نقطه کاری، مقادیر جرم مؤثر، اصطکاک ویسکوز مؤثر و سفتی ربات در نقطه مورد نظر تعیین شده و پایداری ربات‌های لامسه‌ای بررسی شده تا از پایداری آن اطمینان حاصل شود. سپس بیشینه ضریب میرایی مجازی قابل شبیه‌سازی به دست می‌آید. نقطه کاری توسط دو روش مذکور در دو حالت ثابت بودن سفتی ربات و متغیر بودن سفتی ربات، به گونه‌ای یافته می‌شود که ضریب میرایی قابل شبیه‌سازی بیشینه شود. در این حالت ربات لامسه‌ای قادر است طیف وسیعی از امپدانس‌های مختلف را برای کاربر شبیه‌سازی کند و محدوده پایداری آن نیز افزایش می‌یابد، که مزیت مهمی به شمار می‌رود.

ربات لامسه‌ای و پایداری آن

در شکل ۴ مدل خطی ربات لامسه‌ای نشان داده شده است. مطابق توضیحات بخش قبل، ربات لامسه‌ای را می‌توان با یک جرم (m_d) و ضریب اصطکاک میرا (b_d) مدل‌سازی نمود. در این شکل تأخیر زمانی t_d و نگهدارنده مرتبه صفر با زمان نمونه‌برداری T نیز دیده شده است و تمامی اجزا در فضای پیوسته هستند. همچنین s بیانگر عملگر لاپلاس، z بیانگر عملگر دی در فضای گسسته، K_w ضریب میرایی جسم مجازی و B_w ضریب فنر جسم مجازی هستند. برای تعیین مرز پایداری یک ربات لامسه‌ای حین شبیه‌سازی یک جسم مجازی، معادله (۱) ارائه شده است [۲۲]:

$$K_w = \frac{B_w + b_d}{2T + t_d} \quad (1)$$

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، K_w ضریب فنر جسم مجازی، B_w ضریب میرایی مجازی، b_d اصطکاک میرای ربات، T زمان نمونه‌برداری و t_d تأخیر زمانی است.



شکل ۴. مدل خطی ربات لامسه‌ای.

معادله (۱) در حالت کوچک بودن تأخیر زمانی و ضریب میرایی مجازی صادق است. معادله (۲) مرز پایداری یک ربات لامسه‌ای را بیان می‌کند که بدون محدودیت بر روی تأخیر زمانی و ضریب میرایی مجازی به دست آمده است [۲۵]:

$$K_w = T\omega^2 \times \frac{m_d\omega \cos((T + t_d)\omega) + b_d \sin((T + t_d)\omega)}{\sin(T\omega)} \quad (2)$$

$$B_w = T\omega \times \frac{m_d \omega \sin((T/2 + t_d)\omega) - b_d \sin((T/2 + t_d)\omega)}{\sin(T\omega)}$$

در این معادله ω فرکانس سیستم است. معادله (۲) مرز پایداری تئوری سیستم مورد نظر را به نمایش گذاشته است. مقدار ω طبق بازه صفر تا ω_{max} مشخص شده است؛ همچنین مقدار ω_{max} از طریق معادله (۳) مشخص شده است:

$$\omega_{max} = \frac{1}{T + t_d} \frac{(p_2 - aq_1) + \sqrt{(p_2 - aq_1)^2 - 4p_3(p_1 - a)}}{2(a - p_1)}$$

$$a = \frac{m_a}{(b_a(T + t_d))}$$

$$q_1 = -\pi/2 \quad (۳)$$

$$p_1 = -0.4087$$

$$p_2 = 1.325$$

$$p_3 = -0.07507$$

کمیت‌های a, q_1, p_1, p_2, p_3 ضرایبی کمکی هستند. در این مقاله از معادلات (۲) و (۳) برای به‌دست آوردن محدوده عملکرد پایدار سیستم استفاده شده است.

زمانی که ربات لامسه‌ای پایدار باشد، حین تماس با جسم مجازی در آن ارتعاشاتی همگرا دیده می‌شود. این در حالی است که با افزایش ضریب فنر جسم مجازی، ممکن است ربات ناپایدار شده و لذا ارتعاشاتی شدید و واگرا در آن مشاهده خواهد شد. این ارتعاشات برای ربات و حتی کاربر آن می‌تواند خطرناک باشد. اگر ضریب فنر جسم مجازی به گونه‌ای انتخاب شود که ارتعاشات ربات تقریباً دارای دامنه ثابت باشد، آنگاه ربات لامسه‌ای نه پایدار است و نه ناپایدار، لذا این مقدار ضریب فنر به عنوان مرز پایداری در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله برای تعیین محدوده پایداری ربات لامسه‌ای از همین مفهوم استفاده می‌شود.

پارامترهای مؤثر ربات لامسه‌ای

همان‌گونه که پیشتر ذکر گردید، ربات‌های لامسه‌ای عموماً دارای چندین درجه آزادی هستند؛ همچنین مشاهده شد که تحلیل‌های پایداری و نفع‌آلی ارائه شده در این زمینه، بر روی سیستم‌های یک درجه آزادی انجام شده‌اند. نحوه ساده‌سازی دینامیک چند درجه آزادی و غیرخطی ربات لامسه‌ای به دینامیکی ساده، متشکل از مقادیری ثابت برای جرم مؤثر، ضریب ویسکوز مؤثر، ضریب اصطکاک کولمب مؤثر و رزولوشن مؤثر در مرجع [۱۷] ارائه و در مرجع [۱۶] بهبود یافت. مطابق [۱۶] اگر ربات لامسه‌ای در نقطه و راستایی خاص دارای زوایای فصلی q_s باشد، مقادیر مؤثر جرم و ضریب اصطکاک ویسکوز در این نقطه از معادله (۴) به‌دست می‌آیند:

$$\Lambda_{eff} = (J_s(q_s)M^{-1}(q_s)J_s^T(q_s))^{-1} \quad (۴)$$

$$b_{eff} = \Lambda_s(J_s(q_s)M^{-1}(q_s)b(q_s))J^{-1}(q_s)$$

در معادله (۴)، A_{eff} جرم مؤثر، J_s ماتریس ژاکوبین، M ماتریس جرم و b_{eff} ضریب میرایی مؤثر در نقطه و راستای معین هستند. در مقاله پیش رو از این روابط برای به دست آوردن مقادیر جرم و ضریب میرایی مؤثر استفاده می‌شود. ربات لامسه‌ای مانند هر ربات دیگری کاملاً صلب نیست و دارای سفتی محدود و مشخص است. این سفتی به دلیل انعطاف‌پذیری لینک‌های سازنده ربات، محدود بودن گشتاور اعمالی توسط موتورها، کنترلر موتور و غیره است. در این مقاله ربات لامسه‌ای فانتوم انتخاب شده که حالت متعادل بودن لینک‌ها بر یکدیگر، دارای سفتی ۳۵۰۰ نیوتن بر متر است [۲۹]؛ از طرفی برای به دست آوردن سفتی مؤثر یک ربات سری در نقطه و راستایی خاص، روندی مدون در مرجع [۳۰] ارائه و در مقاله پیش رو نیز این روش استفاده شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی^۱

این روش در سال ۲۰۰۵ توسط کارابوگا ارائه شد [۳۱]. این الگوریتم با استفاده از رفتار کاوشی زنبورها، مسائل مختلف بهینه‌سازی بدون محدودیت را حل می‌کند. در یک کلونی زنبور عسل مصنوعی سه گروه زنبور وجود دارد: زنبورهای کارگر، زنبورهای پیشاهنگ، زنبورهای تماشاگر. زنبورهای تماشاگر در کندو منتظر می‌مانند تا اطلاعاتی را که زنبورهای کارگر در مورد شهد گل به کندو آورده‌اند دریافت کرده و در جستجوهای آبی مورد استفاده قرار دهد. زنبور پیشاهنگ نیز جزو دسته‌ای از زنبورها است که اطراف کندو را به صورت اتفاقی جستجو می‌کند. هر شهد مانند یک جواب برای حل مسئله بهینه‌سازی است. میزان کیفیت شهد، میزان بهینه بودن جواب را مشخص می‌کند. در این الگوریتم تعدادی زنبور برای یافتن شهد به صورت تصادفی به مکان‌های مختلف می‌روند (زنبورهای پیشاهنگ). وظیفه زنبورهای کارگر جستجو و کاوش است، همچنین باید ببینند در چه مکانی شهد بهتری وجود دارد و کیفیت آن شهد چقدر است؛ سپس خارج از کندو به صورت تصادفی یک همسایگی را انتخاب و به سمت آن حرکت کرده و شهد را به کندو می‌آورند. هر مرتبه که به کندو بازمی‌گردند، با استفاده از رقصی چرخشی اطلاعات خود با اعضای کندو در میان می‌گذارند. در این مرحله اگر شهد مناسب نباشد، آن شهد حذف می‌شود و اگر کیفیتش بالا باشد، زنبورهای دیگر نیز با احتمال بیشتری به اطراف مکان دست‌یابی به آن شهد می‌روند.

الگوریتم بهینه‌سازی کلاغ^۲

این الگوریتم روشی فرا ابتکاری و بر اساس رفتار هوشمندانه کلاغ‌ها است. کلاغ‌ها در زمان فراوانی غذا، غذای اضافه را در مکان‌هایی مخفی کرده و در صورت ضرورت آن را بازیابی می‌کنند. این روش بر این اساس استوار است که کلاغ‌ها به صورت گروهی زندگی کرده، موقعیت مخفی‌گاه‌های خود را حفظ می‌کنند، برای سرقت به دنبال هم می‌آیند و از ذخیره‌سازی خود در برابر احتمال سرقت توسط سایرین محافظت می‌کنند. بدین ترتیب یک کلاغ با تعقیب کلاغی دیگر می‌تواند به موقعیت غذای خوب (جواب بهینه) نزدیک شود و همچنین برای این که غذای خودش از دست سایر کلاغ‌ها در امان باشد، می‌تواند مسیری را به صورت عمدی اشتباه برود تا اگر کلاغی آن را تعقیب می‌کند، غذایش را نرباید و حفظ شود. نمونه‌ای از استفاده از این روش، در کاربردهای مهندسی است [۳۲].

در این مقاله روش بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی کلاغ، برای یافتن دو مؤلفه مکانی بهینه ربات لامسه‌ای استفاده شده‌اند. این موقعیت‌ها بایستی از یک سو در فضای کاری ربات باشند و از سوی دیگر با تعیین مقادیر جرم و ضریب میرایی مؤثر در آن نقطه، پایداری ربات را تضمین کند؛ همچنین سفتی ربات به گونه‌ای باشد که بیشترین مقدار ضریب میرایی مجازی قابل شبیه‌سازی باشد.

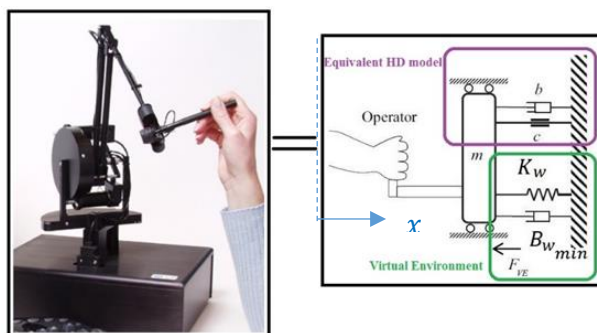
¹ Artificial Bee Colony

² Crow

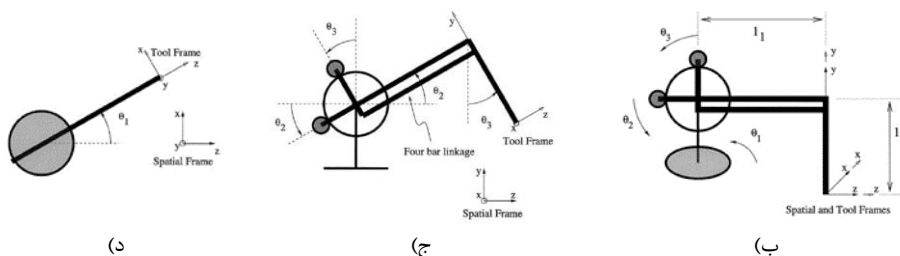
بهینه‌سازی

ربات لامسه‌ای فانتوم، یک ربات سه درجه آزادی، با سه مفصل لولایی مطابق شکل ۵ است. شکل ۵ (الف) این ربات و شماتیک سیستم معادل آن را نشان می‌دهد. محور چرخش هر یک از مفاصل، دستگاه جهانی (spatial frame) و دستگاه چسبیده به پنجه (tool frame) در شکل ۵ (ب) در پیکربندی صفر قابل رویت است. این دستگاه‌ها پس از حرکت ربات از دید بغل و بالا به ترتیب در شکل‌های ۵ (ج) و (د) نمایش داده شده‌اند. در فرایند بهینه‌سازی فرض می‌شود که ربات لامسه‌ای فانتوم در حال شبیه‌سازی یک دیوار مجازی، موازی محور X جهانی در موقعیت $X=10\text{ cm}$ است (شکل ۵). روابط سینماتیک مستقیم و معکوس و همچنین دینامیک ربات از مرجع [۲۹] استخراج می‌شوند. در هر نقطه کاری و در راستای موازی X پس از استفاده از معادلات سینماتیک معکوس، متغیرهای مفصلی به دست آمده و سپس با استفاده از معادلات (۴) مقادیر جرم مؤثر و ضریب ویسکوز مؤثر به دست می‌آیند. در هر گام از شبیه‌سازی، دو مؤلفه Y و Z روی صفحه $X=10$ حدس زده می‌شوند، سپس مطابق روندنمای نشان داده شده در شکل ۶ محاسبات و بررسی‌های مختلف انجام می‌شوند. به کمک کمینه‌سازی تابع هزینه، موقعیت Y و Z نقطه کاری که روی صفحه $X=10\text{ cm}$ قرار دارد، به صورتی پیدا می‌شود که علاوه بر قرار داشتن در فضای کاری ربات، بیشینه ضریب میرایی مجازی برای ربات قابل شبیه‌سازی باشد.

بررسی پایداری با پیاده‌سازی بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل ۴ در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب انجام می‌گردد. مطابق شکل ۷، به صورت کلی مرز پایداری یک ربات لامسه‌ای که با یک جرم و اصطکاک ویسکوز مدل شده باشد، به صورت خط آبی پر رنگ دیده می‌شود.



(الف)



(د)

(ج)

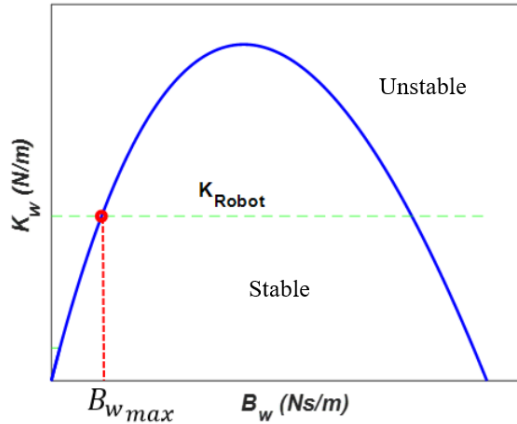
(ب)

شکل ۵. (الف) ربات لامسه‌ای فانتوم و شماتیک سیستم معادل آن، (ب) ربات و چارچوب‌های آن در پیکربندی صفر، (ج) ربات و چارچوب‌های آن پس از حرکت - دید از بغل (د) ربات و چارچوب‌های آن پس از حرکت - دید از بالا [۲۹].

در شکل ۷ مشاهده می‌شود که ابتدا با افزایش ضریب میرایی مجازی، سفتی قابل شبیه‌سازی زیاد شده و سپس رو به کاهش می‌گذارد. از سوی دیگر سفتی ربات لامسه‌ای نیز با خط چین سبز رنگ مشخص شده است. از آنجایی که شبیه‌سازی یک جسم مجازی با سفتی بیش از سفتی ربات لامسه‌ای معنا ندارد، لذا بیشینه مقدار ضریب میرایی قابل شبیه‌سازی توسط این ربات، همان دایره قرمز مشخص شده در شکل مذکور است. در این شکل مقدار ضریب میرایی متناظر با این نقطه با B_{wmax} نشان داده شده است. هدف یافتن موقعیت y و z جسم مجازی با استفاده از روش بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی و همچنین روش بهینه‌سازی کلاغ به گونه‌ای است که مقدار ضریب میرایی مجازی قابل شبیه‌سازی بیشینه باشد. بهینه‌سازی در دو حالت مختلف انجام می‌شود. ابتدا فرض می‌شود که سفتی ربات در تمامی فضای کاری ثابت باشد؛ سپس این سفتی تابعی از موقعیت مفصلی ربات فرض می‌گردد.



شکل ۶. نحوه عملکرد کد بهینه‌سازی و یافتن مقدار بیشینه ضریب میرایی مجازی قابل شبیه‌سازی.



شکل ۷. نمودار مرز پایداری ربات لامسه‌ای و سفتی ربات لامسه‌ای - با هدف بیشینه کردن $B_w \max$

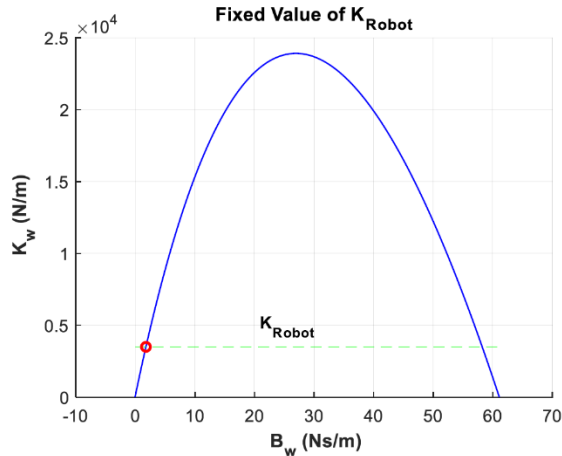
روند بهینه‌سازی در شکل ۶ ترسیم شده است. ابتدا توسط روش‌های بهینه‌سازی مورد نظر، دو مؤلفه مکانی $y-z$ از نقطه کاری حدس زده می‌شود. در مرحله بعد بررسی می‌گردد که این نقطه در محدوده فضای کاری ربات باشد؛ در غیر این صورت نقطه‌ای جدید حدس زده می‌شود. اگر نقطه مورد نظر در فضای کاری ربات باشد، با استفاده از سینماتیک معکوس ربات، متغیرهای مفصلی به‌دست می‌آیند. در ادامه دینامیک سه درجه آزادی و غیرخطی ربات، با دینامیکی یک درجه آزادی و خطی با جرم مؤثر، ضریب ویسکوز مؤثر و سفتی مؤثر به‌دست می‌آیند. با ساده‌شدن دینامیک ربات، مرز پایداری تئوری ربات لامسه‌ای از معادله (۲) به‌دست می‌آید. یافتن محل تلاقی مرز پایداری با سفتی ربات لامسه‌ای در صفحه پایداری، در مرحله بعدی انجام می‌شود. با این کار بیشینه ضریب میرایی قابل شبیه‌سازی به‌دست می‌آید؛ سپس شرط متوقف شدن الگوریتم بهینه‌سازی بررسی می‌شود. این شرط در مقاله پیش رو انجام ۳۰۰ تکرار در هر الگوریتم بهینه‌سازی است. در نهایت با برقراری شرط توقف، کد متوقف شده و خروجی بهینه مشخص می‌شود. روند ذکر شده در دو حالت انجام شده و نتایج گزارش شده‌اند: حالت اول که در آن سفتی ربات لامسه‌ای ثابت فرض شده است و حالت دوم که سفتی تابعی از پیکربندی ربات لامسه‌ای و زوایای مفصلی باشد. در هر حالت و برای استفاده از هر روش بهینه‌سازی، از تعداد ۱۵۰ جمعیت اولیه (زنبور و یا کلاغ) استفاده شده و بهینه‌سازی با ۳۰۰ تکرار انجام می‌شود.

بهینه‌سازی با فرض ثابت بودن سفتی ربات لامسه‌ای

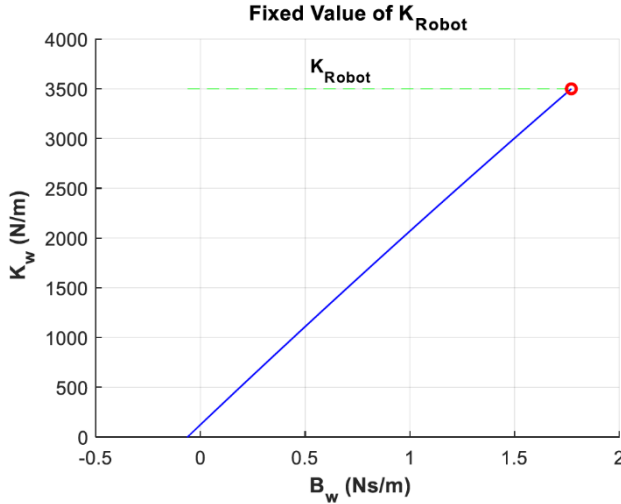
در این بخش فرض بر آن است که سفتی ربات لامسه‌ای مقداری ثابت باشد. سفتی ربات لامسه‌ای فانتوم در وسط فضای کاری و در حالت متعامد بودن لینک‌ها حدود ۳۵۰۰ نیوتن بر متر است [۲۹؛ ۳۰]. این مقدار سفتی برای کل سفتی ربات در تمام فضای کاری در نظر گرفته شده است. در این حالت روش کلونی زنبور عسل مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی کلاغ، مؤلفه‌های y و z نقطه کاری را به گونه‌ای انتخاب می‌کند تا $B_w \max$ نشان داده شده در شکل ۶ بیشینه شود. بررسی‌ها نشان می‌دهند که هر دو روش با دقت خوبی می‌توانند مؤلفه‌های مکانی مورد نظر را به گونه‌ای به‌دست آورند که ضریب میرایی مجازی قابل شبیه‌سازی بیشینه شود. پس از اتمام فرایند بهینه‌سازی مقادیر جرم و ضریب ویسکوز مؤثر در جدول ۱ و نتیجه بهینه‌سازی در شکل‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود. لازم به ذکر است به دلیل این‌که نقطه بهینه به‌دست آمده توسط هر دو روش بسیار به هم نزدیک است، لذا یک نقطه بهینه ترسیم شده است.

جدول ۱. مقادیر جرم و ضریب ویسکوز مؤثر در نقطه بهینه-در حالت ثابت بودن سفتی ربات.

جرم مؤثر (Kg)	ضریب ویسکوز مؤثر (Ns/m)
۰/۰۳۵	۰/۰۶۲



شکل ۸. خروجی در روش‌های بهینه‌سازی ذکر شده در حالت ثابت بودن ضریب سفتی ربات لامسه‌ای.



شکل ۹. نمایی نزدیک از شکل ۸.

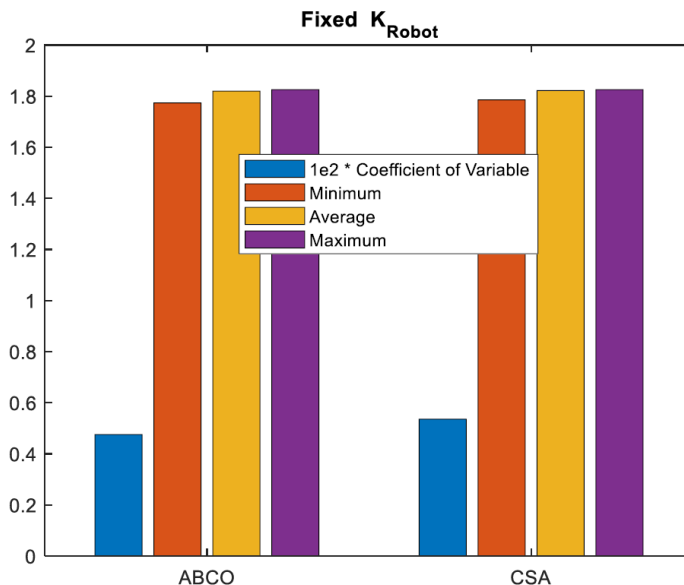
برای بررسی اثر تکرار بر روی جواب روش‌های بهینه‌سازی، با هر روش به تعداد ۵۰ تکرار مسئله بهینه‌سازی مورد نظر حل شده است. مقادیر بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف معیار (ضرب شده در 10^2) برای دو روش مذکور در شکل

۱۰ رسم شده است. مطابق شکل ۱۰ با توجه به کوچک بودن انحراف معیار، می‌توان دریافت که روش‌های ذکر شده، همواره به جواب‌های تقریباً یکسانی می‌رسند که نشان از تکرار پذیری مسئله دارد.

بنابر شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده شد که هر دو روش بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی کلاغ، به خوبی توانسته‌اند نقطه‌ای را در صفحه $X=10\text{ cm}$ پیدا کند که منجر به بیشینه شدن ضریب میرایی مجازی قابل شبیه‌سازی شده است.

برای داشتن مقایسه‌ای کمی بین نتایج دو روش بهینه‌سازی، ضریب تغییرات مطابق معادله ۵ تعریف شده است. در این معادله N تعداد دفعات انجام بهینه‌سازی توسط هر روش (که برابر با ۵۰ می‌باشد)، x_i مقدار بهینه (بیشینه ضریب میرایی مجازی) در هر تکرار و \bar{x} مقدار میانگین آن است.

$$\text{Coefficient of Variable} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}}{\bar{x}} \quad (1)$$



شکل ۱۰. مقدار بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف معیار (با ضریب) حاصل از اجرای ۵۰ تکرار الگوریتم کلونی زنبور عسل (ABCO) و الگوریتم کلاغ (CSA) در حالت ثابت بودن سفتی ربات لامسه‌ای.

قیاسی کمی بین این دو روش در جدول ۲ آمده است. در این جدول بهترین جواب (مقدار بیشینه ضریب میرایی مجازی)، ضریب تغییرات (به‌دست آمده از معادله ۵)، تعداد دفعات محاسبه شدن تابع هدف و زمان متوسط اجرای هر تکرار ذکر شده است. طبق این جدول مقدار بیشینه ضریب میرایی مجازی در هر دو روش یکسان شده است؛ در حالی که انحراف معیار و زمان اجرای هر کد بهینه‌سازی در الگوریتم بهینه‌سازی کلاغ کمتر از روش بهینه‌سازی زنبور عسل مصنوعی است.

جدول ۲. مقادیر بهترین جواب، انحراف معیار و متوسط زمان اجرای یک بهینه‌سازی در روش‌های ذکر شده در حالت ثابت بودن سفتی ربات.

نام روش	بهترین جواب (بیشینه B_{fit})	ضریب تغییرات	تعداد محاسبه تابع هدف	متوسط زمان اجرا (ms)
زنور غسل	۱/۸۲۵	۴/۷۵	۴۰۰۱	۰/۹۲
الگوریتم کلاغ	۱/۸۲۵	۵/۳۶	۴۰۰۱	۰/۱۹

بهینه‌سازی با فرض متغیر بودن سفتی ربات لامسه‌ای

در این قسمت فرض شده است که ضریب سفتی ربات لامسه‌ای ثابت نیست؛ فرضی که به واقعیت نزدیک‌تر است. در هر نقطه و راستای مشخص، علاوه بر تغییر کردن مقادیر جرم مؤثر و ضریب ویسکوز مؤثر، سفتی ربات نیز مطابق روند شرح داده شده در مرجع [۳۰] تغییر می‌کند. برای تعیین ضریب سفتی ربات در هر نقطه و راستای مشخص، ابتدا ماتریس نرمی مفاصل، در فضای مفصلی (q) به صورت C_q تعریف می‌شود که یک ماتریس قطری و 3×3 بوده که روی قطر اصلی آن نرمی (معکوس سفتی) مفاصل قرار دارد. سپس با معادله زیر این ماتریس نرمی از فضای مفصلی به فضای کارترین تصویر می‌شود [۳۰]:

$$C_X = J(q)C_qJ^T(q) \quad (۶)$$

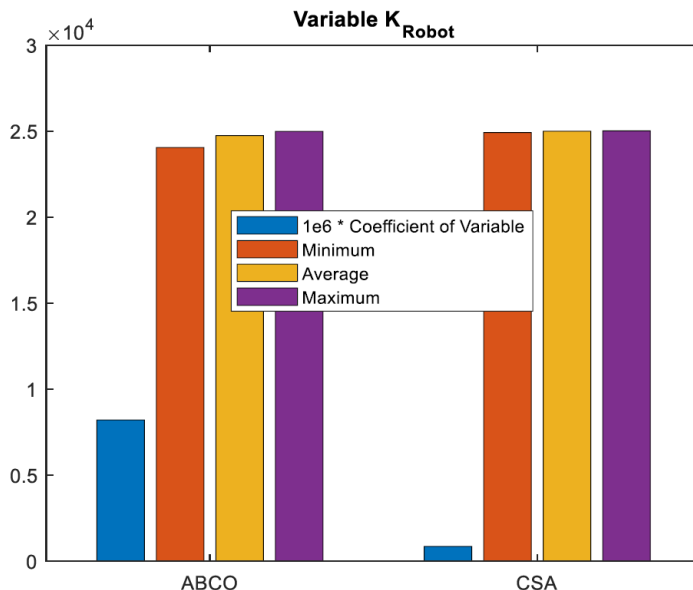
که در آن $J(q)$ ژاکوبین ربات است. برای آن که ماتریس نرمی و میزان سفتی فنر ربات در چارچوب جهانی باشد، بایستی این ژاکوبین نیز در چارچوب جهانی باشد. ماتریس C_X یک ماتریس 3×3 است و در نهایت سفتی ربات در راستاهای مختلف از معادله ۷ حاصل می‌شود:

$$K_{xx} = 1/C_{X11}$$

$$K_{yy} = 1/C_{X22} \quad (۲)$$

$$K_{zz} = 1/C_{X33}$$

که در آن K_{xx} ، K_{yy} و K_{zz} به ترتیب میزان سفتی ربات در راستاهای جهانی X ، Y و Z هستند. در این قسمت با فرض متغیر بودن میزان سفتی ربات، مانند قبل از دو روش بهینه‌سازی کلونی زنبور غسل مصنوعی و همچنین الگوریتم بهینه‌سازی کلاغ استفاده شده و هر روش ۵۰ تکرار برای به‌دست آوردن موقعیت بهینه داشته است. قیاسی آماری از نتایج در شکل ۱۱ و قیاسی کمی‌تر و دقیق‌تر در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۱. مقدار بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف معیار (با ضریب) حاصل از اجرای ۵۰ تکرار الگوریتم کلونی زنبور عسل (ABCO) و الگوریتم کلاغ (CSA) در حالت متغیر بودن سفتی ربات لامسه‌ای.

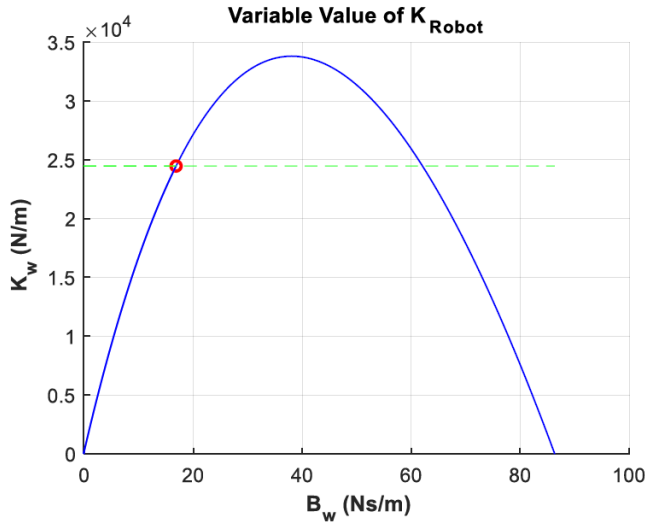
جدول ۳. مقادیر بهترین جواب، انحراف معیار و متوسط زمان اجرای یک بهینه‌سازی در روش‌های ذکر شده در حالت متغیر بودن سفتی ربات.

نام روش	بهترین جواب (بیشینه B _w)	ضریب تغییرات	تعداد محاسبه تابع هدف	متوسط زمان اجرا (ms)
زنبور عسل	۲۴۹۸	۸/۲	۴۰۰۱	۲/۰
الگوریتم کلاغ	۲۵۰۲	۰/۸۶	۴۰۰۱	۱/۱

مطابق شکل ۱۱ و جدول ۳ می‌توان دریافت که مقدار بیشینه ضریب میرایی مجازی در روش الگوریتم بهینه‌سازی کلاغ مقداری بیشتر شده است، همچنین این روش دارای ضریب تغییرات کمتر است که به معنی تکرارپذیری بهتر با این روش بهینه‌سازی می‌باشد؛ به‌علاوه، این روش متوسط زمان اجرای کمتری نیز دارد. نتیجه بهینه‌سازی و مقدار مؤثر پارامترها در نقطه بهینه در این حالت، در جدول ۴ قابل رویت است. مرز پایداری و نقطه کاری پیدا شده توسط این روش‌ها در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. در این حالت نیز به دلیل این‌که نقطه بهینه به‌دست آمده توسط هر دو روش بسیار به هم نزدیک می‌باشد، لذا یک نقطه بهینه ترسیم شده است.

جدول ۴. مقادیر جرم و ضریب ویسکوز مؤثر در نقطه بهینه-در حالت متغیر بودن سفتی ربات

جرم مؤثر (Kg)	ضریب ویسکوز مؤثر (Ns/m)	سفتی ربات (N/m)
۰/۰۴۹	۰/۱۲۰	۲۴۴۷۰



شکل ۱۲. خروجی در روش‌های بهینه‌سازی ذکر شده-در حالت متغیر بودن ضریب سفتی ربات لامسه‌ای.

از جدول ۲ و شکل‌های ۱۱ و ۱۲ می‌توان دریافت که روش بهینه‌سازی مذکور، به خوبی نقطه‌ای را پیدا کرده که در آن از یک‌سو سفتی ربات لامسه‌ای در نقطه و راستای مورد نظر زیاد شده‌است و از سوی دیگر مقادیر جرم و ضریب ویسکوز مؤثر نیز به گونه‌ای هستند که به ربات اجازه شبیه‌سازی و دست‌یابی به این نقطه کاری را می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی و همچنین الگوریتم بهینه‌سازی کلاغ، یک نقطه کاری بهینه برای یک ربات لامسه‌ای پیدا شد. این نقطه بهینه دارای این ویژگی است که از یک‌سو پایداری ربات را تضمین می‌کند و از سوی دیگر موجب بیشینه‌شدن ضریب میرایی مجازی قابل شبیه‌سازی می‌شود. فرایند بهینه‌سازی بر روی ربات لامسه‌ای فانتوم و در دو حالت ثابت بودن سفتی ربات لامسه‌ای و متغیر بودن آن انجام شد. از آنجایی که بیشینه سفتی قابل شبیه‌سازی توسط ربات لامسه‌ای، بایستی کمتر از سفتی خود ربات لامسه‌ای باشد، لذا در حالت متغیر بودن سفتی ربات مسئله دارای پیچیدگی می‌شود. از یک‌سو با تغییر نقطه کاری، مقادیر جرم و ویسکوز مؤثر تغییر کرده و لذا پایداری سیستم را مورد تأثیر قرار می‌دهد؛ از سوی دیگر سفتی نیز دست‌خوش تغییر خواهد بود. نتایج نشان داد که در هر دو حالت ذکر شده، هر دو روش بهینه‌سازی استفاده شده قادر هستند مسئله بهینه‌سازی را به خوبی حل کنند. به صورت خاص، در حالت ثابت بودن سفتی ربات، هر دو روش مذکور توانایی شبیه‌سازی مقدار بیشینه (Ns/m) $1/825$ را برای ضریب میرایی مجازی داشتند. در این حالت ضریب تغییرات در الگوریتم کلاغ و زنبور به ترتیب $5/36$ و $4/75$ و متوسط زمان اجرای هر بهینه‌سازی $0/19$ و $0/92$ ثانیه است که نشان از سرعت بیشتر روش کلاغ و همگرایی کمی بهتر روش زنبور است. حال آن‌که در حالت متغیر بودن سفتی ربات، الگوریتم کلاغ و زنبور عسل به ترتیب به مقادیر 2502 (Ns/m) و 2498 (Ns/m) به عنوان بیشینه ضریب میرایی قابل شبیه‌سازی رسیدند. مقدار ضریب تغییرات در الگوریتم کلاغ و زنبور به ترتیب $0/86$ و $8/2$ بوده که نشان از تکرارپذیری بالای روش کلاغ داد؛ همچنین زمان متوسط انجام یک بهینه‌سازی توسط روش کلاغ $1/1$ ثانیه و توسط روش زنبور 2 ثانیه است که نشان از سرعت بیشتر روش کلاغ در این حالت دارد.

References

- [1] Mashayekhi, A., Nahvi, A., Yazdani, M., Mohammadi Moghadam, M., Arbabtafti, M., & Norouzi, M. (2014). VirSense: a novel haptic device with fixed-base motors and a gravity compensation system. *Industrial Robot: An International Journal*, 41(1), 37-49. <http://doi.org/10.1108/IR-02-2013-328>
- [2] Hadi, A., & Bagherian Jafarabadi, M. A. (2017). Design and Prototyping of a Haptic User Interface based on Head Movements for Patients with Cervical Spinal Cord Injury. *Modares Mechanical Engineering*, 17(5), 52-62. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-1502-en.html>
- [3] Tahmasbi, V., Zeinolabedin Beygi, A., Elahi, S. H., & Azizi Ashtiani, M. R. (2022). Statistical modeling, optimization and sensitivity analysis of dried turning of aluminum bronze alloy. *Sādhanā*, 47(4), 232. <https://doi.org/10.1007/s12046-022-01955-7>
- [4] Aliakbari, K., Saberi, M. R., & Andalib, M. (2021). Applying Taguchi method to optimize EDM parameters on Inconel 718 super alloy. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(4), 167-186. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128402>
- [5] Khosravian Cham Piri, E. (2022). Design Optimal Adaptive Trajectory Tracking Control for Station Keeping and Attitude Control of Quadrotor Using Gray Wolf Optimization. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(3), 663-695. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.370241.2348>
- [6] Hussien, A. G., Amin, M., Wang, M., Liang, G., Alsanad, A., Gumaei, A., & Chen, H. (2020). Crow Search Algorithm: Theory, Recent Advances, and Applications. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Access*, 8, 173548-173565. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024108>
- [7] Han, Z., Chen, M., Shao, S., & Wu, Q. (2022). Improved artificial bee colony algorithm-based path planning of unmanned autonomous helicopter using multi-strategy evolutionary learning. *Aerospace Science and Technology*, 122(6), 107374. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107374>
- [8] Rabiee, A. H., Sherkatghanad, E., Zeinolabedin Beygi, A., Moslemi Naeini, H., & Lang, L. (2023). Experimental investigation and modeling of fiber metal laminates hydroforming process by GWO optimized neuro-fuzzy network. *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering*, 12(2), 193-209. <https://doi.org/10.22061/jcar.me.2022.8268.2101>
- [9] Talebi Ghadikolaee, H., Moslemi Naeini, H., Rabiee, A. H., Zeinolabedin Beygi, A., & Alexandrov, S. (2023). Experimental-numerical analysis of ductile damage modeling of aluminum alloy using a hybrid approach: ductile fracture criteria and adaptive neural-fuzzy system (ANFIS). *International Journal of Modelling and Simulation*, 43(5), 736-751. <https://doi.org/10.1080/02286203.2022.2121675>
- [10] Liu, H. (2022). Research on cloud computing adaptive task scheduling based on ant colony algorithm. *Optik*, 258, 168677. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168677>
- [11] Sherkatghanad, E., Moslemi Naeini, H., Rabiee, A. H., Zeinolabedin Beygi, A., Zal, V., & Lang, L. (2021). Modeling and Predicting the Important Properties of the PVC/Glass Fiber Composite Laminates in the Production Process by the TLBO-ANFIS Approach. *Iranian Journal of Materials Forming*, 8(4), 63-75. <https://doi.org/10.22099/ijmf.2021.41242.1190>
- [12] Peng, J., Li, Y., Kang, H., Shen, Y., Sun, X., & Chen, Q. (2022). Impact of population topology on particle swarm optimization and its variants: An information propagation

- perspective. *Swarm and Evolutionary Computation*, 69, 100990. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.100990>
- [13] Liu, Y., Feng, X., Yang, Y., Ruan, Z., Zhang, L., & Li, K. (2022). Solving urban electric transit network problem by integrating Pareto artificial fish swarm algorithm and genetic algorithm. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 26(3), 253-268. <https://doi.org/10.1080/15472450.2020.1848561>
- [14] Yang, B., Huang, X., Cheng, W., Huang, T., & Li, X. (2022). Discrete bacterial foraging optimization for community detection in networks. *Future Generation Computer Systems*, 128(3), 192-204. <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.10.015>
- [15] ForceDimension. (2022). *Force Dimension - Haptic Devices*. <https://www.forcedimension.com/products/omega>
- [16] Mashayekhi, A., Karami, A., & Siciliano, B. (2023). A New Approach for Simplifying Multi-Degree of Freedom Haptic Device Dynamics Model. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 108(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s10846-023-01857-8>
- [17] Mashaikhi, A., Shakri, M., Behbahani, S., Nahovi, A., & Kashmiri, M. (2022, February 17). *How to simplify the dynamics of several degrees of freedom of tactile robot and its effect on stability*. 6th national Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/1299211/>
- [18] Abbott, J. J., & Okamura, A. M. (2005). Effects of position quantization and sampling rate on virtual-wall passivity. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Robotics*, 21(5), 952-964. <https://doi.org/10.1109/TRO.2005.851377>
- [19] Diolaiti, N., Niemeyer, G., Barbagli, F., & Salisbury, J. K. (2006). Stability of Haptic Rendering: Discretization, Quantization, Time Delay, and Coulomb Effects. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Robotics*, 22(2), 256-268. <https://doi.org/10.1109/TRO.2005.862487>
- [20] Mashayekhi, A., Boozarjomehry, R. B., Nahvi, A., Meghdari, A., & Asgari, P. (2014). Improved passivity criterion in haptic rendering: influence of Coulomb and viscous friction. *Advanced Robotics*, 28(10), 695-706. <https://doi.org/10.1080/01691864.2014.894940>
- [21] Gil, J. J., Sanchez, E., Hulin, T., Preusche, C., & Hirzinger, G. (2009). Stability boundary for haptic rendering: Influence of damping and delay. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 9(1), 011005. <https://doi.org/10.1115/1.3074283>
- [22] Hulin, T., Albu-Schäffer, A., & Hirzinger, G. (2014). Passivity and Stability Boundaries for Haptic Systems With Time Delay. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Control Systems Technology*, 22(4), 1297-1309. <https://doi.org/10.1109/TCST.2013.2283372>
- [23] Mashayekhi, A., Behbahani, S., Ficuciello, F., & Siciliano, B. (2020). Influence of human operator on stability of haptic rendering: a closed-form equation. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 4(4), 403-415. <https://doi.org/10.1007/s41315-020-00131-6>
- [24] Mashayekhi, A., Behbahani, S., Ficuciello, F., & Siciliano, B. (2018). A novel Lyapunov function for stability of haptic device in simulating virtual objects. *Modares Mechanical Engineering*, 17(10), 367-374. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-3853-en.html>
- [25] Mashayekhi, A., Behbahani, S., Ficuciello, F., & Siciliano, B. (2018). Analytical Stability Criterion in Haptic Rendering: The Role of Damping. *Institute of Electrical and Electronics Engineers/American Society of Mechanical Engineers Transactions on Mechatronics*, 23(2), 596-603. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2797688>

- [26] Mashayekhi, A., Behbahani, S., Ficuciello, F., & Siciliano, B. (2020). Delay-Dependent Stability Analysis in Haptic Rendering. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 97(1), 33-45. <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01017-x>
- [27] Gil, J. J., Avello, A., Rubio, A., & Florez, J. (2004). Stability analysis of a 1 DOF haptic interface using the Routh-Hurwitz criterion. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Control Systems Technology*, 12(4), 583-588. <https://doi.org/10.1109/TCST.2004.825134>
- [28] Diaz, I., & Gil, J. J. (2008, May 19-23). *Influence of internal vibration modes on the stability of haptic rendering*. 2008 Institute of Electrical and Electronics Engineers International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, California, United States. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543647>
- [29] Çavuşoğlu, M. C., Feygin, D., & Tendick, F. (2002). A Critical Study of the Mechanical and Electrical Properties of the PHANToM Haptic Interface and Improvements for Highperformance Control. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11(6), 555-568. <https://doi.org/10.1162/105474602321050695>
- [30] Busson, D., Bearee, R., & Olabi, A. (2017). Task-oriented rigidity optimization for 7 DOF redundant manipulators. *International Federation of Automatic Control-PapersOnLine*, 50(1), 14588-14593. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2108>
- [31] Karaboga, D. (2005). *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*. Erciyes University. https://www.researchgate.net/publication/255638348_An_Idea_Based_on_Honey_Bee_Swarm_for_Numerical_Optimization_Technical_Report_-_TR06
- [32] Mashayekhi, M., & Yousefi, R. (2021). Topology and size optimization of truss structures using an improved crow search algorithm. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, 77(6), 779-795. <https://doi.org/10.12989/sem.2021.77.6.779>