

ارائه معیاری جدید جهت بهینه‌سازی موقعیت مفاصل مکانیزم استوارت به منظور افزایش فضای کاری و چالاکی در سیمولاتورهای پرواز

علی طاهری فر^۱ اسماعیل نجفی^۲، فرید نجفی^۳ و نصرت ا. حسینقلی ارباب^۴

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹ / ۱۱ / ۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹ / ۸ / ۲

چکیده

هدف از این مقاله تعیین موقعیت بهینه قرارگیری مفاصل مکانیزم استوارت جهت حداکثر کردن فضای کاری و چالاکی مکانیزم می‌باشد. در ابتدا، فضای کاری مکانیزم استوارت بر پایه روشی کاملاً هندسی بدست آمده و در ادامه چالاکی میانگین مکانیزم که بیانگر دور بودن فضای کاری مکانیزم از نقاط تکین می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو، بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از روش‌های هوشمند در قالب الگوریتم ژنتیک انجام شده که در هر مرحله بهینه‌سازی براساس درصدی از حداکثر شدن فضای کاری و درصدی از چالاکی مکانیزم صورت گرفته است. با مقایسه نتایج حاصل از شرایط مختلف، مشاهده می‌شود که حالت بهینه زمانی خواهد بود که تابع هزینه دارای بهره‌ای برابر از فضای کاری و چالاکی سیستم باشد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، مکانیزم استوارت، فضای کاری، چالاکی

A New Method for Optimizing the Positions of Stewart Mechanism Joints for Increasing the Workspace and Dexterity

A. Taherifar¹ E. Najafi², F. Najafi³, and N. Hosseinali-Arbab⁴

Mech. Eng. Dep't.,
Sharif Univ. of Tech.

Mech. Eng. Dep't.,
K.N. Toosi Univ. of Tech.

ABSTRACT

The optimal positions of Stewart mechanism joints are obtained using genetic algorithm to maximize the workspace and to minimize the singularity condition within the workspace at the same time. The workspace of Stewart mechanism is obtained by a fully geometric method. The volume of workspace is then calculated with numerical integration. On the other hand, the global dexterity of the workspace is studied by calculating the condition number at each point inside the workspace. Since workspace volume or dexterity is not a suitable design criterion individually, they are combined and a non-dimensional multi-objective cost function is proposed. The suggested cost function involves the ratio of variables to their maximum value. This function is presented as a criterion to reach optimal geometry for different robotic mechanisms. The workspace and the dexterity simulation results are presented. To make sure that the design requirements are achieved, a static force analysis is performed. It is shown that this optimization method increases workspace, stiffness, and dexterity at the same time.

Keywords: Optimization, Stewart Mechanism, Workspace, Dexterity

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد (نویسنده پاسخگو): najafi.e@gmail.com

^۳ دانشیار

^۴ دانشجوی دکتری

۱- مقدمه

حداقل یکی از عملگرها به یکی از محدوده‌های حرکتی خود برسد. در این تحلیل ابتدا رابطه کلی سینماتیک معکوس نوشته شده و سپس به صورت معادلات شش کره بصورت زیر تنظیم شده است (شکل ۲):

$$l_i = \|p + {}^A R_B {}^B b_i - a_i\|, \quad (1)$$

$$l_i^2 = (x_r - u_i)^2 + (y_r - v_i)^2 + (z_r - w_i)^2, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} u_i &= x_{ai} - q_{11}x_{bi} - q_{12}y_{bi} - q_{13}z_{bi}, \\ v_i &= y_{ai} - q_{21}x_{bi} - q_{22}y_{bi} - q_{23}z_{bi}, \\ w_i &= z_{ai} - q_{31}x_{bi} - q_{32}y_{bi} - q_{33}z_{bi}, \end{aligned} \quad (3)$$

که در آنها، $q_{i,j}$ همان مولفه‌ی مربوط سطر i ام و ستون j ام ماتریس دوران R می‌باشد. (x_r, y_r, z_r) مولفه‌های نقطه مرکز سکوی متحرک و $[x_{ai}, y_{ai}, z_{ai}]$ و $[x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}]^T$ بترتیب مولفه‌های مفاصل مکانیزم استوارت بر روی سکوی ثابت و متحرک می‌باشند. از آنجا که هر یک از عملگرها در محدوده کمترین و بیشترین مقدار خود در حرکت می‌باشند، می‌توان ۱۲ معادله کره بدست آورد که ناحیه مشترک این کرات همان فضای کاری مکانیزم می‌باشد [۲]. حال برای بدست آوردن مساحت، در هر مقطع افقی می‌توان روی مرزها انتگرال‌گیری کرد که بر اساس تئوری گوس-دیورژانس داریم:

$$A = \frac{1}{2} \int_{\partial Q} s \cdot n \, d\delta Q, \quad (4)$$

پس از محاسبه مساحت مقاطع موازی صفحه‌ی انتگرال-گیری عددی از مساحت این مقاطع، حجم فضای کاری محاسبه می‌گردد.

۳- تحلیل چالاکي

چالاکي مکانیزم از تجزیه و تحلیل ماتریس ژاکوبین بررسی می‌گردد [۳]، چرا که ماتریس J به عنوان ماتریس بهره عمل می‌کند و این ویژگی را می‌توان با استفاده از نرم یا حداکثر مقدار تکنیکه ماتریس J توضیح داد.

مکانیزم استوارت (شکل ۱) به دلیل دقت و سفتی بالا و دارا بودن شش درجه آزادی، قابلیت مناسبی جهت استفاده در سیمولاتورهای پروازی دارد. موقعیت مفاصل یکی از متغیر-های کلیدی مکانیزم استوارت می‌باشد به طوری که با تغییر آن مقادیر پارامترهایی چون چالاکي، حجم فضای کاری، سفتی، حداکثر نیرو و حداکثر گشتاور ربات نیز تغییر می‌کند.

فضای کاری مکانیزم‌های با نقاط اتصال مشترک نظیر MSSM, TSSM دارای حجم کمتری نسبت به مکانیزم‌های با پیکربندی بازتر نظیر SSM, Similar Symmetry Hexagons می‌باشند و احتمال برخورد پایه‌ها کمتر از مکانیزم‌های با نقاط اتصال باز بوده و سختی بالایی دارند؛ همچنین در مقابل اعمال نیرو، تغییر مکان اندکی دارند. یکی از معایب مکانیزم‌های با نقاط اتصال باز، وجود نقاط تکین در فضای کاری آنها می‌باشد.

از این رو در مقاله حاضر با تعریف یک تابع هزینه ترکیبی، موقعیت بهینه نقاط اتصال مکانیزم به گونه‌ای تعیین شده است که مزایای هر دو دسته از مکانیزم‌های ذکر شده را داشته باشد.

۲- تحلیل فضای کاری

روش معمول برای بیان فضای کاری ربات‌های موازی با بیش از ۳ درجه آزادی ثابت گرفتن ۳- n درجه آزادی آن و ترسیم فضای کاری ربات، برای درجات آزادی باقی مانده در فضای سه بعدی می‌باشد [۱]. در این مقاله از فضای کاری جهت-گیری ثابت برای استفاده در تابع هزینه مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. فضای کاری جهت‌گیری ثابت حجمی از فضا می‌باشد که مجری نهایی در یکی از موقعیت‌های زاویه-ای خود می‌تواند به آن برسد. به علاوه برای بدست آوردن فضای کاری و محاسبه حجم آن، روشی کاملاً هندسی انتخاب شد که در مقایسه با روش ناپیوسته سازی هزینه محاسباتی کمتری دارد. روش کاملاً هندسی اولین بار توسط جاسلین ارائه شد [۲]. این روش با صرفنظر از برخورد‌های مکانیکی، مرزهای فضای کاری زمانی بدست می‌آیند که

محدوده هر یک از این متغیرها با توجه به محدودیت‌های اجرایی و ساخت تعیین می‌شود (شکل ۱).

۶- تعریف تابع هزینه مناسب برای بهینه‌سازی

در مرحله اول تابع هزینه مسئله، حجم فضای کاری ربات در یک موقعیت زاویه‌ای ثابت (تمامی زوایا صفر درجه) تعریف شده و مشخصات مکانیزم مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شود، با استفاده از نرم افزار MATLAB، بعد از ۵۱ مرتبه تولید نسل و ۱۰۴۰ مرتبه تکرار تابع به ماکزیمم مقدار $1/1292 \times 10^5 \text{ mm}^3$ برای حجم فضای کاری خواهیم رسید که مقادیر متغیرها در ردیف اول جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات عملگرها و مفاصل.

عملگر خطی		مفصل یونیورسال	
مدل	طول اولیه	کورس عملگر	حداکثر زاویه مفاصل با قائم
۳۲×۲۵۰	۴۰	۲۵	۶۰

در مرحله بعد تابع هزینه چالاک می‌انگین سیستم (۱) تعریف شده که با استفاده از الگوریتم ژنتیک بعد از ۵۱ مرتبه تولید نسل و ۱۲۲۰ مرتبه تکرار، ماکزیمم مقدار ۰/۴۲۳ برای چالاک می‌انگین بدست آمده است؛ که البته مقادیر این متغیرها نیز در ردیف دوم جدول ۲ آورده شده است.

جدول (۲): نتایج بهینه سازی موقعیت مفاصل مکانیزم

استوارت.

متغیرها/تابع هزینه	R_f	R_m	q_f	q_m
حجم فضای کاری	۱۵.۰	۱۴.۲۴۵۱	۷.۴۹۹۴	۶.۵
چالاک می	۲۰.۰	۱۶.۹۲۴۸	۲.۰	۲.۰
$W_s = 70\%$, $dx = 30\%$	۱۷.۴۰۵۳	۱۷.۸۰۷۷	۲.۰۰۵۲	۳.۰۸۷۰
$W_s = 50\%$, $dx = 50\%$	۱۶.۸۷۲۲	۱۶.۷۱۲۶	۳.۸۱۳۷	۴.۲۱۷۰

روابط (۵) برای بدست آوردن حداکثر مقدار تکینه ماتریس J بکار می‌رود.

$$\lambda_{max} = \max(\text{eigenvalue}(J'J))$$

$$\lambda_{min} = \min(\text{eigenvalue}(J'J)) \quad (5)$$

$$D = \sqrt{\frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}}$$

در نهایت، چالاک می (k) بصورت زیر تعریف شده است:

$$k = \frac{1}{D} \quad (6)$$

بنابراین، حداکثر مقدار چالاک می ۱ (حالت ایزوتروپیک) و حداقل مقدار آن صفر (حالت تکینگی) خواهد بود. با افزایش چالاک می، فضای کاری مکانیزم از نقاط تکین دور می‌شود. از همین رو، میانگین چالاک می به عنوان معیاری جهت بررسی نقاط تکین در تابع هزینه لحاظ شده است.

۴- بهینه‌سازی

در میان روش‌های مختلف بهینه سازی، روش هوشمند الگوریتم ژنتیک دارای ویژگی‌های منحصر به فردی می‌باشد که آن را برای استفاده در این مسئله ممتاز می‌کند. الگوریتم ژنتیک از انتقال تصادفی و آماری استفاده کرده و به مشتقات تابع هدف نیاز ندارد و از آنجا که همزمان، با یک مجموعه از نقاط جستجو می‌کند با سرعت بهتری به جواب بهینه می‌رسد [۴].

۵- متغیرهای مسئله بهینه سازی

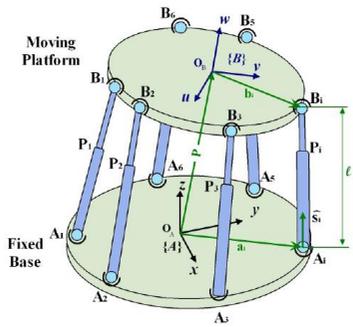
اگر موقعیت مفاصل مکانیزم را متقارن فرض کنیم، برای تعیین موقعیت بهینه مفاصل، با یک مسئله بهینه سازی چهار متغیره بصورت زیر خواهیم بود:

۱. شعاع دایره‌ای که مفاصل پایینی روی آن قرار می‌گیرند. (R_f)

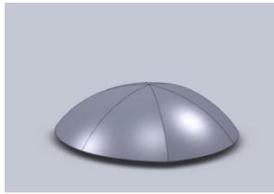
۲. شعاع دایره‌ای که مفاصل بالایی روی آن قرار می‌گیرند. (R_m)

۳. فاصله بین مفاصل پایینی (q_f) و

۴. فاصله بین مفاصل بالایی (q_m).



شکل (۱): مکانیزم استوارت.



شکل (۲): فضای کاری COW مکانیزم استوارت در Solidworks

همانطور که اشاره شد حجم فضای کاری یا چالاکی به تنهایی نمی‌تواند معیار طراحی واقع شوند. از این رو تابع هزینه‌ای تعریف شد که سهم فضای کاری مکانیزم در آن ۷۰٪ و سهم چالاکی ۳۰٪ باشد که منظور از سهم هر معیار میزان نزدیکی آن معیار به حداکثر مقدار ممکن خود در محدوده تغییرات متغیرها می‌باشد، که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$a = \frac{\text{volume}}{\text{volume}_{\max}} \times 100, \quad (7)$$

$$b = \frac{\text{dexterity}}{\text{dexterity}_{\max}} \times 100.$$

در رابطه (۷) اگر معیار حداکثر مقدار خود باشد سهم آن ۱۰۰٪ است که براین اساس تابع هزینه به صورت زیر تعریف شده و مینیمم می‌گردد:

$$\text{Cost function} = (a - ws) + (b - dx). \quad (8)$$

که در رابطه ۸، ws سهم فضای کاری مکانیزم و dx سهم چالاکی در تابع هزینه می‌باشد، که پس از ۵۱ مرتبه تولید نسل و ۱۰۶۰ مرتبه تکرار، نتایج سطر سوم جدول ۲ بدست آمده است. به صورت مشابه محاسبات برای سهم ۵۰٪ برای هر کدام از معیارها تکرار شده و نتایج آن در سطر چهارم جدول ۲ ارائه شده است.

۷- نتیجه‌گیری

در هر مرحله، بهینه‌سازی براساس درصدی از حداکثر شدن فضای کاری و درصدی از چالاکی مکانیزم صورت گرفت که با مقایسه نتایج حاصل از شرایط مختلف، مشاهده شد که بهترین حالت زمانی خواهد بود که تابع هزینه دارای بهره‌ای برابر از فضای کاری و چالاکی مکانیزم باشد که این حالت بهینه از طریق مینیمم کردن تابع ارائه شده صورت می‌گیرد.

مراجع

1. Lung-wentsai., "Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators", Awiley-Interscience Publication, 1999.
2. Gosselin, C. "Determination of the Workspace of 6-DOF Parallel Manipulators", J. Mech. Design, ASME, Vol. 113, 1991.
3. Gosselin, C. and Angeles, J. "A Global Performance Index for the Kinematic Optimization of Robotic Manipulators", J. Mech. Design, ASME, Vol. 113, 1991.