مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند ۱۳۹۳، دوره ۱٤، شماره ۱۶، ص‌ص ۳۲۱-۳۳۱

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

متعادل‌سازی ایستایی سه مکانیزم صفحه‌ای موازی سه درجه آزادی و متعادل‌سازی ایستایی با وزن متغیر

محمد همایون‌پور[۱]، مهدی طالع ماسوله[۲*]

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، آزمایشگاه تعامل انسان و ربات، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران
۲- استادیار، مهندسی مکاترونیک، آزمایشگاه تعامل انسان و ربات، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران
*تهران، صندوق پستی ۱۴۳۹۵۱۳۷۴، m.t.masouleh@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۰۸ تیر ۱۳۹۳
پذیرش: ۱۳ مرداد ۱۳۹۳
ارائه در سایت: ۲۴ آبان ۱۳۹۳

کلید واژگان:
تعادل ایستایی
مکانیزم موازی
ضدوزنه
فنر
وزن متغیر

چکیده

تعادل ایستایی از ارزشمندترین روش‌های طراحی صنعتی به شمار می‌رود. این روش جهت متعادل‌سازی ایستایی سه مکانیزم متداول صفحه‌ای سه درجه آزادی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است که در آن از فنر و ضد وزنه، که از متداول‌ترین روش‌های ایجاد تعادل ایستایی به شمار می‌روند، استفاده شده است. در این مقاله ابتدا با بیان تئوری‌های تعادل ایستایی بوسیله‌ی فنر و ضد وزنه و بررسی معادلات مربوطه، به معرفی طرح‌های پیشنهادی ایجاد تعادل ایستایی، در سه مکانیزم موازی صفحه‌ای سه درجه آزادی 3-RRR, 3-PRR و 3-RPR با وزن ثابت و سپس جرثقیل متعادل ایستایی سه درجه آزادی فضایی با وزن متغیر به کمک این روش‌ها و بهبود آن‌ها، طراحی و معرفی شده است. به عنوان نمونه عملی، مدل‌سازی مکانیزم متعادل ایستایی 3-RRR در Adams به کمک فنر و ضد وزنه انجام و در نهایت ساخت این مکانیزم در مقاله اشاره شده است. جرثقیل از تعادل ایستایی بهره می‌برد و عملگر تنها لازم است که نیروی جابجایی ضد وزنه در صفحه *XY* را تامین نماید که مشخصا از نیروی لازم جهت جابجایی بار اصلی در راستای گرانش کمتر است. از مزایای این مکانیزم‌ها می‌توان به کاهش هزینه ساخت و بهره برداری، امنیت بیشتر و کاهش قدرت عملگرها اشاره نمود.

Static Balancing of Three Parallel Planar 3-DOF Mechanisms and Static Balancing of Variable Weights

Mohammad Homayounpour[1], Mehdi Tale Masouleh[2*]

1- Department of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Department of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 143951374 Tehran, Iran. m.t.masouleh@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 29 June 2014
Accepted 04 August 2014
Available Online 15 November 2014

Keywords:
Static Balance
Parallel Mechanism
counter-weight
spring
variable weight

ABSTRACT

Static balancing is one of the most valuable strategies in manufacturing and industrial designing. This paper deals with the static balancing of parallel mechanisms. Using counter-weights and springs, and their combination, are the most popular methods in this procedure. In this article, theories and formulas of static balancing, and springs, taking into consideration the end effector with constant-weight, using counter-weights and springs are addressed. As case studies, three 3-DOF planar parallel mechanisms, namely, 3-RRR, 3-PRR and 3-RPR with constant-weight are investigated. A static balanced 3-RRR is modeled and validated in Adams software and fabricated using a combination of spring and counter-weight. This mechanism is manufactured in Human and Robot Interaction laboratory (TaarLab). Moreover, a cable parallel 3-DOF mechanism using static balancing concept is designed for which variable weight is considered at the end-effector. The crane benefits from static balancing of variable weight that causes the power actuators just use in relocation the counter-weight in *XY* plane that is obviously less than the power needed to relocate the main load across the gravity direction. The advantages of these kinds of mechanisms consist in reducing manufacturing and operation price, increasing the safety and using less power in actuators.

۱- مقدمه

دقت و چابکی مکانیزم و بحث تعادل‌های آن‌ها از جنبه استاتیکی و دینامیکی از اهمیت بسزایی برخوردار است که هر کدام از آن‌ها کاربردهای خاص خود را دارند. هدف اصلی این مطالعه تعادل ایستایی مکانیزم‌های رباتیکی می‌باشد.

تعادل ایستایی[1] از موضوعات مهم تحقیقات طی دهه‌های اخیر بوده است[۱]. تعادل ایستایی در رفتار دینامیکی می‌تواند تاثیر مثبتی داشته باشد و همچنین باعث کاهش ارتعاشات در اثر عملکرد موتورها در سیستم می‌شود. تعادل ایستایی و دینامیکی به طور وسیعی در کتب و مقالات فراوان مورد

1- Static balanced

Please cite this article using:
M. Homayounpour, M. Tale Masouleh, Static Balancing of Three Parallel Planar 3-DOF Mechanisms and Static Balancing of Variable Weights, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 321-331, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Archive of SID
www.SID.ir

بحث قرار گرفته است. مکانیزمی متعادل نیرویی نامیده می‌شود که در همه‌ی جهات، نیروهای وارد از طرف مکانیزم بر پایه، برای تمامی حرکات در نظر گرفته شده برای مکانیزم (فضای کاری) ثابت بماند[۲]. تعادل ایستایی از مسائل تاثیرگذار در زمینه‌ی صنعتی نیز به شمار می‌رود. در این فرآیند به وسیله‌ی خنثی سازی نیروی جاذبه بر مجری نهایی[1] می‌توان نیروهای وارد بر عملگرهای مکانیزم را کاهش داد و به حداقل رسانید، به طوری که جهت جابجایی در راستای جاذبه، نیروی وارد شده از عملگر تنها وظیفه‌ی جابجایی و هدایت جسم را داشته باشد. به عنوان مثال اگر شرایط تعادل ایستایی در واسط لامسه‌ای ایجاد شود، وزن مجری نهایی دیگر به دست کاربر وارد نخواهد شد و نتیجه‌ی آن حس بهتر کاربر در هنگام استفاده از این وسیله خواهد بود.

علاوه بر کاهش مصرف انرژی در استفاده از این روش، می‌توان به قابلیت اطمینان بسیار زیاد به مکانیزم در کارهای صنعتی را نیز نام برد. زیرا همان‌گونه که ذکر شد، در راستای جاذبه هیچ نیرویی به موتور وارد نمی‌شود و در نتیجه ترمزها و هزینه‌ی تعمیرات آن‌ها از سیستم حذف خواهند شد. از طرفی با قطع ناگهانی برق در مکانیزم، مجری نهایی بدون هیچ نیروی بازدارنده‌ای از سوی عملگرها، در مکان خود ثابت می‌ماند.

می‌توان روش‌های متعادل‌سازی ایستایی مکانیزم‌ها را به سه گروه اصلی: ۱- ضد وزنه، ۲- فنر و ۳- روش‌های نوین از جمله سیلندرهای نیوماتیک و هیدرولیک، تقسیم نمود[۳].

۱-ضد وزنه: این روش براساس نحوه‌ی قرار گرفتن ضد وزنه به دو بخش زیر تقسیم می‌شوند.

الف) قرار دادن ضد وزنه بر روی بازوی اصلی مکانیزم[۴-۷]. بسیار واضح است که قرار دادن ضد وزنه بر روی بازوی مکانیزم، جرم و متعاقباً اینرسی مکانیزم را بالا می‌برد.

ب) قرار دادن ضد وزنه بر روی بازوی کمکی که به مکانیزم اصلی متصل است[۸-۱۱]. معمولاً از یک متوازی‌الاضلاع جهت ایجاد بازوی کمکی استفاده می‌شود.

۲- فنر: تعادل ایستایی فنر نیز براساس نحوه قرار گرفتن فنر به دو بخش زیر تقسیم می‌شوند.

الف) اتصال مستقیم فنر به بازو [۱۲-۱۵]،

ب) اتصال فنر به وسیله‌ی کابل و پولی به مکانیزم [۱۶-۱۹].

۳-روش‌های نوین: در حال حاضر علاوه بر روش‌های کلاسیک از روش‌های نوین جهت برقراری تعادل ایستایی استفاده می‌شوند که اشاره به آن‌ها، با این‌که موضوع بحث این مقاله نمی‌باشد، خالی از لطف نیست. این روش‌ها عبارتند از:

الف) بازوهای کمکی [۲۰-۲۲]،

ب) مکانیزم بادامک[۲۳،۲۴]،

ج) نیوماتیک و هیدرولیک [۲۵،۲۶].

مکانیزم‌های گوناگونی در مقالات متعدد به شرایط تعادل ایستایی نائل شده‌اند که می‌توان از متعادل‌سازی مکانیزم‌های سری و موازی صفحه‌ای و فضایی با شرایط گوناگون نام برد. در این مقالات به طور کلی بیشتر به حل تئوری تعادل ایستایی پرداخته شده است. معادلات حاکم بر تعادل ایستایی اجسام صلب مبتنی بر انرژی پتانسیل سیستم می‌باشد. برای به‌دست آوردن این معادلات می‌بایست مشتق انرژی پتانسیل نسبت به متغیرهای فضای مفصلی همواره صفر باشد و یا به عبارتی دیگر انرژی پتانسیل مقداری ثابت به خود گیرد. با حل این معادلات برای مکانیزم‌های گوناگون، که از ریاضیات پیچیده‌ای نیز برخوردار است، می‌توان به یک شرایط مناسب دست یافت. اما در این مقاله سعی شده است با معرفی چند روش کلی و به دور از استفاده از روش‌های تئوری، به ساده‌ترین وجه ممکن، به شرایط مورد نظر رسید. البته لازم به ذکر است برای هر مکانیزم، روش‌های مختلفی جهت حصول به شرایط مطلوب وجود دارد که سعی شده است عملی‌ترین و ساده‌ترین روش‌ها، از نظر ساخت و استفاده، اشاره گردد.

در مکانیزم‌هایی همچون جرثقیل، قسمت عمده‌ی هزینه‌های ساخت، مربوط به موتور بالابرنده می‌شود که با جایگزینی این سیستم می‌توان هزینه‌های اقتصادی را نیز کاهش داد. از مشکلات عمده در طراحی‌های موجود، ثابت در نظر گرفتن وزن مجری نهایی و جسمی که جابجا می‌شود، است. به همین دلیل نمی‌توان از این مکانیزم‌ها به عنوان جرثقیل بهره برد. از دیگر معایب استفاده از ضد وزنه متحرک معمول در تعادل ایستایی، می‌توان به بالا رفتن اینرسی مکانیزم اشاره نمود. در جرثقیل متعادل ایستایی با ثابت نمودن ضد وزنه و پایه ثابت نمودن آن در راستای X و Y، سعی بر آن است که مشکلات مذکور مرتفع شوند. لازم به ذکر است که طراحی و ساخت این دستگاه به دلیل وجود جنبه‌های مکانیک، الکترونیک (حسگرها) و همچنین کنترلی، یک دستگاه مکاترونیکی محسوب می‌شود که نیازمند دانش مربوطه می‌باشد و چالش‌های خاص خود را دربر دارد.

برای مکانیزم‌های رباتیکی و شبیه‌سازی حرکت، در اکثر مواقع نیرو در پایه بحرانی نیست و طراحان اکثرا نگران گشتاور (نیروی) مورد نیاز جهت نگه‌داشتن مکانیزم در یک وضعیت ثابت هستند. بنابراین در این متن، مکانیزم‌هایی متعادل ایستایی نامیده می‌شوند که وزن بازوها و مجری نهایی، در تمامی موقعیت‌های مجری نهایی در فضای کاری، هیچ تاثیری به عملگرها در شرایط استاتیک، وارد نکنند. به این وضعیت جبران‌سازی جاذبه[2] نیز اتلاق می‌شود. در آزمایشگاه دانشگاه لاوال[3] کانادا یک نمونه دستگاه صنعتی تعادل ایستایی با قابلیت تحمل وزن متغیر و ضد وزنه ثابت طراحی و ساخته شده است که ایده‌ی اصلی طرح ارائه شده در این مقاله برگرفته شده از مدل ساخته شده در این دانشگاه می‌باشد. تاکنون مکانیزم‌های متعادل ایستایی زیادی در دنیا طراحی و ساخته شده است که ندرتاً به مرحله تجاری‌سازی رسیده‌اند.

در این مقاله ابتدا به متعادل‌سازی ایستایی سه مکانیزم موازی صفحه‌ای سه درجه آزادی 3-RRR، 3-PRR و 3-RPR پرداخته می‌شود. این سه مکانیزم از سه شاخه موازی تشکیل شده‌اند که هر سه شاخه به مجری نهایی متصل بوده و مجری نهایی قابلیت حرکت در صفحه XY و دوران در راستای Z را دارد، لذا این مکانیزم‌ها را سه درجه آزادی صفحه‌ای می‌نامند. در ادامه ابتدا به معرفی کلی سه مکانیزم مذکور می‌پردازیم و سپس اصول کلی متعادل سازی به وسیله فنر و ضدوزنه و ترکیب آن‌ها را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. سپس با دست‌یابی به دو روش کلی، استفاده از متوازی‌الاضلاع در فنر و جابجایی مرکز جرم به محل دوران، ابتدا هر شاخه از مکانیزم را متعادل نموده و سپس به متعادل‌سازی کل مکانیزم می‌پردازیم. در قسمت بعد نیز با معرفی چند روش برای متعادل‌سازی با وزن متغیر و بیان محاسن و معایب هر روش و در نهایت انتخاب روش مناسب، به متعادل‌سازی جرثقیل متعادل ایستایی سه درجه آزادی خواهیم پرداخت.

1- End-Effector

2- Gravity compensation
3- Laval University

Archive of SID
www.SID.ir

۱-۲: 3-RRR

این مکانیزم همان‌طور که در شکل ۱ الف مشاهده می‌شود، از سه شاخه موازی تشکیل شده است که هر شاخه شامل دو لینک می‌باشد و در نتیجه، هر شاخه سه اتصال دورانی[1] (R) داشته که مبنای نام‌گذاری این مکانیزم بوده است. 3-RRR را می‌توان از متداول‌ترین مکانیزم‌ها جهت حل مسائل رباتیکی نام برد.

۱-۳: 3-RPR

این مکانیزم از سه شاخه که هر کدام یک بازوی کشویی و دو مفصل دورانی در ابتدا و انتهای آن می‌باشد تشکیل شده است (شکل ۱ ب). لازم به ذکر است در تمامی مکانیزم‌های صفحه‌ای مورد بحث، طول و وزن لینک‌ها در شاخه‌ها با یکدیگر یکسان فرض شده‌است.

۱-۴: 3-PRR

مکانیزم 3-PRR همان‌طور که در شکل ۱ ج مشاهده می‌شود، همانند 3-RRR از سه شاخه موازی تشکیل شده است که هر شاخه شامل یک بازوی کشویی[2] ثابت و دو مفصل دورانی می‌باشد. لذا این مکانیزم را به اختصار 3-PRR می‌نامند.

۲- تعادل ایستایی سیستم‌های رباتیکی

همان‌گونه که ذکر شد شرط لازم و کافی جهت متعادل‌سازی یک مکانیزم، صفر نمودن تغییرات انرژی پتانسیل و یا به زبانی دیگر ثابت نمودن انرژی پتانسیل مکانیزم است. همان‌طور که می‌دانیم تغییرات انرژی پتانسیل یک جسم عبارت است از:

$$\Delta U = mg\Delta h \qquad (۱)$$

که در آن ΔU تغییرات انرژی پتانسیل، m جرم جسم صلب، g شتاب گرانش و Δh تغییرات ارتفاع جسم می‌باشد. با تغییرات ارتفاع جسم، تغییرات انرژی پتانسیل لزوما مخالف صفر است. در یک سیستم صلب چند پارچه معادلات به صورت

$$\Delta U = \sum_{i=0}^{n}(m_i + m_{cw})g\Delta h_i \qquad (۲)$$

خواهد بود که در آن m_{cw} وزن ضد وزنه است. اگر معادله فوق برابر صفر شود، آنگاه سیستم را متعادل ایستایی به روش ضد وزنه گویند. در این شرایط می‌توان از گشتاور ایجاد شده حول مرکز دوران بازو بهره برد. در این شرایط بازو متعادل ایستایی است اگر

$$mr + m_{cw}r_{cw} = 0 \qquad (۳)$$

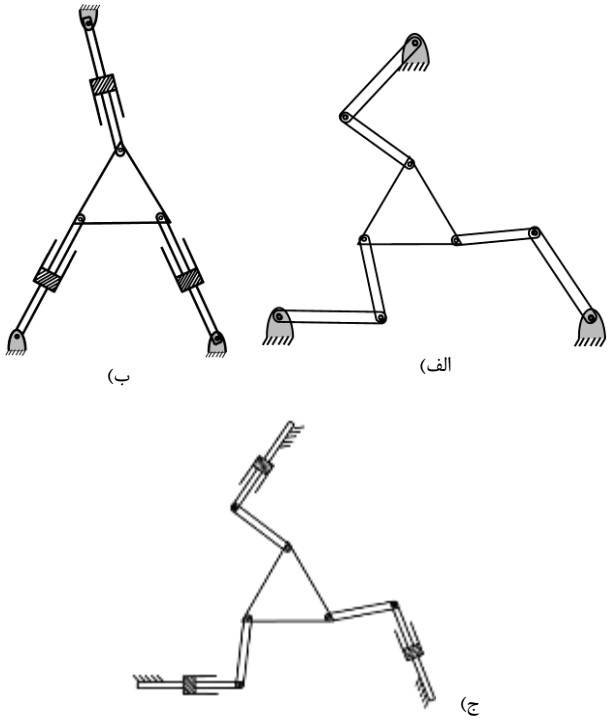
که در آن r و r_{cw} فاصله مرکز جرم وزنه و ضد وزنه تا محل دوران می‌باشد.

در تعادل ایستایی با فنر نیز لازم است تا گشتاور حول تکیه‌گاه سیستم صفر شود. در شرایطی که در شکل ۲ تصویر شده است، گشتار وارده بر لینک برابر با عبارت زیر خواهد بود:

$$M_1 = kar_1 \qquad (۴)$$

که در آن M_1 گشتاور، k ضریب سختی فنر، a فاصله افقی ابتدای فنر تا مرکز دوران و r_1 فاصله محل اتصال فنر به لینک تا محل دوران لینک می‌باشد. در این شرایط اگر یک نیرو مطابق شکل ۲ به سیستم اضافه نماییم، گشتاوری برابر

$$M_2 = Tr_2 \qquad (۵)$$



شکل ۱ مکانیزم‌های موازی صفحه‌ای: الف) 3-RRR، ب)3-RPR و ج)3-PRR

اعمال خواهد نمود که در آن M_2 گشتاور، T نیروی وارده و r_2 فاصله محل اعمال نیرو به لینک تا محل دوران لینک می‌باشد. حال اگر

$$M_1 = M_2 \rightarrow kar_1 = Tr_2 \qquad (۶)$$

برقرار شود، شرایط تعادل ایستایی در لینک احراز شده است که در شکل ۲ به اجمال به تصویر کشیده شده است[۱۳]. لازم به ذکر است که فنرها با طول آزاد صفر[3] فرض شده اند.

۳- فنر طول آزاد صفر

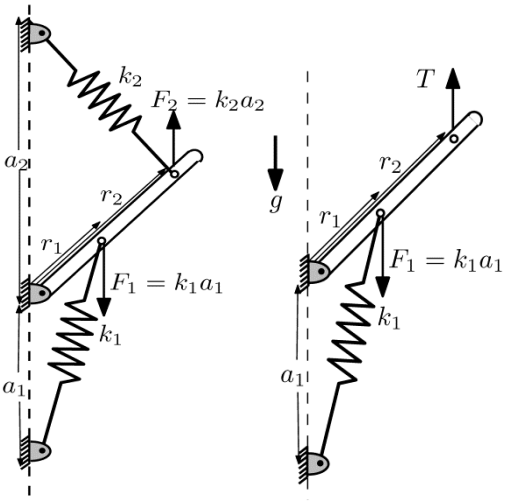
متاسفانه فنر طول آزاد صفر به صورت آماده وجود ندارد. طول آزاد l_0 فنرها معمولا بین ۷۰ تا ۹۰ درصد طول اولیه، L_0، است. اگرچه راه‌های مختلفی جهت دست‌یابی به رفتار فنر طول آزاد صفر وجود دارد، اما راه‌های تجسم عملی آن به طورکلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: گروه اول با افزایش پیش بار و گروه دوم مخفی سازی طول آزاد[۱۲].

یک راه برای افزایش پیش‌بار، استفاده از روشی خاص در پیچیدن فنر است که در آن مفتول را در هنگام پیچیدن می‌چرخانند. در نتیجه حلقه‌ها به دلیل پیش بار در سیم به یکدیگر فشرده می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۳ مورد بحث قرار گرفته است، هنگامی که پیش‌بار در فنر به میزان kL_0 افزایش یابد، طول آزاد فنر کششی، l_0، برابر صفر خواهد شد. این عمل باعث رفتار ایده‌آل گونه‌ی فنر در محدوده‌ی کاری خود خواهد شد. در این روش ذکر شده است که حداکثر تغییر طول این‌گونه فنرها در مقابل فنرهای بدون پیش‌بار کاهش می‌یابد[۱۲].

روش دوم برای ایجاد فنر ایده‌آل نگه داشتن طول آزاد پشت جزء راهنما است. به عنوان مثال می‌توان نیروی فنر را با یک کابل به محل قرار گرفتن فنر ایده‌آل رسانید و با استفاده از از یک پولی، حضور فنر را در این قسمت شبیه سازی کرد که در این طرح از روش مذکور استفاده شده است.

1- Revolute Joint
2- Prismatic
3- Zero-free-length

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲ بررسی نیرویی فنر جهت برقراری تعادل ایستایی

۳-۱ تعادل ایستایی مکانیزم‌های موازی

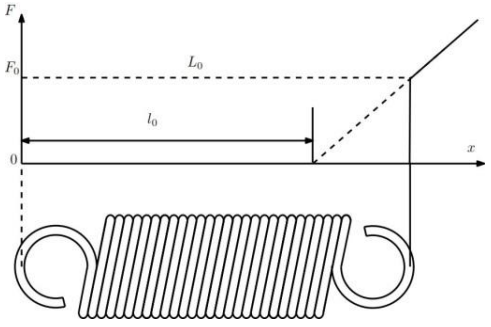
همان‌گونه که ذکر شد، مکانیزمی متعادل ایستایی است که تغییرات انرژی پتانسیل آن در تمامی حرکات مجری‌نهایی صفر باشد. اگر انرژی پتانسیل یک مکانیزم موازی با ۳ شاخه برابر

$$P = U_1 + U_2 + U_3 + U_e \qquad (۷)$$

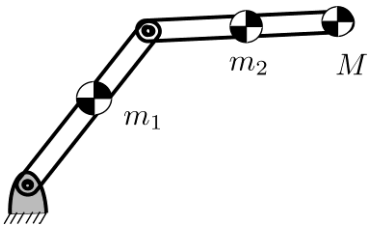
باشد، که در آن P انرژی پتانسیل کل مکانیزم، $U_i, i = 1,2,3$ انرژی پتانسیل هریک از شاخه‌ها و U_e انرژی پتانسیل مجری نهایی است، مکانیزم متعادل ایستایی است، اگر و تنها اگر

$$\frac{\partial P}{\partial t} = 0 \qquad (۸)$$

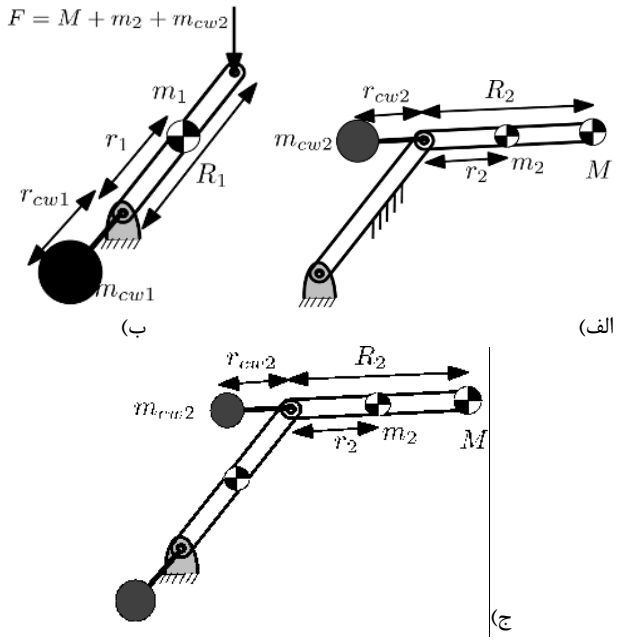
بنابراین یکی از شرایط ارضا شدن معادله فوق آن است که، $\frac{\partial U_1}{\partial t}$، $\frac{\partial U_2}{\partial t}$، $\frac{\partial U_3}{\partial t}$ و $\frac{\partial U_4}{\partial t}$ که در آن t زمان است، هر یک به تنهایی برابر صفر باشند. لذا اگر در یک مکانیزم موازی بتوانیم هر یک از شاخه‌ها را به تنهایی متعادل ایستایی کنیم، در نتیجه کل مکانیزم متعادل ایستایی خواهد بود.



شکل ۳ مشخصات فنر



شکل ۴ مکانیزم سری RR به همراه جرم متمرکز در انتها



شکل ۵ الف) ثابت کردن لینک اول، ب) تبدیل لینک دوم به یک نیروی ثابت، ج) RR متعادل ایستایی شده به کمک ضد وزنه

۳-۲ متعادل سازی اجزا سازنده ربات موازی

در ابتدا لازم است با توجه به مطالب عنوان شده، به روش‌های متعادل‌سازی ایستایی چند مکانیزم سری ساده بپردازیم. در ابتدا به تعادل ایستایی یک شاخه‌ی RR، شکل ۴، با جرم متمرکز در انتهای لینک دوم می‌پردازیم.

۳-۲-۱- ضد وزنه

در این روش همان‌طور که در شکل ۵ نمایش داده شده است، ابتدا لینک اول را ثابت می‌کنیم و در نتیجه تنها لینک دوم و جرم متمرکز می‌بایست خنثی سازی شوند. بدین منظور از ضد وزنه به جرم m_{cw_1} و با فاصله r_{cw_1} از محل دوران استفاده می‌شود به طوری که

$$m_{cw_1} r_{cw_1} = Mr + m_1 r_1 \qquad (۹)$$

که در آن M جرم جرم متمرکز، r فاصله جرم متمرکز از مرکز دوران، m_1 و r_1 نیز به ترتیب مرکز جرم لینک و فاصله مرکز جرم آن تا مرکز دوران می‌باشد. در این شرایط با آزاد کردن لینک ۱، لینک ۲ همانند یک جرم متمرکز در انتهای لینک اول با جرم $m_{cw_1} + M + m_1$ خواهد بود. در این مرحله نیز کافیست جرم m_{cw_2} که برابر

$$m_{cw_1} = \left((m_{cw_1} + M + m_2)R_1 + m_1 r_1\right)/r_{cw_1} \qquad (۱۰)$$

در فاصله r_{cw_1} از مرکز دوران لینک اول و در راستای لینک نصب شود. به بیان ساده‌تر هرگاه مرکز جرم مجموعه بر روی مرکز دوران منطبق شوند، آنگاه مجموعه متعادل ایستایی خواهد بود. مراحل متعادل سازی در شکل ۵ به نمایش در آمده است.

۳-۲-۲- فنر

در این روش نیز همان‌طور که در شکل ۶ نمایش داده شده است، لازم است ابتدا لینک اول ثابت شود. جهت جبران سازی وزن لینک دوم و جرم متمرکز در انتهای آن، از فنر طول آزاد صفر با سختی k_2 که از طرفی در فاصله عمودی a_2 بالای محور دوران و از طرف دیگر در فاصله r_{k2} از محور دوران در راستای لینک ۲ ثابت شده است، استفاده می‌شود. با توجه به معادله زیر، k_2 برابر خواهد بود با

Archive of SID

www.SID.ir

$$k_2 = (MgR_2 + m_2 g r_2)/r_{k2} a_2 \quad (11)$$

حال تاثیری که لینک ۲ بر روی لینک یک خواهد داشت تنها همانند یک جرم متمرکز در انتهای لینک ۱ به جرم $M + m_2$ خواهد بود. اما نکته‌ای که می‌بایست به آن توجه شود، ثابت کردن ابتدای فنر k_2 در بالای مرکز دوران لینک ۲ است. بدین منظور می‌بایست از روش متوازی‌الاضلاع بهره جست. در این روش با ایجاد یک متوازی‌الاضلاع، یک لینک کمکی که همیشه در راستای جاذبه است به مکانیزم اضافه می‌شود و مانع از جابجایی ابتدای فنر از بالای مرکز دوران می‌شود. در این شرایط گشتاور تولیدی حول مرکز دوران لینک ۱ برابر با خواهد بود

$$T = (m_2 + M + m_3) g R_i + 2 m_1 g r_1 \quad (12)$$

که فواصل و علائم در شکل ۶ مشخص شده‌اند. با توجه به گشتاور موجود، فنری به سختی

$$k_1 = ((m_2 + M + m_3) g R_1 + 2 m_1 g r_1)/r_{k1} a_1 \quad (13)$$

می‌بایست به فاصله r_{k1} از مرکز دوران در راستای لینک و a_1 در بالای مرکز دوران آن نصب شود تا مکانیزم RR متعادل ایستایی شود. انرژی پتانسیل این مکانیزم برابر خواهد بود با

$$\begin{aligned} V = {} & \frac{1}{2} k_1 \left(a_1^2 + r_{k1}^2\right) - r_{k1} k_1 a_1 \cos\varphi_1 + \frac{1}{2} k_2 \left(a_2^2 + r_{k2}^2\right) \\ & - r_{k2} k_2 a_2 \cos\varphi_2 + Mg(R_1 \cos\varphi_1 + R_2 \cos\varphi_2) \\ & + m_2 g(R_1 \cos\varphi_1 + r_2 \cos\varphi_2) + 2 m_1 g(r_1 \cos\varphi_1) \\ & + m_3 g R_1 \cos\varphi_1 \end{aligned} \quad (14)$$

که می توان آن را به صورت

$$\begin{aligned} V = {} & Cte + (-r_{k2} k_2 a_2 + MgR_2 + m_2 g r_2) \cos\varphi_2 \\ & + (-r_{k1} k_1 a_1 + MgR_1 + m_2 g R_1 + 2 m_1 g r_1 \\ & + m_3 g R_1) \cos\varphi_1 \end{aligned} \quad (15)$$

بازنویسی نمود. حال اگر بخواهیم V در معادله فوق ثابت بماند، می‌بایست ضرایب $\cos\varphi_1$ و $\cos\varphi_2$ صفر شود که با صفر قرار دادن ضرایب به مقادیر k_1 و k_2 دست می‌یابیم.

$$k_1 = \frac{MR_1 + m_2 R_1 + 2 m_1 r_1 + m_3 R_1}{r_{k1} a_1} g \quad (16)$$

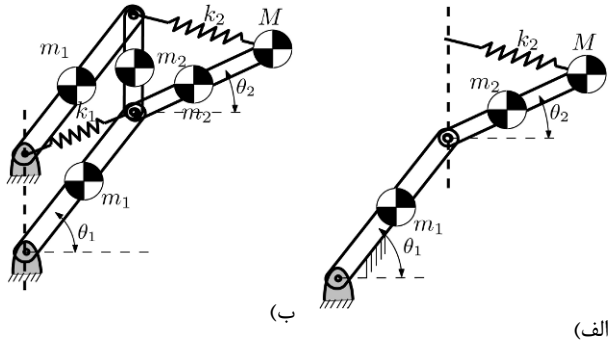
$$k_2 = \frac{MR_1 + m_2 r_2}{r_{k2} a_2} g \quad (17)$$

مراحل متعادل سازی در شکل ۶ به نمایش در آمده است.

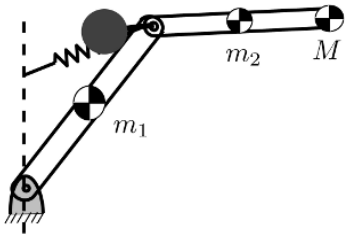
۳-۲-۳ فنر و ضد وزنه

روش دیگری که می‌توان به منظور متعادل سازی ایستایی مکانیزم RR بهره جست، استفاده همزمان از فنر و ضد وزنه است. در این روش پیچیدگی سیستم از لحاظ ساخت کمتر خواهد شد. در شکل ۷ از ضد وزنه m_{cw} جهت انتقال مرکز جرم به مرکز دوران استفاده نموده‌ایم و با بهره گیری از فنر k، لینک اول را که در حقیقت تحت تاثیر وزن خود و وزن لینک دوم و جرم متمرکز می‌باشد، متعادل ایستایی نموده‌ایم.

به‌منظور بیان محاسن و معایب هر یک از این روش‌ها می‌توان به طور خلاصه به دو مطلب اشاره نمود. ۱- اینرسی و ۲- پایداری. در مکانیزم‌هایی که از ضد وزنه به منظور متعادل سازی بهره می‌برند، افزایش اینرسی امری ناگزیر است. در این مکانیزم‌ها، علیرغم سادگی ساخت، می‌بایست در هنگام طراحی به جلوگیری از برخوردهای مکانیکی توجه ویژه داشت. از طرفی دیگر، در متعادل سازی به کمک فنر، نباید فراموش کرد که فنر طول آزاد صفر است و تولید آن پیچیدگی‌های خاص خود را دارد و همچنین فنرها ایده‌آل نبوده و در واقعیت رفتار کاملا خطی از خود بروز نمی‌دهند و از طرفی در طول زمان و بنا به میزان کارکرد، میزان سختی آن‌ها تغییر می‌کند.



شکل ۶ الف) ثابت نمودن لینک اول و متعادل سازی لینک دوم، ب) متعادل سازی مکانیزم RR به کمک فنر



شکل ۷ ترکیب فنر و ضد وزنه برای متعادل سازی مکانیزم RR

۴- متعادل سازی مکانیزم‌های مورد مطالعه

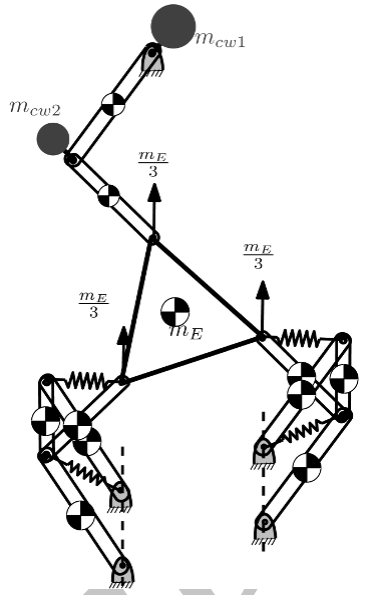
تاکنون با معرفی دو روش کلاسیک برقراری تعادل ایستایی و اعمال آن بر یک مکانیزم سری، گامی بلند در نیل به اهداف خود، یعنی برقراری تعادل ایستایی در سه مکانیزم صفحه‌ای سه درجه آزادی متداول برداشته‌ایم. همان‌گونه که ذکر شد هر کدام از مکانیزم‌های موازی مذکور، حاصل به هم پیوستن سه شاخه سری می‌باشند که در انتها به یک مجری نهایی متصل شده‌اند. در ادامه ثابت شد که در صورتی که تغییرات انرژی پتانسیل تک تک شاخه‌ها و مجری نهایی به تنهایی در فضای مفصلی صفر باشد، می‌توان به تعادل ایستایی مکانیزم موجود پی برد. در ادامه قصد داریم با اعمال روش‌های مذکور تعادل ایستایی، فارغ از محاسبات پیچیده و ورود به بحث انرژی پتانسیل، به متعادل‌سازی 3-RRR، 3-PRR و 3-RPR بپردازیم.

۴-۱ 3-RRR

در این مکانیزم می‌توان از روش‌های گوناگون جهت خنثی‌سازی وزن استفاده نمود. در این مقاله سعی بر آن است تا با ارائه روش‌های گوناگون، به نیازهای این بخش پاسخ داده شود. با توجه به این‌که مکانیزم مذکور از سه شاخه RRR تشکیل شده است، می‌توان از سه روش مذکور برای هر یک از شاخه‌ها بهره جست. تنها نکته قابل اهمیت در این مکانیزم، خنثی سازی وزن مجری نهایی می‌باشد. با فرض اینکه مجری نهایی مثلث متساوی‌الاضلاع می‌باشد و مرکز جرم آن در محل تقاطع سه ارتفاع آن واقع است، اگر بتوان نیرویی از جانب بازوهای مکانیزم به مجری نهایی وارد کرد به‌طوری که، مرکز دوران آن نیروها بر مرکز جرم مجری نهایی منطبق باشد و از طرفی، مجموع این سه نیرو برابر وزن مجری نهایی باشد، می‌توان مجری نهایی را متعادل ایستایی دانست.

در این شرایط لازم است که سه نیرو با اندازه و فاصله نسبت به مرکز جرم یکسان و همچنین با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر واقع شوند. در شکل ۸ سه نیرو با اندازه ۱/۳ وزن مجری نهایی به انتهای هر بازو وارد شده است. لازم به ذکر است این نیرو تنها عمودی بوده و رفتاری

www.SID.ir
Archive of SID



شکل ۸ مکانیزم متعادل ایستایی 3-RRR با استفاده از فنر و ضد وزنه

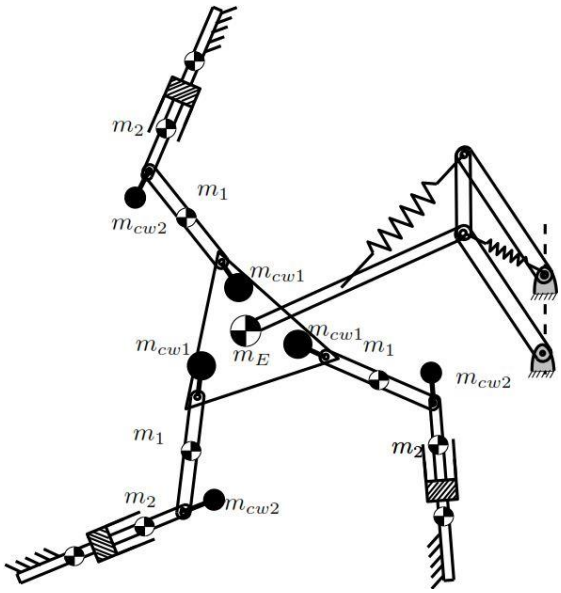
همچون جرم متمرکز M در شکل ۴ در انتهای لینک دوم مکانیزم RR خواهد داشت. به منظور نمایش گستردگی روش‌های ایجاد تعادل، هر یک از بازوها به روش‌های گوناگون متعادل شده‌اند. لازم به ذکر است این مکانیزم در نرم‌افزار آدَمز[1] مدل‌سازی شده است که ویدیویی از این شبیه‌سازی در [۲۸] موجود است.

۲-۴ 3-PRR

چالشی که در مکانیزم‌های دارای لینک کشویی با آن روبرو هستیم، عدم توانایی تحمل وزن توسط لینک کشویی می‌باشد. این گونه عملگرها به طور معمول تحریک می‌شوند، اما در این مقاله فرض بر آن است که تمامی عملگرها غیرفعال بوده، لذا نمی‌توان از نیروی خارجی جهت خنثی‌سازی وزن ایشان بهره جست. از طرفی فرض بر آن است که این عملگرها از دو بخش جداگانه تشکیل شده اند و حرکت بین آن‌ها بدون اصطکاک بوده و عملگر تغییر جرم ندارد.

همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، در مکانیزم 3-PRR، بخش ابتدایی عملگر کشویی ثابت بوده، لذا نیازی به خنثی سازی آن وجود ندارد. با این شرایط آنچه باقی می‌ماند، در هر بازو یک RR بوده که به زمین متصل نیست و می‌بایست مجری نهایی به عنوان پایه آن فرض شود. برای خنثی‌سازی این مکانیزم همچنان می‌توان از دو روش فنر و ضد وزنه استفاده نمود که به دلیل پیچیدگی مکانیزم در استفاده از فنر، به خصوص ایجاد متوازی‌الاضلاع‌های گوناگون جهت اتصال فنرها به آن‌ها، این روش را غیرمنطقی می‌سازد. لذا با عنایت به روش ضدوزنه و با فرض یکسان بودن تمامی شاخه‌ها، مجری نهایی سه نیروی یکسان وزن را در سه راس خود تحمل می‌نماید. به منظور خنثی سازی این نیروها، می‌توان از بازوی کمکی استفاده نمود. در این روش با استفاده از یک بازوی RRR که به مرکز جرم مثلث (که همان محل تقاطع ارتفاع‌های مثلث است) متصل می‌شود این بازو با بهره‌گیری از روش فنر و یا ضد وزنه (که در بخش قبل به تفصیل بیان شد) کل وزن مجموعه و ضد وزنه‌ها را تحمل می‌کند و کل مکانیزم را متعادل ایستایی می‌نماید.

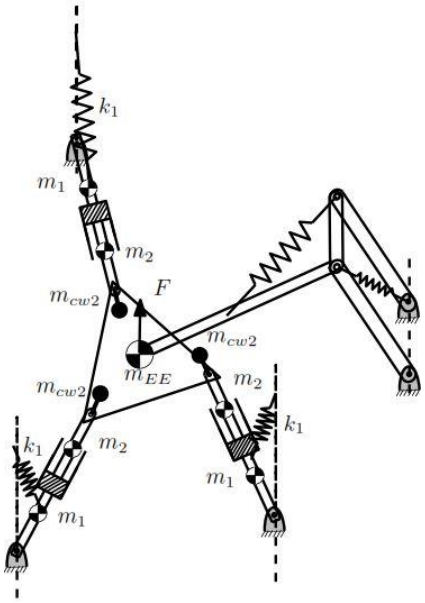
1- Adams



شکل ۹ مکانیزم متعادل ایستایی 3-PRR با استفاده از فنر و ضد وزنه

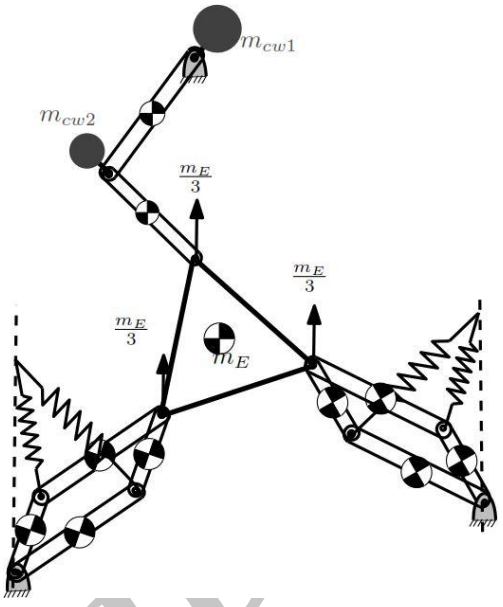
۳-۴ 3-RPR

متعادل‌سازی ایستایی این مکانیزم به طور کلی با مکانیزم 3-PRR یکسان بوده و تنها کافیست وزن قسمت اول عملگر کشویی که حول مفصل دوران می‌کند، خنثی‌سازی شود. به سادگی می‌توان با افزودن یک ضد وزنه به انتهای بازو و یا استفاده از یک فنر، وزن این لینک را خنثی‌سازی کرد. از طرفی به دلیل عدم وجود لینک بین عملگر کشویی و مجری نهایی، کما اینکه همچنان استفاده از فنر غیرمنطقی به نظر می‌رسد، اما می‌توان از این روش نیز بهره جست (شکل ۱۰). همچنان توصیه می‌شود که جهت خنثی‌سازی وزن قسمت دوم عملگر کشویی، از ضد وزنه استفاده شود. نکته قابل توجه آن است که به دلیل آن که می‌بایست مرکز جرم بر مرکز دوران در مجری نهایی منطبق باشند، نمی‌توان از شیوه‌های مختلف در بازوها جهت خنثی‌سازی استفاده کرد.



شکل ۱۰ مکانیزم 3-RPR متعادل‌سازی با کمک فنر و ضد وزنه

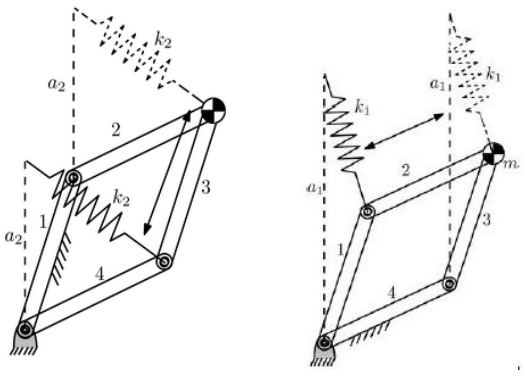
www.SID.ir



شکل ۱۱ مدل قابل ساخت از مکانیزم 3-RRR

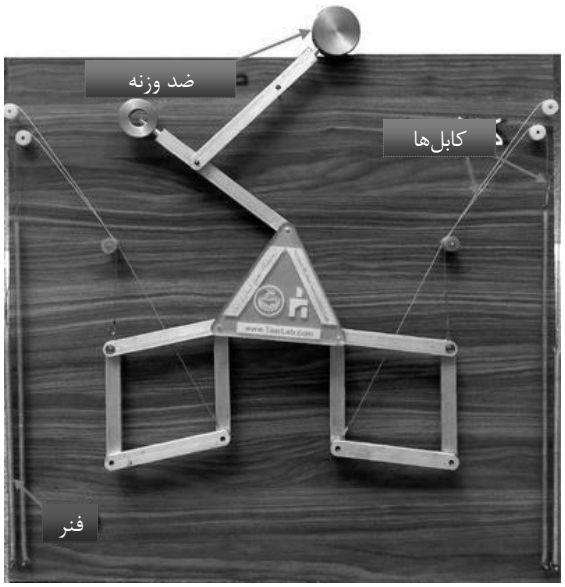
۵- ساخت مکانیزم 3-RRR متعادل ایستایی

پس از مدل‌سازی مکانیزم‌های متفاوت در نرم‌افزار آدمز، تصمیم بر آن شد که نمونه‌ای از مکانیزم‌های متعادل ایستایی در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات (تار) دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران ساخته شود تا در جهت برنامه‌های آموزشی و پژوهشی آزمایشگاه از آن استفاده شود. سرانجام مکانیزم 3-RRR برگزیده شد تا بتوان تمامی استراتژی‌های تعادل ایستایی را بر آن پیاده نمود. از طرفی به دلیل عدم وجود لینک کشویی در این مکانیزم، اصطکاک کمتری در متعادل‌سازی دخیل می‌شود که تاثیر تغییرات کوچک را بهتر نشان خواهد داد. به دلیل مشکلات ایجاد فنر طول آزاد صفر، استفاده از طراحی شکل ۸ مناسب نبوده فلذا از طراحی شکل ۱۲ برای ساخت این مکانیزم استفاده شد. در این طرح که به منظور خنثی‌سازی وزن شاخه RR و مجری نهایی است، ابتدا فرض می‌شود لینک ۴ در شکل ۱۱ الف ثابت شده است. لذا به منظور جبران‌سازی وزن مجری نهایی می‌بایست فنری به سختی k_1 در راستای محل دوران لینک ۳ نصب نمود. با توجه به قانون جابجایی در تعادل ایستایی [۱۳]، می‌توان دو انتهای فنر را که به زمین و لینک متصل هستند، در راستای لینک دیگر جابجا نمود. شکل۱۱ الف. سپس با ثابت نمودن لینک۱، می‌بایست فنر k_2 را در راستای مرکز دوران نصب نمود. حال با انتقال فنر



الف) ب)

شکل ۱۲ قانون جابجایی در متعادل سازی ایستایی



شکل ۱۳ مکانیزم صفحه‌ای 3-RRR ساخته شده به کمک فنر و ضد وزنه

k_2در راستای لینک (شکل۱۱ ب) می‌توان مکانیزم RR فوق را متعادل ایستایی نامید. انرژی پتانسیل مکانیزم با فرض قرار گرفتن مرکز جرم لینک‌ها در وسط آنها، بدون وزن گرفتن فنرها و همچنین اعمال نیروی فنرها بر مفصل‌ها برابر است با

$$V=\frac{1}{2}k_1(a_1^2+r_{k1}^2)-r_{k1}k_1a_1\cos\varphi_1+\frac{1}{2}k_2(a_2^2+r_{k2}^2)$$
$$-r_{k2}k_2a_2\cos\varphi_2+Mg(r_1\cos\varphi_1+r_2\cos\varphi_2)$$
$$+m_2g(r_1\cos\varphi_1+(r_2/2)\cos\varphi_2)+m_2g(r_2/2)\cos\varphi_1$$
$$+m_1g(r_2\cos\varphi_2+(r_1/2)\cos\varphi_1)+m_1g(r_2/2)\cos\varphi_2 \quad (۱۸)$$

حال با فرض

$$r_1=r_2$$
$$m_1=m_2$$
$$a_1=a_2$$

خواهیم داشت:

$$V=Cte+(-rk_1a+Mgr+2mgr)\cos\varphi_1$$
$$+(-rk_2a+Mgr+2mgr)\cos\varphi_2 \quad (۱۹)$$

که با صفر قرار دادن ضرایب $\cos\varphi_1$ و $\cos\varphi_2$ می‌توان اندازه k_1 و k_2 را مشخص نمود. با توجه به مشخصات دیگر مکانیزم، مقادیر k_1 و k_2 به صورت زیر به‌دست خواهد آمد.

$$-rk_1a+Mgr+2mgr=0$$
$$-rk_2a+Mgr+2mgr=0 \quad (۲۰)$$

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است، به دلیل نیاز به شبیه‌سازی عملی فنر ایده‌آل طول آزاد صفر، کشش فنر را با کمک سیستم کابل و قرقره به گونه‌ای تنظیم شد نیروی وارد از کابل به مکانیزم همچون فنری باشد که در محل قرقره‌ها نصب شده و نیرویی معادل کشش فنر طول آزاد صفر ایجاد نماید. با توجه به آن‌که هر یک از شاخه‌ها ثلث وزن مجری نهایی را لازم است

جدول۱ مشخصات پیش‌بینی شده مکانیزم

i	l_i(mm)	m_{cwi}(g)	k_i(N/mm)
۱	۱۵	۱۰۰	۸,۱۶۶
۲	۱۵	۱۸۰	۸,۱۶۶

Archive of SID

www.SID.ir

خنثی نمایند، لذا وزن ضد وزنه شاخه بالا، خنثی کننده ثلث وزن مجری نهایی و لینک‌ها است. طبیعتا فضای کاری این مکانیزم به دلیل تداخلات مکانیکی کاهش یافته است. لازم به ذکر است برخی مولفه‌های بدست آمده، هماهنگی کامل با ساخت را ندارد که می‌توان به عوامل ذیل به عنوان مهمترین دلایل این موضوع اشاره کرد:

۱- دقت ساخت فنر: به دلیل این که فنرها به صورت سنتی پیچیده شده‌اند، دقت لازم را ندارند و در طول‌های گوناگون، سختی متفاوتی از خود نشان می‌دهند.

۲- دقت ساخت اجزا: هر چند تلاش شده است تا با بهترین امکانات موجود، کارهای کارگاهی این مکانیزم انجام شود، اما عواملی چون جابجایی‌های مرکز جرم و جابجایی جای سوراخ‌کاری، می‌تواند بر نتایج به‌دست آمده تاثیر گذار باشد.

۳- اصطکاک: از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر نتایج، اصطکاک مفصل‌ها، کابل و قرقره است که در مدل‌سازی لحاظ نشده‌اند ولی در واقعیت بر رفتار سیستم تاثیرگذارند. لازم به ذکر است که اصطکاک مذکور مانع از حرکت آزادانه لینک‌ها نمی‌شود و در مقایسه با وزن مکانیزم بسیار ناچیز است.

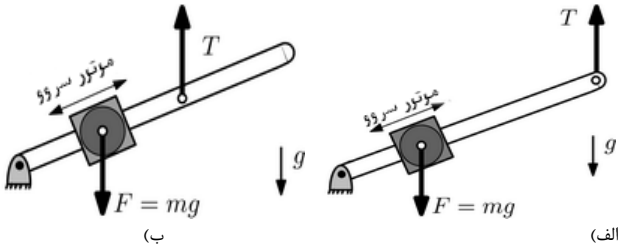
با توجه به این که وزن مجری نهایی ۱۸۰ گرم است، وزن ضد وزنه‌ای که می‌بایست ۶۰ گرم از وزن مجری نهایی و وزن لینک را خنثی نماید، تابع محل قرارگیری دقیق مرکز جرم لینک $l = 75\text{mm}$ و محل دقیق قرارگیری مرکز جرم ضد وزنه m_{cw}، ۷۰ میلی‌متر است. از طرفی وزن هر لینک، l_1، متوازی‌الاضلاع ۹۵ گرم است که با توجه به اعمال ۶۰ گرم از وزن مجری نهایی بر هر متوازی‌الاضلاع و معادله ۱۹ سختی تمام فنرها ۸٫۱۶۶ N/mm اندازه‌گیری شده‌اند. جدول ۱ سایر مشخصات پیش‌بینی شده برای مکانیزم را نمایش می‌دهد.

۶- خنثی‌سازی وزن متغیر

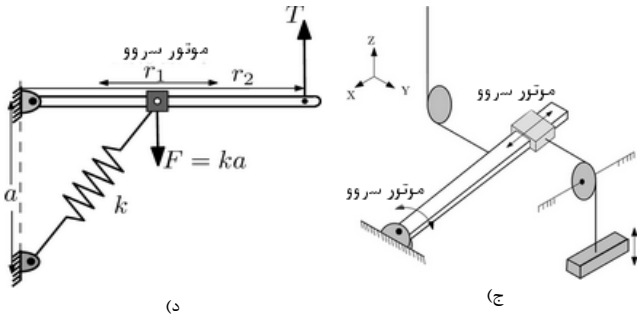
با متعادل‌سازی مکانیزم‌های 3-RRR، 3-PRR و 3-RPR با در نظر گرفتن وزن ثابت در مجری نهایی، در این فصل به خنثی‌سازی وزن متغیر مجری نهایی در یک مکانیزم فضایی سه درجه آزادی پرداخته خواهد شد. در این بخش هدف دست‌یابی به یک جرثقیل متعادل ایستایی است که کمترین میزان مصرف انرژی را داشته و امنیت بیشتری نسبت به سایر مکانیزم‌ها داشته باشد. در این بخش لازم است که تغییراتی در سیستم تعادل لحاظ شود تا در شرایط تغییر در وزن مجری نهایی، بتواند وزن را تطبیق نماید. در این شرایط از یک تیر یکسر گیردار استفاده می‌شود که در محل اتصال آن با زمین از یک اتصال دورانی استفاده شده است. از طرفی نیرو توسط طرح‌های ۱- ضد وزنه متحرک قائم، ۲- ضد وزنه متحرک افقی، ۳- فنر با نقطه اثر متحرک و ۴- فنر با سختی متغیر که در ادامه معرفی خواهد شد، به تیر وارد می‌شود.

۱- ضد وزنه متحرک قائم

در این شرایط با توجه به معادله ۴، با تغییرات r_2 مطابق شکل ۱۴ (الف)، نیروی وارد بر کابل تغییر می‌کند و باعث خنثی‌سازی وزن در مجری نهایی خواهد شد. این طرح در آزمایشگاه رباتیک دانشگاه لاوال طراحی و ساخته شده است[۲۷]. در این وضعیت نیروی وارد به کابل حداکثر می‌تواند برابر وزن ضد وزنه باشد. با وصل کردن ابتدای کابل به میانه‌ی مسیر حرکت ضد وزنه، مطابق شکل ۱۴ (ب) می‌توان نیروی بیشتری را به کابل وارد نمود و در نتیجه ظرفیت مکانیزم جهت وزن‌های بالاتر بیشتر خواهد شد.



شکل ۱۴ مکانیزم ضد وزنه عمودی: الف) نیروی T به انتهای بازو اعمال می‌شود و قابلیت تنظیم کمتر در نیروهای بالا دارد. ب) نیروی T با فاصله از انتهای بازو وارد می‌شود و بازه‌ی نیرویی بیشتری را پوشش می‌دهد



شکل ۱۵ ج) مکانیزم ضد وزنه افقی که در آن با صفحه‌ای نمودن حرکت بازو، گشتاور مورد نیاز موتور کاهش می‌یابد. د) مکانیزم فنر با نقطه اثر متحرک: با جابجایی محل اعمال نیروی فنر، r تغییر می‌نماید و در نتیجه نیروی اعمال شده T متغیر خواهد بود.

۲- ضد وزنه متحرک افقی

با جابجایی مجری نهایی در راستای گرانش (Z)، انتهای بازوی ضد وزنه جابجا می‌شود. در این شرایط موتور تنظیم موقعیت ضد وزنه، علاوه بر جابجایی ضد وزنه، وظیفه‌ی غلبه بر انرژی پتانسیل را نیز دارد. مطابق شکل ۱۴ (ج)، با استفاده از دو قرقره می‌توان تغییرات زاویه ضد وزنه را در صفحه XY عمود بر شتاب جاذبه داشته باشیم. در این حالت نیروی لازم فقط جهت جابجایی ضد وزنه خواهد بود.

۳- فنر با نقطه اثر متحرک

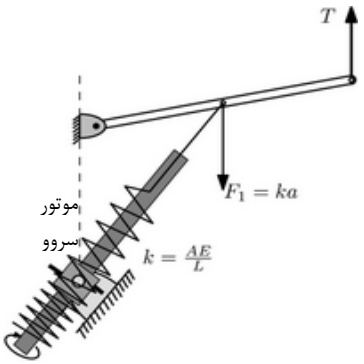
با توجه به معادله ۳، اگر بتوانیم r و سختی فنر k را تغییر دهیم، می‌توانیم مکانیزم تعادل ایستایی را با شرایط وزن متغیر تنظیم کنیم. مطابق شکل ۱۴ (د)، با ایجاد یک ریل بر روی بازو و جابجایی محل اتصال فنر به بازو، میزان r تغییر خواهد نمود و می‌تواند نیروی لازم در کابل را تنظیم نماید. باید توجه نمود که در تعادل ایستایی مذکور، طول آزاد فنرهای بکار رفته صفر هستند. لازم به ذکر است که فنر در راستای بازو نیرویی معادل kr_1 وارد می‌نماید که عملگر می‌بایست این نیرو را جهت جابجایی محل اثر نیروی فنر خنثی نماید.

۴- فنر با سختی متغیر

شکل ۱۶ بیانگر مکانیزمی جهت تغییر سختی فنر k است[۱۳]. در این مکانیزم با تغییرات طول فنر، سختی k و در نتیجه میزان نیروی وارده به کابل تغییر می‌کند. به دلیل کشش زیاد فنر، عملگر جهت تغییر طول فنر می‌بایست گشتاور قابل ملاحظه‌ای را اعمال نماید. با ترکیب این روش و جابجایی محل اعمال نیروی فنر، می‌توان یک بازه‌ی گسترده از وزن‌های اعمالی به مجری نهایی را تحت پوشش قرار داد. با توجه به مشکلات استفاده از فنر که می‌توان به تغییر ضریب فنر در طول زمان، سختی ایجاد شرایط فنر

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱۶ مکانیزم فنر با سختی متغیر: با تغییر طول فنر، ضریب سختی k تغییر می‌نماید و در نتیجه نیروی اعمال شده T متغیر خواهد بود

با طول آزاد صفر، عدم رفتار خطی فنر که در شرایط خاص سختی فنر تابع طول آن است و همچنین مشکلاتی از قبیل تعویض فنر در مکانیزم و ایجاد مکانیزم فنر متغیر، که نیازمند عملگر قوی جهت جابجایی تنظیم کننده‌ی فنر است، استفاده از ضد وزنه ارجحیت پیدا می‌کند. با توجه به گشتاور مورد نیاز کمتر مکانیزم ضد وزنه افقی و معیارهای مقایسه شده در جدول ۲، استفاده از مکانیزم ضد وزنه افقی بهترین گزینه پیش رو است.

۶-۱- طراحی اجزا

از آنجایی که مکانیزم ضد وزنه تنها قابلیت ایجاد یک درجه آزادی انتقالی در راستای گرانش را دارد، جهت تامین نمودن دو درجه آزادی انتقالی دیگر لازم است که کابل همواره دو برابر وزن مجری نهایی نیروی کششی تحمل نماید. می‌توان کابل‌بندی ارائه شده توسط آزمایشگاه رباتیک لاوال در [۲۷] را به دلایل زیر بهترین ایده در این زمینه معرفی نمود.

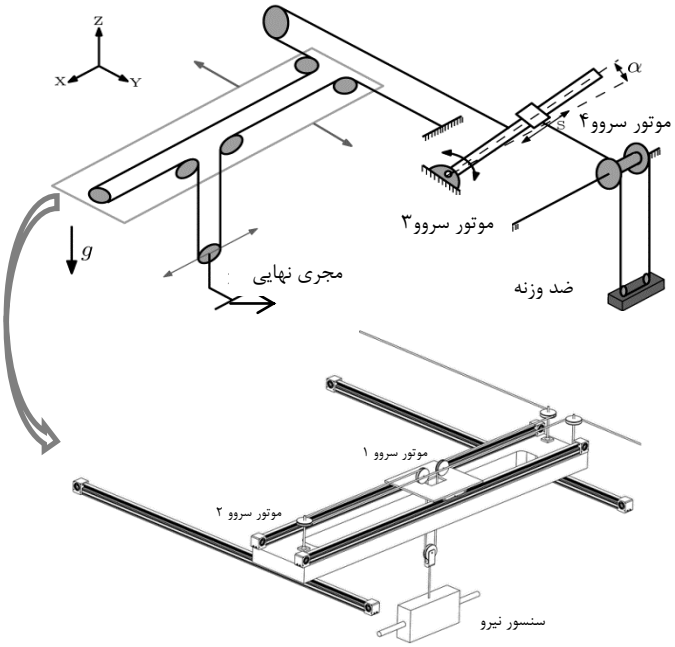
۱- یک کابل با طول ثابت مورد استفاده قرار گرفته است. ۲- با جابجایی افقی مجری نهایی، ضد وزنه ثابت می‌ماند، لذا اینرسی سیستم بسیار کاهش می‌یابد. ۳- تمام نیروهای وارده از کابل به پولی‌ها در صفحه XY عمود بر گرانش توسط پولی قرینه خنثی می‌شود و نیروی زائد در سیستم که باعث اصطکاک می‌توانست باشد، وجود نخواهد داشت.

جهت ایجاد دو درجه آزادی صفحه‌ای از دو سیستم تسمه نقاله سری استفاده می‌نمایم، به طوری که مکانیزم راستای Y بر روی سازه نصب می‌شود و تسمه نقاله راستای X بر روی این تسمه نقاله متحرک خواهد بود. لذا مکانیزم قابلیت پیمایش تمام فضای کاری خود را خواهد داشت. شکل ۱۶ مکانیزم کابلبندی جهت تعادل ایستایی مجری نهایی و همچنین حرکت انتقالی در صفحه XY را نمایش می‌دهد.

به دلیل لختی بالای سیستم در جرم‌های بالا و همچنین غلبه بر نیروهای اصطکاکی وارد بر مکانیزم می‌بایست از عملگر جهت تطابق با شرایط استاندارد بدنی انسان استفاده شود. بدین معنا که کاربر نیرو در جهت حرکت

جدول ۲ مقایسه و اولویت بندی چهار طرح پیشنهادی جهت ایجاد تعادل ایستایی با طول بازو و عملگر یکسان. (بارم‌بندی با معیار ۱ به عنوان بهترین)

	پایداری در طول زمان	سهولت ساخت و اجرا	نیروی مورد نیاز عملگر	بازه نیرویی قابل پوشش	اعتماد پذیری
ضد وزنه عمودی	۱	۱	۲	۲	۱
ضد وزنه افقی	۱	۲	۱	۱	۱
فنر با نقطه اثر متحرک	۳	۳	۳	۳	۲
فنر با سختی متغیر	۴	۴	۴	۴	۲



شکل ۱۷ کابل‌بندی جهت انتقال نیروی ضد وزنه به مجری نهایی به همراه مدل سه بعدی مکانیزم جابجایی در راستای XY به کمک تسمه تایم

را به مجری نهایی وارد می‌کند و در نهایت عملگرها حرکت مورد نظر را انجام می‌دهند. در این شرایط از دو موتور سروو (موتور ۱ و ۲ در شکل ۱۶) جهت کنترل مجری نهایی در صفحه XY و همچنین سروو موتور ۳ جهت جابجایی در راستای Z استفاده می‌شود. در این روش می‌بایست از امپدانس کنترل بر اساس نیروی وارده از سمت کاربر به مجری نهایی، بهره جست. بدین صورت که یک حسگر نیرو سه درجه آزادی بر روی مجری نهایی نصب شده و میزان نیروی وارده بر حسگر در هر جهت اندازه‌گیری می‌شود. کنترلر بر اساس میزان نیروی خوانده شده میزان گشتاور مورد نظر را پیش‌بینی می‌نماید و گشتاور موتور را به گونه‌ای تعیین می‌کند تا مسیر مورد نظر را طی نماید. مادامی که نیرو به مجری نهایی وارد می‌شود، عملگرها از کنترلر دستور لازم جهت حرکت را وارد می‌نماید. همچنین موتور شماره ۴ نیز وظیفه‌ی تنظیم محل اعمال نیروی ضد وزنه بر روی بازو را بر عهده دارد. مباحث کنترلی و حسگرها خارج از موضوعیت این مقاله می‌باشد و به آنها پرداخته نخواهد شد.

۶-۲- مشخصه‌های طراحی ضد وزنه

با تغییر وزن ضد وزنه می‌توان تحمل وزن مکانیزم را بیشتر نمود. اما با این روش دقت دستگاه در ایجاد نیروی مورد نیاز در کابل کم خواهد شد. به همین سبب طراح می‌تواند با توجه به شرایط مابین چهار مشخصه ۱) فضای کاری، ۲) بازه‌ی نیرویی قابل تحمل، ۳) دقت تعادل و ۴) فضای اشغالی دستگاه، اولویت‌های خود را انتخاب کند. با استفاده از یک قرقره در اتصال به بازوی ضد وزنه، می‌توان قابلیت جابجایی دستگاه در راستای Z را دو برابر نمود و البته بازه نیرویی قابل تحمل نصف می‌شود. از طرف دیگر با اتصال کابل، قبل از انتهای بازو، می‌توان بازه‌ی نیرویی بیشتری را پوشش داد. البته با این عمل، فضای کاری نیز کاهش می‌یابد.

از نکات مهم در طراحی این مکانیزم، تغییر راستای نیروی کابل بر لینک است که لازم است با در نظر گرفتن فضای اشغالی توسط مکانیزم در رابطه با آن تصمیمی اتخاذ شود. در مدل سه‌بعدی ارائه شده در شکل ۱۷، مکانیزم

Archive of SID

www.SID.ir

قابلیت جابجایی دومتر را در راستای X و Y را داراست. در این شرایط از بازویی یک و نیم متری جهت جابجایی ضد وزنه در حالت افقی استفاده شده است. کابل انتقال نیرو در فاصله یک متری از محل دوران بازوی ضد وزنه نصب شده است. بازوی ضد وزنه توانایی دوران به میزان $\alpha = \pm\frac{\pi}{6}$ از حالت تعادل خود را داراست که با توجه به نسبت کابل‌ها، ۵۰ سانتی‌متر فضای کاری در راستای شتاب جاذبه (Z) ایجاد می‌نماید. در این شرایط نیروی کابل برابر عبارت زیر خواهد بود:

$$Tr_1 \sin\alpha = mgr_2 \sin\alpha \qquad (۲۱)$$

در این حالت با قرار دادن ابتدای کابل در راستای افقی در فاصله ۱۶۲ سانتی‌متری حداکثر زاویه انحراف کابل از راستای Y، ۳ درجه می‌باشد که در حدود ۳ درصد از نیروی جبران ساز را نمی‌تواند انتقال دهد که بسیار ناچیز است. با جای‌گذاری خطای α در معادله فوق می‌توان صحت این محاسبات را بررسی نمود.

$$Tr_1 \sin(\alpha \pm 3) = mgr_2 \sin\alpha \qquad -\frac{\pi}{6} \le \alpha \le \frac{\pi}{6} \qquad (۲۲)$$

جهت جبران‌سازی این نیرو و غلبه بر نیروی اصطکاک مکانیزم و همچنین کنترل آن، استفاده از یک موتور دیگر علاوه بر سه موتور اشاره شده اجتناب ناپذیر است. با قرار دادن موتوری (موتور شماره ۳) در محل دوران بازو به آسانی می‌توان به این مهم دست یافت.

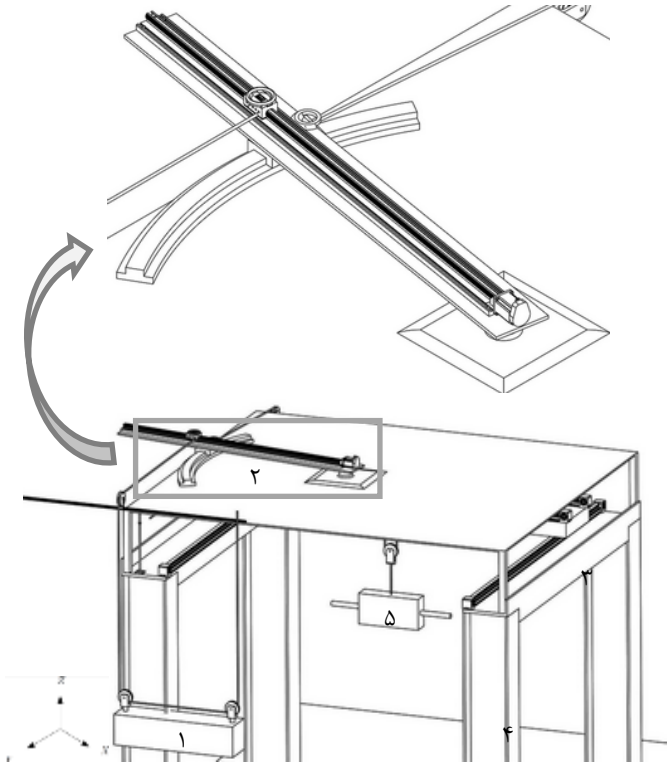
از طرفی با افقی نمودن مکانیزم تعادل، استفاده از یک مدول خطی جهت جابجایی پولی ضد وزنه اجتناب‌ناپذیر است. واضح است که کشش کابل موجب می‌شود محل پولی ضد وزنه و محل اتصال کابل ضد وزنه به بازو در یک امتداد قرار گیرند. با استفاده از این طرح می‌توان تمامی تجهیزات ضد وزنه را به بالای فضای کاری منتقل نمود و تنها یک کابل جهت اتصال به ضد وزنه خارج می‌شود و مکانیزم از آسیب‌های احتمالی در امان خواهد ماند. به منظور پایداری بیشتر ضد وزنه از دو قرقره بر روی ضد وزنه استفاده نموده‌ایم که در اثر کشش مداوم کابل مانع از حرکات ناخواسته‌ی ضد وزنه می‌شود.

شکل ۱۸ مدل سه‌بعدی پیشنهادی را ارائه نموده است. لازم به ذکر است که قالب کلی مجموعه از [۲۷] الهام گرفته شده و تغییرات مورد نظر جهت بهینه‌سازی آن طرح ارائه شده و اعمال شده است. قسمت‌های شماره‌گذاری شده عبارتند از:

۱) ضد وزنه که با دو کابل و قرقره آویزان شده است تا مانع از جابجایی ناخواسته ضد وزنه شود. ۲) مکانیزم ضد وزنه افقی که کابل سمت راست به آن ثابت شده است و کابل سمت چپ به وسیله عملگر در راستای ماژول خطی[1] جابجا می‌شود. پایه ماژول خطی نیز به وسیله‌ی یک موتور کنترل می‌شود و کابل را جهت جابجایی و تامین نیرو در راستای گرانش جابجا می‌نماید. ۳) سیستم انتقال حرکت در راستای XY که در شکل ۱۷ مدل شماتیک و سه بعدی آن به طور کامل نمایش داده شده است که در زیر سقف قرار دارد، به وسیله‌ی کابل‌ها نیرو از ضد وزنه به کابل منتقل می‌شود و از آنجا به مجری نهایی می‌رسد. ۴) ستون و پایه مکانیزم که کل مجموعه بر روی آن نصب شده است. ۵) مجری نهایی که مجهز به دو سنسور نیرو سه درجه آزادی می‌باشد.

۷- نتیجه گیری

با عنایت به اهمیت متعادل‌سازی ایستایی مکانیزم‌ها، در این مقاله ابتدا به معرفی روش‌های معمول متعادل‌سازی ایستایی مکانیزم‌ها پرداخته شده است.



شکل ۱۸ مدل سه بعدی پیشنهادی

در ادامه با استفاده از جبران‌سازی وزن مکانیزم به وسیله فنر، ضد وزنه و ترکیب این دو روش، یه مکانیزم ساده سری را متعادل ایستایی نمودیم و دو روش کلی در این زمینه استفاده و اثبات شد. سپس با ترکیب این روش‌ها، متعادل‌سازی ایستایی سه مکانیزم سه درجه آزادی صفحه‌ای موازی 3-RRR، 3-PRR و 3-RPR طراحی و انجام شد. به منظور اثبات روش‌های مذکور و از طرفی دست‌یابی به پارامترهای فنر و ضد وزنه در مکانیزم، معادلات لازم ارائه شد و پس از مدل‌سازی و تست یک مکانیزم متعادل ایستایی 3-RRR به کمک تلفیق فنر و ضد وزنه و همچنین بهنیه‌سازی مکانیزم جهت ساخت در نرم‌افزار آدَمز، ساخت این مکانیزم در آزمایشگاه تعامل انسان و ربات (تار) دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران انجام و نتایج آن در مقاله ذکر شد. از طرفی به طراحی جرثقیل متعادل ایستایی با قابلیت خنثی‌سازی وزن متغیر پرداخته شد که با توجه به مزایا و معایب هرکدام از طرح‌ها، در انتها با توجه به موارد ذکر شده از جمله ضریب اطمینان بالا، یکنواختی در دوره‌ی زمانی عملکرد، ساخت آسان، فضای کاری بزرگتر، بازه‌ی نیرویی قابل تحمل بزرگتر و همچنین نیروی کمتر جهت جابجایی ضد وزنه استفاده از ضد وزنه افقی بهترین گزینه‌ی پیش رو جهت طراحی و ساخت یک جرثقیل ایستایی شناخته شد. جهت کاهش فضای اشغالی مکانیزم، سیستم ضد وزنه به روی سقف مکانیزم انتقال داده شده است تا از آسیب‌های احتمالی نیز در امان باشد. سپس با استفاده از مکانیزم کابل‌بندی ارائه شده، نیروی خنثی‌سازی به مجری نهایی منتقل شد. به منظور حرکت مکانیزم در صفحه XY نیز از دو تسمه نقاله سری بهره برده شده است. سپس با ارائه مدل سه‌بعدی ارائه شده، یک جرثقیل متعادل ایستایی سه درجه آزادی طراحی گردید. این مکانیزم از نظر گشتاور اعمالی کمتر بر روی عملگرها نسبت به طرح پیشنهادی در [۲۷] بهبود یافته است. به منظور ادامه‌ی روند این مکانیزم می‌توان به افزایش درجات آزادی مکانیزم، کنترل آن و بهبود وضعیت عملکرد مجری نهایی

1- Ball Screw

Archive of SID
www.SID.ir

پرداخت. استفاده از روش مذکور در سایر مکانیزم‌های فضایی موازی و پیدا کردن معادله فراگیر اندازه و محل اعمال نیروهایی که می‌توان بر مجری نهایی اعمال نمود از کارهای پیش رو است.

۸- فهرست علائم

U	انرژی پتانسیل (ژول)
m	جرم (کیلوگرم)
h	ارتفاع (متر)
k	سختی فنر ($N.mm^{-1}$)

۹- مراجع

[1] G. Lowen, F. Tepper, R. Berkof, Balancing of linkages-an update, *Mechanism and Machine Theory,* Vol. 18, No. 3, pp. 213-220, 1983.

[2] J. Wang, C. M. Gosselin, Static balancing of spatial three-degree-of-freedom parallel mechanisms, *Mechanism and Machine Theory,* Vol. 34, No. 3, pp. 437-452, 1999.

[3] C. Baradat, V. Arakelian, S. Briot, S. Guegan, Design and prototyping of a new balancing mechanism for spatial parallel manipulators, *Journal of Mechanical Design,* Vol. 130, No. 7, pp. 072305, 2008.

[4] S. K. Agrawal, A. Fattah, Reactionless space and ground robots: novel designs and concept studies, *Mechanism and Machine theory,* Vol. 39, No. 1, pp. 25-40, 2004.

[5] W. Newman, N. Hogan, time optimal control of balanced manipulators, *Journal of dynamic systems, measurement, and control,* Vol. 111, No. 2, pp. 187-193, 1989.

[6] T. Laliberté, C. M. Gosselin, M. Jean, Static balancing of 3-dof planar parallel mechanisms, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on,* Vol. 4, No. 4, pp. 363-377, 1999.

[7] K. Fujikoshi, Balancing apparatus for jointed robot, *Patent No. JP51–122254*, 1976.

[8] V. Arakelian, V. Melikian, Manipulator, *SU Patent*, No. 1,465,298, 1989.

[9] J. Wang, C. M. Gosselin, Static balancing of spatial four-degree-of-freedom parallel mechanisms, *Mechanism and machine theory,* Vol. 35, No. 4, pp. 563-592, 2000.

[10] A. Russo, R. Sinatra, F. Xi, Static balancing of parallel robots, *Mechanism and Machine Theory,* Vol. 40, No. 2, pp. 191-202, 2005.

[11] I. Ebert-Uphoff, C. m. M. Gosselin, T. Laliberté, Static balancing of spatial parallel platform mechanisms—revisited, *Journal of Mechanical Design,* Vol. 122, No. 1, pp. 43-51, 2000.

[12] Streit, D. A., and B. J. Gilmore. Perfect spring equilibrators for rotatable bodies. *Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*111.4 (1989): 451-458.

[13] J. L. Herder, Energy-free systems: theory, conception, and design of statically balanced spring mechanisms, 2001.

[14] D. Streit, E. Shin, Equilibrators for planar linkages, *Journal of Mechanical Design,* Vol. 115, No. 3, pp. 604-611, 1993.

[15] N. Vrijlandt, J. L. Herder, Seating unit for supporting a body or part of a body, US Patent 20,040,195,883, 2004.

[16] I. Vladov, V. Danilevskij, V. Rassadkin, Module of linear motion of industrial robot, *Patent SU848350, July,* Vol. 23, 1981.

[17] I. Ebert-Uphoff, K. Johnson, Practical considerations for the static balancing of mechanisms of parallel architecture, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics,* Vol. 216, No. 1, pp. 73-85, 2002.

[18] O. Mizuguchi, G. Tuda, Arm with gravity-balancing function, Google Patents, 1983.

[19] J. L. Herder, Some considerations regarding statically balanced parallel mechanisms. Proceedings of the Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators. 2002.

[20] Leblond, M., and C. M. Gosselin. Static balancing of spatial and planar parallel manipulators with prismatic actuators. *ASME Design Engineering Technical Conferences*. 1998.

[21] R. Dzhavakhyan, N. Dzhavakhyan, Balanced manipulator, *Patent SU1521579, November,* Vol. 15, 1989.

[22] J. M. Herve, Device for counter-balancing the forces due to gravity in a robot arm, Google Patents, 1986.

[23] D. S. Bartlett, D. I. Freed, W. H. Poynter Jr, Robot with spring pivot balancing mechanism, Google Patents, 1988.

[24] M. Popov, V. Tyurin, B. Druyanov, Counterbalanced manipulator, *Patent SU1065186, January,* Vol. 7, 1984.

[25] I. Simionescu, L. Ciupitu, The static balancing of the industrial robot arms: part i: discrete balancing, *Mechanism and machine theory,* Vol. 35, No. 9, pp. 1287-1298, 2000.

[26] N. Lakota, L. Petrov, Manipulators for assembly tasks, *Automation of Assembly Tasks*, pp. 137-153, 1985.

[27] Intelligent Assist Device Prototype. Laval University, Accessed 1 June 201۲;. http://robot.gmc.ulaval.ca/en/research/theme507.html

[28] Human-Robot Interaction Lab. University of Tehran, Accessed 10 March 2013;. www.taarlab.com/en/TaarLabCast/Homa3RRR.mp4

Archive of SID

www.SID.ir