



Design of a basic module for angular motion of spherical joints using the actuators of shape memory alloys and magnetic stabilization system

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sheikhi M.M.^{*1} PhD,
Hadi A.² PhD,
Ghasemi Varzaneh M.¹ MSc

How to cite this article

Sheikhi M.M, Hadi A, Ghasemi Varzaneh M. Design of a basic module for angular motion of spherical joints using the actuators of shape memory alloys and magnetic stabilization system. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(2):375-386.

ABSTRACT

Spherical joints are specifically used in many robotic systems, including various industrial and medical applications, especially in non-structured environments. Modular robotic systems are the appropriate solution for use in these environments; So that the configuration of the robots can change quick and easy by link or separate different modules. Flexibility of modules, enough degrees of freedom, capability to stabilize the position of the module and rigidity to maintain strength and stiffness of modular robot during mission are the most important features of a modular robot. Shape memory alloys are suitable actuators for use in robotic modules, which a tiny, lightweight, and without noise system is achieved by using them. In this paper, a mechanism with two degrees of freedom has been created by placing three memory shape alloys springs in the structure of a flexible joint module. Also, with the installation of an electromagnetic system in the joint, it is possible to stabilize its position when necessary. The developed module, in addition to its high flexibility, can maintain its position when needed and increase the strength of the robotic arm. In this research, the design of the module has been presented and kinematic and force analysis has been investigated.

Keywords Jointed module; Shape memory alloy; Strength; Position stabilization

¹Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, Shahid Rajaei University, Tehran, Iran

²Mechatronics Department, New Sciences & Technologies Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Shahid Rajaei University, Tehran, Iran. Postal Code: 1678815811

Phone: +98 (21) 22970060

Fax: +98 (21) 22970033

m.sheikhi@sru.ac.ir

Article History

Received: April 16, 2018

Accepted: October 23, 2018

ePublished: February 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Implementation of variable joint stiffness through antagonistic actuation using rolamite springs [2] Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators [3] Mechanism of leg stiffness adjustment for hopping on surfaces of different stiffnesses [4] Development and evaluation of interactive humanoid robots [5] A new variable stiffness colonoscope makes colonoscopy easier: A randomised controlled trial [6] the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator: Design and implementation in a biped robot' [7] Control of rotary series elastic actuator for ideal force-mode actuation in human-robot interaction applications [8] Mechanics and stiffness limitations of a variable stiffness actuator for use in prosthetic limbs [9] Kinematic adaptations to a variable stiffness shoe: Mechanisms for reducing joint loading [10] A robot joint with variable stiffness using leaf springs [11] Design analysis of a 3-DOF cable-driven variable-stiffness joint module [12] An under actuated robotic arm with adjustable stiffness shape memory polymer joints [13] Shape memory thin film actuator for holding a fine blood vessel [14] Developing a novel SMA-actuated robotic module [15] A fuzzy PID-controlled SMA actuator for a two-DOF joint [16] Design of a fully actuated electromagnetic bending actuator for endoscopic applications [17] Mechatronics with experiments

طراحی یک ماژول پایه‌ای برای حرکت زاویه‌ای مفاصل کروی با به‌کارگیری محرک‌های آلیاژهای حافظه‌دار و سیستم تثبیت‌کننده مغناطیسی

محمد مراد شیخی * PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

علیرضا هادی PhD

بخش مهندسی مکاترونیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

محسن قاسمی ورزنده MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

مفاصل کروی کاربرد ویژه‌ای در بسیاری از سیستم‌های رباتیک از جمله کاربردهای مختلف صنعتی و پزشکی به‌ویژه در محیط‌های بدون ساختار دارند. سیستم‌های رباتیک ماژولار راه‌حل‌های مناسبی برای به‌کارگیری در این محیط‌ها هستند؛ به‌گونه‌ای که پیکربندی ربات‌ها می‌تواند سریع و آسان با اتصال دادن یا جدا کردن ماژول‌های مختلف تغییر کند. انعطاف‌پذیری ماژول‌ها، درجات آزادی کافی، امکان تثبیت موقعیت ماژول و سفتی آن برای حفظ استحکام و سفتی ربات ماژولار هنگام انجام ماموریت از مهم‌ترین مشخصه‌های یک ربات مفصلی ماژولار است. آلیاژهای حافظه‌دار، محرک‌های مطلوبی برای به‌کارگیری در ماژول‌های رباتیک هستند که می‌توان با به‌کارگیری آنها به سیستمی سبک، کم‌حجم و بدون نویز دسترسی پیدا کرد. در این مقاله با جای‌گذاری سه جفت فنر آلیاژ حافظه‌دار در ساختار یک ماژول مفصلی انعطاف‌پذیر مکانیزمی با ۲ درجه آزادی ایجاد شده است. همچنین با تعبیه یک سیستم الکترومغناطیسی در مفصل امکان تثبیت موقعیت آن در موقع لزوم فراهم شده است. ماژول توسعه‌یافته، علاوه بر انعطاف‌پذیری زیاد می‌تواند در مواقع لزوم موقعیت خود را ثابت نگه داشته و استحکام بازوی رباتیک را افزایش دهد. در این پژوهش، طراحی ماژول ارائه شده و تحلیل سینماتیکی و نیرویی آن مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثربخشی سیستم تثبیت موقعیت در کنترل مناسب‌تر موقعیت ماژول با آزمایش تجربی صحت‌گذاری شده است.

کلیدواژه‌ها: ماژول مفصلی، آلیاژ حافظه‌دار، استحکام، تثبیت موقعیت

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۱

* نویسنده مسئول: m.sheikhi@sru.ac.ir

۱- مقدمه

علاقه به ربات‌های ماژولار در سال‌های اخیر به دلیل توانایی بالقوه، هزینه‌های کاهش‌یافته و گستره وسیعی از کاربردها افزایش یافته است. یکی از ویژگی‌های مهم ربات‌های ماژولار، انعطاف‌پذیری ماژول در جذب شوک و ضربه به‌ویژه در محیط‌های بدون ساختار است، مثل جاهایی که در استفاده از ربات‌های معمولی برای برآورده کردن این نیاز محدودیت‌های جدی وجود دارد. ماژول‌های مورد استفاده در بازوهای رباتیک ماژولار دارای مفاصلی هستند که بین دو رابط قرار گرفته است و باعث ایجاد حرکت زاویه‌ای بین رابط‌های ماژول می‌شوند. انعطاف‌پذیری ماژول‌های مورد استفاده در بازوهای رباتیک از طریق کاربرد مفصل چند درجه آزادی با بازه حرکتی زیاد و همچنین محرک‌های با دامنه حرکتی بزرگ قابل‌تأمین است. بالا بودن انعطاف‌پذیری ماژول برای عبور از مسیرهای منحنی‌شکل مزیت بزرگی است، ولی برای ماموریت‌هایی که در انتهای ماژول و توسط ابزار آلات نصب‌شده در انتهای بازو انجام می‌گیرد، مناسب نیست و ممکن است عملیاتی را که بایستی در موقعیتی مشخص انجام گیرد با مشکل مواجه کند. بنابراین سختی بالا برای دقت موقعیتی خوب و قابلیت بارگذاری عملگر نهایی بازو در انجام ماموریت‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

در فعل و انفعالات بین ربات و محیط کار، کنترل سختی (یا انطباق) مفاصل، برای تأمین تماس پایدار همراه با ایمنی عملیاتی، بسیار مهم است. بنابراین تلاش‌های تحقیقاتی مختلفی به سمت توسعه محرک‌ها با سفتی قابل تغییر انجام گرفته است [9-11]. سفتی متغیر مفصل می‌تواند از کنترل سفتی یک ربات معمولی متشکل از مفاصل صلب و یک سنسور نیرو-گشتاور به دست آید.

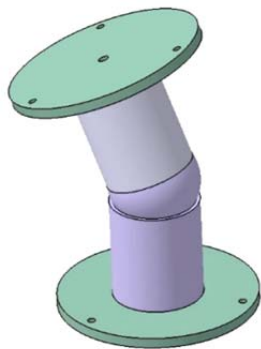
چوئی و همکاران [10]، مفصلی با سختی قابل تغییر برای یک بازوی رباتیک و نیز یک طرح کنترلی برای کنترل سختی و موقعیت این مفصل ارائه دادند. حالت تسلیم مفصل با استفاده از فنرهای ورقه‌ای و دو محرک که برای کنترل موقعیت استفاده می‌شوند، تولید و سفتی مفصل با به‌کارگیری اتصالات نواری چهارگانه ایجاد می‌شود. یانگ و همکاران [11]، یک طرح تحلیلی از یک ماژول مفصلی ۳ درجه آزادی با سختی قابل تغییر را مطرح کردند که با کابل تحریک می‌شود. برای دستیابی به تغییر قابل توجهی از سختی، فیکسچرهایی با سختی قابل تغییر به‌صورت پیاپی به هر یک از کابل‌ها اتصال داده شده است. فیروزه و همکاران [12]، یک بازوی مفصلی رباتیک یک‌درجه آزادی را مطرح کردند که با کشش کابل تحریک می‌شود و دارای مفاصل از جنس پلیمر حافظه‌دار با سختی قابل تنظیم است. در این بازو سختی مفاصل به‌واسطه کنترل دما می‌تواند تنظیم شود.

عضلات مصنوعی از نوع آلیاژ حافظه‌دار به‌خاطر انرژی زیاد نسبت به وزن کم، عملکرد نرم، بی‌صدا و تحریک و حس همزمانی که دارند، به‌طور فزاینده‌ای در حال رایج شدن هستند. این ویژگی‌ها باعث به‌کارگیری مناسب این محرک‌ها در زمینه رباتیک شده، به‌ویژه وقتی اندازه و وزن کم مورد نظر است. این نکته بایستی مورد توجه قرار گیرد که برخی از محدودیت‌ها همچون سرعت عمل پایین و رفتار پسماند و غیرخطی، پیچیدگی‌های مدل‌سازی، عدم قطعیت پارامتر و دشواری در اندازه‌گیری متغیرها همچون دما وجود دارد که تاکنون کاربردهای بالقوه محرک‌های آلیاژهای حافظه‌دار را محدود کرده است [13].

بسیاری از محققان، کاربردهای مختلفی از آلیاژهای حافظه‌دار را به‌ویژه به‌عنوان محرک‌های مفاصل رباتیکی گزارش داده‌اند. هادی و همکاران [14]، یک ماژول رباتیک جدید ۲ درجه آزادی با محرک‌های از جنس آلیاژهای حافظه‌دار را توسعه دادند. این ماژول از ترکیب فنرهای آلیاژ حافظه‌دار با دو صفحه موازی مفصل‌شده به یکدیگر تشکیل شده است که باعث ایجاد حرکت نسبی بین دو صفحه و در نهایت باعث ایجاد خمیدگی می‌شود. یکی از مزایای مهم این نوع ماژول ایجاد انعطاف‌پذیری و خمیدگی‌های بزرگ به دلیل استفاده از محرک‌های فنری است. از معایب این نوع ماژول عدم امکان تثبیت موقعیت و کنترل سفتی آن در مدت‌زمان نسبتاً بالا است. شی و همکاران [15]، طراحی و کنترل یک ماژول مفصلی ۲ درجه آزادی را ارائه دادند که توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار تحریک شده است و بازه حرکتی $\pm 60^\circ$ را می‌تواند ایجاد کند. این ماژول به دلیل داشتن مفصل کروی می‌تواند خمیدگی مناسبی را تأمین کند و از عیوب آن می‌توان به عدم سیستم تثبیت موقعیت و زیر بارماندن طولانی‌مدت محرک‌ها برای تأمین سختی ماژول اشاره کرد و از طرفی استفاده از محرک‌های از نوع سیم آلیاژ حافظه‌دار نیز در این ماژول می‌تواند محدوده حرکتی مورد نظر را محدود کند.

مدل‌های ارائه‌شده هادی و همکاران [14] و شی و همکاران [15] مفاصلی هستند که می‌توانند ۲ درجه آزادی و انعطاف‌پذیری مناسبی را تأمین کنند، اما برای تثبیت موقعیت آنها به مکانیزمی نیاز است تا بتوان در مواقع لازم مفصل را در موقعیت مورد نظر

مفصل قابل تحریک برای ایجاد درجات آزادی کافی شکل گرفت و نتیجه‌گیری شد که ۲درجه آزادی عمود بر هم برای ایجاد چابکی بهتر بازوی مفصلی مناسب بوده و طرح اولیه آن در شکل ۱ ارایه شده است.



شکل ۱) طرح اولیه ماژول انعطاف‌پذیر با مفصل کروی

تحریک ماژول توسط محرک‌های مختلفی همچون موتورهای دنده‌ای ساده می‌تواند انجام گیرد، اما محرک‌های موتوری، پیچیدگی و حجم مجموعه را نیز افزایش می‌دهند. در این تحقیق به‌منظور تامین انعطاف‌پذیری برای بهبود قابلیت جذب شوک ماژول و کاهش وزن و حجم محرک از آلیاژهای حافظه‌دار به‌عنوان محرک‌های ماژول استفاده شده است. آلیاژهای حافظه‌دار در حالی که اندازه کلی ماژول توسعه‌یافته را کاهش می‌دهند، قابلیت بالقوه تغییر شکلی بزرگ و به‌کارگیری سطح تقریباً ثابت نیرو در محدوده کاری را دارند. این مشخصات، مطلوب است و به‌صورت بالقوه ماژولی با انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری بالاتری را ایجاد می‌کند.

اگر چه کرنش ایجادشده توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار (حدوداً ۵٪) برای خمش و حرکت‌های بزرگ مناسب نیست، اما به‌طور گسترده‌ای در سیستم‌های رباتیک استفاده می‌شوند. این مقدار کرنش برای ایجاد تغییری قابل قبول در زاویه ماژول کافی نیست و باعث ایجاد فضای کاری محدود می‌شود.

این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که در عین حال که فنرهای آلیاژ حافظه‌دار تغییر شکل زاویه‌ای بزرگ‌تری را نسبت به نوع سیم ایجاد می‌کنند (بیش از ۲۰۰٪)، اما غالباً نیروی کوچک‌تری را تولید می‌کنند. بنابراین در طراحی بایستی از تعداد بیشتر فنر با جنس آلیاژ حافظه‌دار به‌صورت ۱۲۰درجه با مشخصات ارایه‌شده در جدول ۱ برای ایجاد خمیدگی در مفصل رباتیک انعطاف‌پذیر استفاده شود.

جدول ۱) مشخصات محرک فنری آلیاژ حافظه‌دار مورد استفاده در ماژول

| مشخصه | مقدار | واحد | ضریب |
|----------------------------------|---------|----------|-----------|
| مقاومت محرک SMA در فاز آستنیت | ۱/۸ | Ω | R_A |
| مقاومت محرک SMA در فاز مارتنزیت | ۳/۳ | Ω | R_M |
| گرمای ویژه فنر SMA | ۴۸۰ | J/kg°C | C_p |
| فاصله نصب محرک SMA از مرکز ماژول | ۳۰ | mm | r |
| اثر تنش روی دماهای آستنیت | ۱۰/۳ | °C | CA |
| اثر تنش روی دماهای مارتنزیت | ۱۰/۳ | °C | CM |
| قطر سیم فنر SMA | ۰/۳۸ | mm | d_{sma} |
| قطر فنر SMA | ۲/۵۴ | mm | D_{sma} |
| تعداد حلقه‌های فنر SMA | ۴۰ | - | N_{sma} |
| جرم فنر SMA | ۴/۲۸×۱۰ | kg | m |
| حداقل طول فنر SMA | ۴۰ | mm | l_0 |
| بیشترین طول قابل برگشت فنر SMA | ۲۳۰ | mm | y_L |
| مدول برشی در فاز آستنیت | ۲۶/۹ | GPa | G_A |
| مدول برشی در فاز مارتنزیت | ۱۷ | GPa | G_M |

ثابت نگه داشت.

در این مقاله، سعی بر این بوده است تا مکانیزم تثبیت موقعیتی برای این دو مدل با توجه به انعطاف‌پذیری بالای آنها برای کاربرد در عملیات‌های پزشکی جراحی طراحی و ساخته شود تا در مواقع لازم سختی بازو قابل تغییر باشد. از این رو سعی شده است تا طرح‌های قبلی بهبود پیدا کند و مشکلات قبلی همچون تحریک مداوم محرک‌ها برای مدت طولانی به‌منظور تامین سختی ماژول برطرف شود.

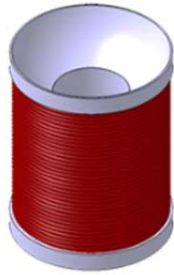
یکی از روش‌های مناسب برای ایجاد سختی و ثبات موقعیت، استفاده از خاصیت الکترومغناطیس بوده و در تحقیقی توسط *وهرمان* و همکاران^[16] مورد مطالعه قرار گرفته است. در این کار طراحی یک بازوی مفصلی قابل خمش توسط محرک‌های الکترومغناطیس مفصل‌بندی‌شده با ۲درجه آزادی، برای کاربردهای آندوسکوپی توسعه پیدا کرده است. این نوع محرک‌ها دارای یک قسمت کروی در مرکز بوده که از جنس ماده پارامغناطیس است و چهار سطح فرورمغناطیس وجود دارد که اطراف قسمت کروی در تماس عایق با آن قرار گرفته‌اند. هر یک از قسمت‌ها دارای سیم‌پیچ جداگانه‌ای است و با تحریک هر قسمت، بازو می‌تواند خمیده شود و با حفظ جریان الکترومغناطیسی که به وجود آمده است، در همان جهت ثابت بماند و سفتی مورد نظر را ایجاد کند. یکی از مهم‌ترین معایب این روش عدم انعطاف‌پذیری لازم مفاصل بازو است.

با توجه به مرور تحقیقات انجام‌شده، به نظر می‌رسد که توسعه ماژول‌های مفصلی با سختی قابل تغییر در آینده کمک زیادی به توسعه بازوهای رباتیک برای انجام ماموریت‌های خاص در جاهای تنگ و باریک در زمینه‌های پزشکی و صنعتی نماید. توسعه مفاصل با سختی قابل تغییر در تحقیقات مختلفی ارایه شده است^[9,11,12,16]. مکانیزم‌هایی که برای ایجاد سختی قابل تغییر در این تحقیقات در نظر گرفته شده، در طرح بویر و همکاران^[9] و *یانگ* و همکاران^[11] حجیم بوده است و برای بازوهای رباتیک مینیاتوری مناسب نیستند. در طرح فیروزه و همکاران^[12] نیز سختی قابل تغییر مفصل برای ماموریت‌های ذکرشده با توجه به استفاده از جنس پلیمر حافظه‌دار مناسب نیست. همچنین با توجه به مزایای استفاده از محرک‌های آلیاژ حافظه‌دار در بازوهای رباتیک مینیاتوری، به‌کارگیری آنها در ماژول‌های با مفاصل چند درجه آزادی در تحقیقاتی مورد بررسی قرار گرفته است^[14,15]. از این رو در این مقاله طرحی از یک ماژول انعطاف‌پذیر ارایه شده که از آهنربای الکترومغناطیسی برای تثبیت موقعیت مفصل مدل شی و همکاران^[15] و از محرک‌های حرکت خطی آلیاژ حافظه‌دار در سیستم *هادی* و همکاران^[14] برای تحریک در ایجاد خمیدگی بازو الگو گرفته شده است. این مکانیزم، نوعی مفصل با انعطاف‌پذیری و محدوده حرکتی مناسب را همراه با تثبیت موقعیت و سختی لازم برای استفاده در بازوهای رباتیک ایجاد می‌کند. یک سیستم تثبیت موقعیت الکترومغناطیسی جدید برای حفظ موقعیت بازو در موقعیت مطلوب به‌صورت تکاملی طراحی و ساخته شده و مورد آزمایش تجربی قرار گرفته و همچنین تحلیل نیرویی و سینماتیک آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- طراحی

۲-۱- طرح مفهومی سیستم مکانیکی

از بخش ۱ می‌توان نتیجه گرفت که حرکت زاویه‌ای اجزای یک ماژول مفصلی، در ایجاد قدرت مانور بالا و همچنین توانایی تثبیت موقعیت مفصل در تامین سختی لازم برای انجام وظایف بازوی رباتیک بسیار مفید است. بنابراین ایده اولیه برای توسعه یک



شکل ۳) طرح اول سیستم تثبیت کننده موقعیت الکترومغناطیسی برای مازول

دلیل استفاده از جنس آهن به عنوان هسته سیم پیچ، هدایت و تمرکز خطوط میدان مغناطیسی به دلیل نفوذپذیری خوب آهن نسبت به هوا است که باعث افزایش چگالی میدان در سطح مقطع هسته لوله ای شکل می شود و بنابراین نیروی جاذبه بین سطوح مفصل را افزایش می دهد.

ایده پیشنهادی اول می تواند نیروی جاذبه خوبی را ایجاد کند، اما برای سیستم تثبیت موقعیت مناسب نیست و با وجود این که هسته آهنی داخل سیم پیچ چگالی میدان بهتری را نسبت به سیم پیچ با هسته هوایی ایجاد می کند، تعدادی از خطوط میدان به دلیل وجود سوراخ در وسط هسته می توانند پراکنده شوند و در چگالی میدان تاثیر منفی بگذارند.

یک سیم پیچ رسانا دارای ضریب خودالقایی است که با تغییر در میدان مغناطیسی اطراف آن مخالفت می کند. به واسطه ضریب خودالقایی (L)، سیم پیچ، یک ولتاژ نیروی محرکه الکتریکی که متناسب با نرخ تغییر شدت جریان در جهت مخالف است را تولید می کند. اگر هندسه مدار و مشخصات ماده آن تغییر کند (در مورد سلونوئید فاصله هوایی)، خودالقایی یا همان مقاومت سلف ثابت نخواهد بود. خودالقایی تابعی از هندسه (از جمله تعداد دورها در سیم پیچ) و نفوذپذیری محیط است. اگر سیم پیچ القاگر یک تکه آهنی متحرک داشته باشد و نفوذپذیری مغناطیسی محیط با حرکت های هسته تغییر کند، خودالقایی یا همان مقاومت سلف تغییر می کند. یک سیم پیچ سلونوئیدی خود القاگر با طول l ، مجموع تعداد حلقه n و سطح مقطع A مفروض است. فرض بر این بوده که داخل سیم پیچ هوا بوده و شار مغناطیسی داخل سیم پیچ یکنواخت است [17]. بنابراین شار مغناطیسی به صورت زیر است:

$$\Phi_B = B \cdot A = \mu_0 \cdot \left(\frac{n}{l}\right) \cdot I \cdot A \quad (2)$$

تغییر شار مغناطیسی بر اثر تغییر در اندوکتانس یا همان ظرفیت القای مغناطیسی ایجاد می شود. در یک مدار حتی اگر جریان ثابت باشد، تغییر در شار مغناطیسی می تواند ناشی از تغییر هندسه و نفوذپذیری هسته (تغییر مقاومت مغناطیسی) باشد و این امر منجر به جبران نیروی محرکه الکتریکی القایی می شود که این پدیده در سلونوئیدها و موتورهای با مقاومت مغناطیسی متغیر رخ می دهد. با معادل قراردادن یک مدار مغناطیسی با یک مدار الکتریکی، نیروی محرکه مغناطیسی (MMF) در مدار مغناطیسی معادل نیروی محرکه الکتریکی یا ولتاژ (V) در مدار الکتریکی بوده و تعداد دور سیم پیچ (n) در مدار مغناطیسی نیز معادل ضریب خودالقایی در مدار الکتریکی بوده و تغییرات شدت جریان هم معادل با تغییرات شار مغناطیسی است. بنابراین:

$$V_{bemf} = -L \frac{dl}{dt} = -n \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3)$$

همچنین:

مساله بعدی در طراحی، مربوط به مکانیزم تثبیت موقعیت است. تثبیت موقعیت مفصل باعث محدود کردن حرکت آزادانه مفصل بعد از تنظیم موقعیت می شود و استحکام مازول را به منظور مقاومت در برابر نیروهای وارده هنگام انجام ماموریت افزایش می دهد. این استحکام را می توان تا حدودی با نگهداشتن محرک ها در وضعیت تحریک ایجاد کرد، اما با توجه به این که محرک های آلیاژ حافظه دار هنگام تحریک، راندمان پایینی در مصرف انرژی دارند، در صورت تحریک همیشگی باعث افزایش شدید مصرف انرژی می شوند و بنابراین استفاده از آنها در مازول مقرون به صرفه نخواهد بود.

مکانیزمی که به منظور کاهش ابعاد مازول در نظر گرفته شده، استفاده از ظرفیت نیروی آهنربای الکترومغناطیسی در خود مازول برای تولید نیروی کششی و اصطکاک در مفصل است. در این روش از یک سیم پیچ تعبیه شده در داخل مازول به منظور ایجاد نیروی کششی بین سطح کاسه ای و مفصل کروی استفاده می شود. با اعمال جریان، مدار مغناطیسی بین هسته، مفصل کروی و دیواره مازول که همه از جنس ماده فرومغناطیس با نفوذپذیری بالایی هستند، برقرار می شود و نیروی عمودی وارد بر مفصل کروی و پیروی آن نیروی اصطکاک افزایش می یابد که باعث مقاومت مفصل در برابر نیروهای اعمال شده به آن می شود. این مجموعه الکترومغناطیسی از پایه ای با انتهای کروی شکل و یک بوبین سیم پیچی شده با انتهای مقعری شکل تشکیل شده است، به گونه ای که با مونتاژ قسمت کروی داخل قسمت مقعری شکل رابط بالایی، دو رابط می توانند تحت این مفصل، آزادانه به هر سمت بچرخند (شکل ۲). در این مکانیزم نیاز به یک سیم پیچ به منظور تامین میدان الکترومغناطیسی است تا هنگام انرژی دار شدن بتواند نیروی لازم را ایجاد کند. برای طراحی رابط بالایی که باید دربرگیرنده مجموعه الکترومغناطیسی سیستم تثبیت موقعیت نیز باشد، چندین طرح مورد نظر قرار گرفته است.

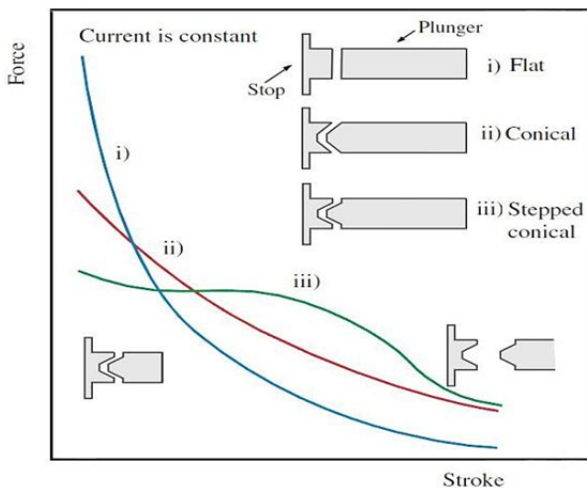
در طرح اول که در شکل ۳ نشان داده شده، از یک هسته آهنی توخالی استفاده شده که اطراف آن با در نظر گرفتن محدودیت های ابعادی و مطابق با نیروی درخواستی، سیم مسی پیچیده شده است. با توجه به رابطه ۱ که بیان کننده چگالی میدان مغناطیسی است، افزایش تعداد دور سیم پیچ، چگالی میدان بزرگتری را ایجاد می کند. انتهای این هسته به شکل مقعر و با کیفیت سطح خیلی خوب به گونه ای پرداخت کاری شده است که هنگام مونتاژ شدن روی قسمت کروی مفصل انطباق بالایی با آن داشته باشد. افزایش این انطباق باعث کاهش فاصله هوایی می شود، مقاومت مغناطیسی کاهش می یابد و نیروی جاذبه بین هر دو جزء مفصل افزایش می یابد که این افزایش نیروی جاذبه مغناطیسی بین دو سطح، اصطکاک زیادی را بین دو سطح به وجود می آورد و منجر به تثبیت مفصل می شود.

$$B = \frac{\mu_0 n I}{l} \quad (1)$$



شکل ۲) طرح بدنه مازول شامل پایه سرکروی

مغناطیسی تولیدشده توسط سیم‌پیچ است. بنابراین وقتی سیم‌پیچ انرژی‌دار می‌شود، پلانجر به سمت متوقف‌کننده کشیده می‌شود. شدت میدان مغناطیسی (تعداد دور سیم‌پیچ در شدت جریان) و نفوذپذیری مغناطیسی بهتر محیط اطراف سیم‌پیچ که شار مغناطیسی را برای پلانجر هدایت می‌کند، نیروی بزرگ‌تری را تولید می‌کند. کیفیت مدار مغناطیسی و توانایی آن برای هدایت خطوط شار مغناطیسی به نفوذپذیری مغناطیسی قاب سیم‌پیچ، فاصله هوایی بین پلانجر و سیم‌پیچ (که فاصله ثابت است) و فاصله هوایی بین پلانجر و متوقف‌کننده (که فاصله متغیر است) بستگی دارد. به‌ازای یک شدت جریان معین، نیروی تولیدشده توسط سلونوئید به‌عنوان تابعی از فاصله هوایی بین پلانجر و متوقف‌کننده تغییر می‌کند. این فاصله هوایی کوچک‌تر، مقاومت مغناطیسی کمتری را در مسیر شار مغناطیسی ایجاد می‌کند و از این رو نیروی بزرگ‌تری تولید می‌شود. نیرو به‌عنوان تابعی از جابه‌جایی پلانجر تحت شدت جریان ثابت تغییر می‌کند که در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ تغییرات نیروی سلونوئید به‌ازای شدت جریان ثابت و فاصله هوایی متغیر و همچنین تغییرات شکل هندسی پلانجر و متوقف‌کننده [17]

با توجه به توضیحات و اطلاعات به‌دست‌آمده در طراحی سلونوئیدها، این موارد در طراحی ماژول فعلی نیز می‌تواند در نظر گرفته شود. یعنی قسمت الکترومغناطیس ماژول بایستی به‌گونه‌ای طراحی شود که دارای یک هسته و قاب از جنس ماده فرومغناطیس به‌منظور هدایت شار مغناطیسی باشد و طرف دوم که قسمت کروی ماژول است نیز از جنس ماده فرومغناطیس انتخاب شود تا نفوذپذیری مغناطیسی مناسب باعث هدایت بهتر شار مغناطیسی شود. بنابراین مسیر شار مغناطیسی می‌تواند بین قاب فلزی، هسته مرکزی (که با قاب یکپارچه است) و قسمت کروی مفصل ماژول برقرار شود.

بنابراین در طرح سوم، از یک قاب احاطه‌کننده سیم‌پیچ که با هسته مرکزی بوبین یکپارچه بوده و از جنس ماده‌ای فرومغناطیس با نفوذپذیری بالا بوده، مطابق با شکل ۶ استفاده شده است. در این طرح با اعمال شدت جریان الکتریکی، شار مغناطیسی در قاب و هسته مرکزی در مواجهه با پایه سرکروی مفصل که از جنس ماده‌ای فرومغناطیس است، ایجاد می‌شود و با تشکیل مدار شار مغناطیسی و کاهش فاصله هوایی، سطح کروی پایه و سطح کاسه‌ای قاب تمایل شدیدی به کم‌کردن مقاومت مغناطیسی پیدا می‌کند و همدیگر را با نیروی زیادی جذب می‌کنند. بنابراین نیروی

$$L \cdot I = n \cdot \Phi_B \quad (۴-الف)$$

$$L = \frac{n \cdot \Phi_B}{I} \quad (۴-ب)$$

با جای‌گذاری رابطه ۲ در (۴-ب):

$$L = \frac{n \cdot \mu_0 \cdot \left(\frac{n}{l}\right) \cdot I \cdot A}{i} = \frac{\mu_0 \cdot n^2 \cdot A}{l} \quad (۴-ج)$$

و به‌دلیل این که مقاومت مغناطیسی با تغییر ضریب نفوذپذیری هوا، سطح مقطع و طول هسته تغییر می‌کند، بنابراین ضریب خودالقایی مدار به‌صورت زیر است:

$$L = \frac{n^2}{R_B} \quad (۵)$$

که نشان‌دهنده این نکته بوده که ضریب خودالقایی تابع هندسه سیم‌پیچ و نفوذپذیری محیط است. اگر هسته سیم‌پیچ از جنس آهن باشد، μ_m که برای آهن و حدود ۱۰۰۰ برابر بیشتر از نفوذپذیری هوا است، جایگزین μ_0 می‌شود. بنابراین ضریب خودالقایی سیم‌پیچ بایستی با همان نرخ بیشتر شود. از این رو طرح اول به‌دلیل این که دارای فاصله هوایی زیادی به اندازه قطر سوراخ است و با توجه به مطالب بیان‌شده در مورد عوامل موثر در ضریب خودالقایی سیم‌پیچ، بنابراین شار مغناطیسی به‌درستی هدایت نمی‌شود و نیروی خیلی کمتری بین دو سطح ایجاد می‌شود. از این رو این طرح برای سیستم تثبیت مناسب نیست و بایستی اصلاحاتی در این طرح انجام شود.

در طرح دوم (شکل ۴)، هسته فلزی از جنس ماده فرومغناطیس با نفوذپذیری بالا به‌شکل توپُر به‌عنوان هسته مرکزی سیم‌پیچ مورد استفاده قرار گرفته و به‌دلیل توپُر بودن هسته، تمرکز خطوط میدان و همچنین چگالی میدان مغناطیسی بهبود یافته است.



شکل ۴ طرح دوم سیستم تثبیت‌کننده موقعیت الکترومغناطیسی برای ماژول

طبق رابطه ۶، عواملی همچون شدت جریان، تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ و مقاومت مغناطیسی شامل فاصله هوایی بین دو سطح (X) ، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی ماده (μ) و همچنین دما روی نیروی به‌دست‌آمده در سیم‌پیچ هسته‌دار تاثیرگذار است. از این رو طبق این رابطه، با توجه به محدودیت ابعاد، تنها می‌توان قطر سیم را به‌منظور افزایش تعداد دور کاهش داد، اما این پارامتر نیز به‌دلیل کاهش جریان و افزایش دمای سیم‌پیچ نمی‌تواند کاهش یابد و تعداد دور بایستی یک تعداد بهینه انتخاب شود. بنابراین تنها پارامتر موثر در افزایش نیرو می‌تواند شکل هندسی هسته آهنی باشد که با طراحی درست می‌توان شار مغناطیسی را هدایت کرد و مدار بسته‌ای برای شار ایجاد نمود و در نهایت میدان قوی‌تری را تشکیل داد.

$$F_{sol} = F_{sol}(I, n_{coil}, R_B(x, \mu), T) \quad (۶)$$

قبل از ارایه طرح نهایی، ساختار سلونوئیدها و مکانیزم عملکرد آنها را بررسی می‌کنیم. عملکرد سلونوئیدها براساس تمایل پلانجر یا پیستون آن به حداقل کردن مقاومت مغناطیسی در نتیجه شار

همچنین نیروی حاصل از چگالی میدان مغناطیسی روی بخشی از ماده هسته به صورت زیر است [17]:

$$E = \frac{B^2 \cdot A}{2\mu_0} \quad (۸)$$

و برای یک مدار بسته الکترومغناطیسی:

$$B = \frac{n \cdot I \cdot \mu_m}{L} \quad (۹)$$

و با جای گذاری رابطه ۹ در ۸:

$$E = \frac{\mu_m^2 \cdot n^2 \cdot I^2 \cdot A}{2\mu_0 \cdot L^2} \quad (۱۰-الف)$$

و به دلیل این که در این ماژول هنگام عملکرد سیستم الکترومغناطیس، فاصله هوایی وجود نداشته یا در حد صفر است، بنابراین مدار به صورت کاملاً یکپارچه، فرض و ضریب نفوذپذیری هوا با ضریب نفوذپذیری هسته آهنی جایگزین می شود. بنابراین برای سیستم بدون فاصله هوایی:

$$E = \frac{\mu_m \cdot n^2 \cdot I^2 \cdot A}{2 \cdot L^2} \quad (۱۰-ب)$$

از جمله رفتارهای مهم سیستم تثبیت موقعیت، تحمل مفصل در برابر چرخش هنگام اعمال نیرو است. این تحمل نیرو را می توان با تغییر پارامترهایی افزایش داد. پس این پارامتر تاثیرگذار را می توان با بارگذاری نیرو روی ماژول به صورت تجربی بررسی نمود.

اگر جای گذاری نیروها به منظور بررسی عملکرد اصطکاکی سیستم تثبیت موقعیت مطابق با شکل ۷ در نظر گرفته شود، طبق روابط تعادل در استاتیک:

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow N = F + W \quad (۱۱-الف)$$

$$\sum M_o = 0 \Rightarrow f_s \cdot r = F \cdot R \quad (۱۱-ب)$$

بنابراین با جای گذاری روابط ۷ و ۱۱-الف در ۱۱-ب داریم:

$$\mu_s = \frac{F \cdot R}{r(F + W)} \quad (۱۲)$$

W جرم مجموعه قاب استوانه ای و وزنه های روی آن، F نیروی موجود در انتهای بازوی ایجادکننده گشتاور، R طول بازوی ایجادکننده گشتاور و r شعاع کره مفصل است.

اگر نیروی کششی حاصل از فعال بودن سیستم تثبیت موقعیت ماژول نیز در نظر گرفته شود، بنابراین می توان W را به نیروی کششی سیستم اضافه کرد و کل نیروی وارد بر مفصل را معادل همان نیروی E در رابطه ۸ در نظر گرفت. پس روابط تعادلی ۱۱-الف و ۱۱-ب تبدیل می شود به:

$$E + F = N \quad (۱۳)$$

$$f_s \cdot r = F \cdot R \quad (۱۴)$$

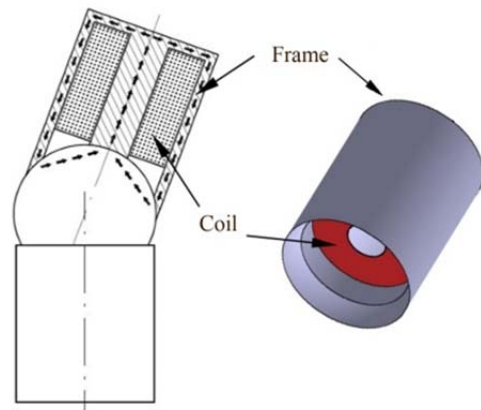
و بنابراین با حل و جای گذاری پارامتر N در روابط بالا:

$$F = \frac{E \cdot \mu_s \cdot r}{R - \mu_s \cdot r} \quad (۱۵)$$

بنابراین از آنجایی که این نیرو به عنوان نیروی ایجادکننده گشتاور در سیستم تثبیت موقعیت عمل می کند، در ادامه عملکرد اصطکاکی مفصل در مواجهه با این نیرو در این مکانیزم بررسی می شود.

بزرگتری بین دو سطح کروی مفصل در این طرح نسبت به طرح های دیگر قابل دستیابی است.

به منظور جای گذاری محرک های فنری نوع آلیاژ حافظه دار در ماژول و ایجاد فاصله با بدنه ماژول، نیاز به صفحات عایق در رابط های بالا و پایین ماژول است تا با تحریک آنها ماژول بتواند تغییر زاویه دهد. این صفحات از جنس عایق انتخاب شده و از جنس چوب یا پلکسی گلاس با ضخامت ۴ میلی متر در نظر گرفته شده اند.



شکل ۶ طرح نهایی بدنه ماژول شامل قاب و هسته فلزی یکپارچه (با آن که مجموعه الکترومغناطیس داخل آن جاسازی شده است) و شماتیکی از عملکرد سیستم تثبیت کننده ماژول مغناطیسی

۲-۲- طراحی سیستم الکتریکی

بلوک دیاگرام طراحی الکتریکی ماژول شامل میکروکنترلر (ATMEGA16)، ترانزیستورهای مناسب به عنوان درایور محرک های آلیاژ حافظه دار (BU406)، سنسور شیب سنج (ADXL345) و درایوهای ارتباطی است. میکروکنترلر به منظور مدیریت حرکت محرک های فنری آلیاژ حافظه دار و الزامات ارتباطی استفاده می شود. داده های سنسوری شامل موقعیت های زاویه ای است. درایورهای محرک ها، ترانزیستورهای توان بالا هستند که شدت جریان های بالا را برای یک تحریک سریع فراهم می کنند.

۳- مدل سازی

مدل سازی ماژول در این مقاله در زمینه نیروی قابل تحمل توسط مفصل هنگام فعال بودن سیستم تثبیت موقعیت مورد بحث قرار گرفت. یکی از رفتارهای مهم ماژول، عملکرد اصطکاکی سیستم تثبیت کننده موقعیت در مفصل کروی به منظور جلوگیری از غلطش مفصل و در نتیجه تغییر زاویه بازو است. این اصطکاک هنگام نیاز به تغییر زاویه در ماژول بایستی به حداقل ممکن رسیده باشد و هنگام تثبیت موقعیت بایستی به حداکثر برسد. در هنگام تثبیت موقعیت یکی از عواملی که باعث افزایش اصطکاک می شود، عملکرد سیستم الکترومغناطیسی است که نیروی عمودی وارد بر مفصل را افزایش می دهد و باعث عملکردی مانند ترمز می شود. عامل دیگر هم ضریب اصطکاک سطوح است. همان گونه که قبلاً نیز توضیح داده شد، نیروی عمودی، حاصل چگالی میدان سیستم الکترومغناطیس است. پس برای بررسی رفتار اصطکاکی ماژول، عملکرد این نیرو و همچنین ضریب اصطکاک سطوح بررسی می شود.

طبق رابطه اصطکاک ایستایی:

$$f_s = \mu_s \cdot N \quad (۱۶)$$

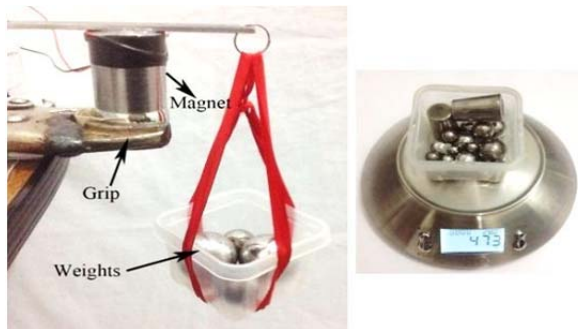
۴-۲- ساخت برد الکتریکی

سیستم کنترل ماژول از دو زیرسیستم تحریک و زیرسیستم تثبیت موقعیت تشکیل شده است. زیرسیستم تحریک شامل برد الکترونیکی و محرک‌های فنری است که تحریک و کنترل خمیدگی ماژول را بر عهده دارند. برد الکترونیکی شامل میکروکنترلر ATMEGA16A، ترانزیستورهای مناسب به‌عنوان درایور محرک‌ها، مقاومت‌ها، سنسور موقعیت زاویه‌ای، LCD نشان‌دهنده موقعیت، لامپ‌های LED نشان‌دهنده فرکانس PWM، پایه‌های ورودی و خروجی داده‌ها، پایه‌های خروجی جریان به محرک‌ها و پایه‌های ورودی جریان از منبع تغذیه است. زیرسیستم تثبیت موقعیت نیز شامل بوبین سیم‌پیچی شده است که توسط همان برد میکروکنترلی هدایت می‌شود.

۴-۳- آزمایش‌های تجربی

در این بخش، سیستم تثبیت موقعیت ماژول توسعه‌یافته از نظر عملکرد اصطکاکی و همچنین تحمل نیرو مورد آزمایش تجربی قرار گرفته است.

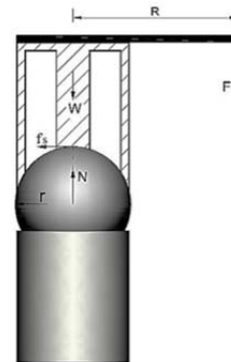
در ابتدا عملکرد ماژول از نظر تحمل نیروی‌های وارد بر آن در هر سه طرح بررسی و مقایسه شده و سپس عملکرد ماژول آن از نظر میزان تغییر شکل، پوشش فضای کاری و همچنین پایداری در وضعیت مطلوب مورد ارزیابی قرار گرفته است. آزمایش تجربی در این قسمت با استفاده از اعمال گشتاور توسط تعدادی وزنه با جرم مشخص و بازوی نگهدارنده وزنه مطابق با شکل ۸ انجام گرفته است. در این روش پایه ماژول با نیروی مناسبی توسط گیره به‌صورت ثابت نگه داشته شده و قسمت بالایی ماژول که دارای بوبین است (بدون محرک‌های فنری) با کره، مماس و جریان برقرار شده است تا قاب بوبین جذب کره شود. سپس وزنه‌ها به ظرف مناسبی که به انتهای بازوی متصل است، اضافه شدند تا جایی که با افزایش نیروی ایجادکننده گشتاور، مفصل شروع به چرخش کند. این آزمایش به‌ازای ولتاژهای مشخصی انجام شده و جریان و جرم وزنه‌ها در هر مرحله اندازه‌گیری شده و مقادیر ثبت شده‌اند و تغییرات نیروی ایجادکننده گشتاور نسبت به شدت جریان در نمودار آرایه شده است.



شکل ۸) آزمایش تجربی تغییرات نیرو نسبت به شدت جریان در سیستم تثبیت موقعیت

هدف از آزمایش سیستم تثبیت موقعیت، میزان مقاومت سیستم در برابر نیروی ایجادکننده گشتاور است که با تغییر جریان، تغییر می‌کند. این تغییرات در بخش قبل طبق رابطه ۱۰- ب بررسی شد. در آزمایش حاضر نیز تغییرات نیرو نسبت به شدت جریان به‌صورت تجربی در هر سه طرح سیستم تثبیت موقعیت، اندازه‌گیری و مقایسه شدند (نمودار ۲).

در مرحله دوم نیز آزمایش تجربی کنترل ماژول در موقعیت‌های

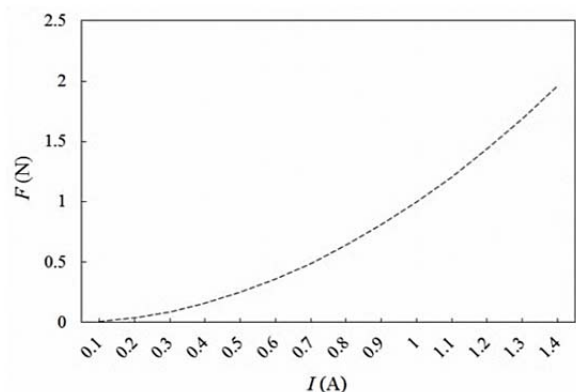


شکل ۷) شماتیکی از جای‌گذاری نیروهای حاصل از آزمایش عملکرد اصطکاکی مفصل روی سیستم تثبیت موقعیت

طبق روابط ۶ و ۱۵ و آن چه در مورد پارامترهای تاثیرگذار در قسمت‌های پیشین بیان شد، تنها پارامتر قابل تغییر برای افزایش نیروی قابل تحمل توسط سیستم تثبیت موقعیت، شدت جریان است. بنابراین طبق روابط ۱۰- ب و ۱۵ نیروی F تنها با شدت جریان قابل تغییر است و بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شود. پس:

$$F \propto I^2 \quad (16)$$

بنابراین اگر هدف بررسی رفتار سیستم تثبیت موقعیت ماژول مطابق با مدل بالا به‌صورت تئوری باشد، تغییرات نیروی ایجادکننده گشتاور نسبت به شدت جریان طبق رابطه اخیر به‌صورت نمودار ۱ قابل رسم است که افزایش نیروی قابل تحمل در برابر افزایش شدت جریان را نشان می‌دهد.



نمودار ۱) تغییرات نیرو نسبت به شدت جریان در حالت تئوری.

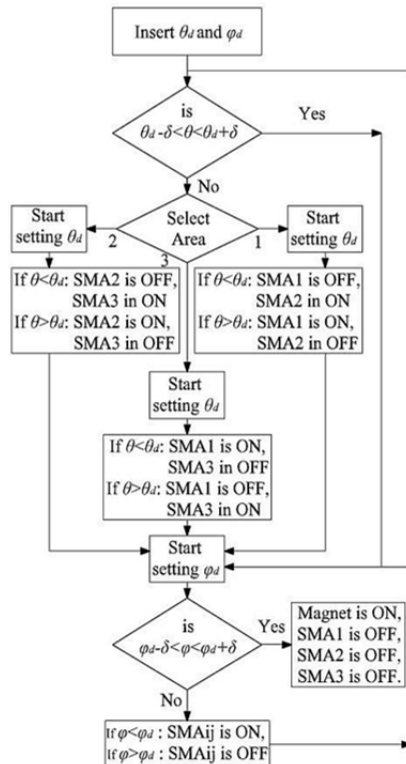
۴-۴- نمونه‌سازی و آزمایش‌های تجربی

این قسمت شامل ساخت مکانیزم مکانیکی و ساخت برد الکتریکی به‌شرح زیر است:

۴-۱- ساخت مکانیزم مکانیکی

بدنه ماژول از دو قسمت پایه ماژول و بازوی بالایی حامل سیم‌پیچ ساخته شده که پایه به‌صورت سرکروی و انتهای بازوی بالایی به‌شکل کاسه‌ای است و با مونتاژ این دو قسمت یک بازوی مفصلی تشکیل می‌شود. برای ساخت این دو قسمت اصلی مفصل از جنس آهن ترانس با کمترین درصد آلیاژی با نام شفت ST37 استفاده شده و با استفاده از فرآیندهای برشکاری و فرزکاری، ماشین‌کاری شده است. صفحات ارتباط‌دهنده بین دو قسمت اصلی بدنه ماژول نیز که محرک‌های فنری روی آنها نصب می‌شوند از جنس چوب است و با استفاده از برشکاری CNC ساخته شده‌اند.

ارایه شده در شکل ۱۰ استفاده شده است.



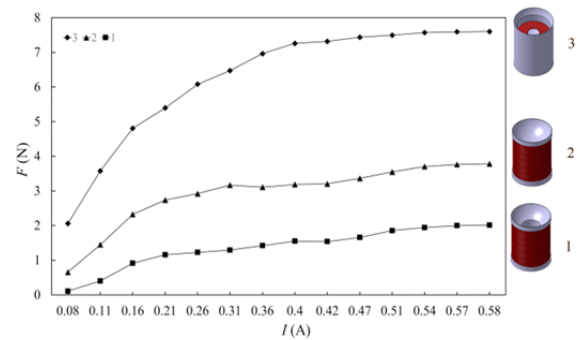
شکل ۱۰) الگوریتم کنترل موقعیت ماژول با سیستم تثبیت موقعیت

در آزمایشات انجام گرفته، چندین موقعیت مطلوب نمونه در فضای کاری ماژول برای تحقق توسط کنترلر مد نظر قرار گرفته که نتایج یک بار با به کارگیری سیستم تثبیت موقعیت و یک بار دیگر بدون استفاده از سیستم تثبیت موقعیت استخراج شده است. در ابتدا کنترل ماژول به منظور دستیابی به موقعیت $\theta = 20^\circ$ و $\varphi = 30^\circ$ مورد آزمایش قرار گرفته است. مطابق با نتایج در نمودار ۳، موقعیت به دست آمده ماژول پس از ۶۰ ثانیه شامل $\theta = 20^\circ$ و $\varphi = 10^\circ$ است، در صورتی که هدف موقعیت $\varphi = 30^\circ$ بوده است. این عدم مطابقت می تواند به دلیل کم بودن ولتاژ تحریک محرکها یا عدم توانایی ایجاد گشتاور کافی توسط فنرها باشد. حداکثر ولتاژ مجاز برای تحریک محرکها ۴/۵ ولت است و اعمال ولتاژ بیشتر باعث داغ شدن بیش از حد فنرهای آلیاژ حافظه دار و در نهایت از دست رفتن خاصیت حافظه داری فنر خواهد شد.

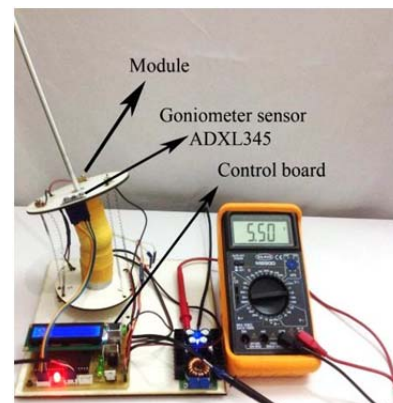
چون در ماژول مورد تحقیق، محدوده حرکتی زیاد برای انعطاف پذیری بالا و همچنین نیروی خمیدگی زیاد برای تغییر زاویه ماژول مورد نیاز بوده، بنابراین محرکهای نوع فنری مورد استفاده قرار گرفته است. ممکن است بتوان ظرفیت گشتاور ماژول برای تحمل بارهای بیشتر و پاسخ سریع تر را با اضافه کردن آلیاژهای حافظه دار به صورت موازی افزایش داد که از این رو برای رفع مشکلاتی از قبیل افزایش زمان پاسخ، از فنرهای با قطر مفتول کم و به صورت جفتی در هر یک از جهات ۱۲۰، ۲۴۰ و ۳۶۰ درجه در طرح نهایی استفاده شده است.

فنرهای آلیاژهای حافظه دار به منظور ایجاد نیرو برای خمیدگی ماژول، یک سیکل عملکردی دارند که با توجه به توان مصرفی آنها، یک منحنی از گشتاور اعمالی این نوع از محرکهای فنری در محدوده جریان مصرفی ۱/۵ تا ۳/۵ آمپر در نمودار ۴ ارایه شده است.

مطلوب با سخت افزار نشان داده شده در شکل ۹ انجام گرفته و سپس نتایج کنترلی مربوط به آزمایشات انجام شده به منظور بررسی میزان تغییر شکل ماژول، پوشش فضای کاری ماژول و پایداری در موقعیت مطلوب ارایه شده است. فضای کاری ماژول را می توان با استفاده از پارامترهای θ و φ و آزمایشات تجربی مطابق با جدول ۲ استخراج نمود. آزمایشاتی به منظور بررسی عملکرد کنترلی در موقعیت دهی ماژول طراحی شده و یافتن موقعیت های مطلوب با تنظیم همزمان زوایای θ و φ و عملکرد سیستم تثبیت موقعیت انجام گرفته است.



نمودار ۲) نمودار تجربی تغییرات نیرو نسبت به شدت جریان در هر سه طرح سیستم تثبیت موقعیت



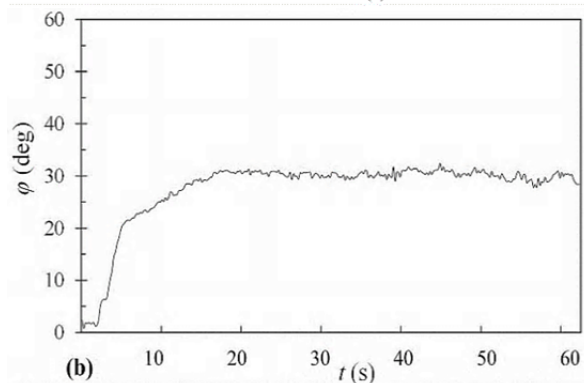
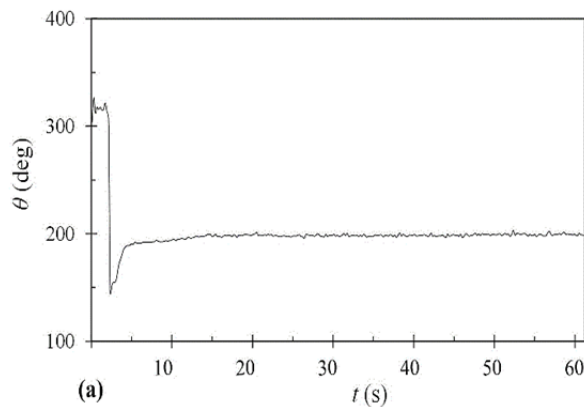
شکل ۹) سخت افزار تحریک در آزمایش تجربی کنترل موقعیت و سیستم تثبیت موقعیت ماژول

جدول ۲) فضای کاری ماژول

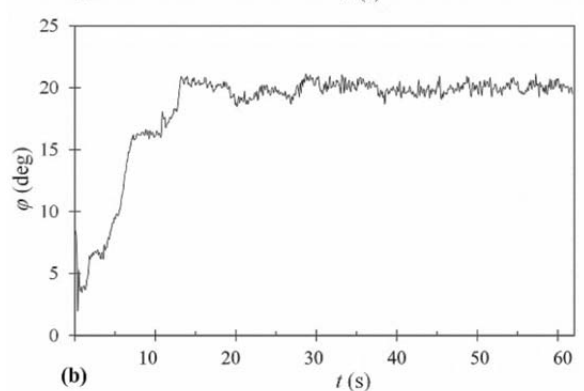
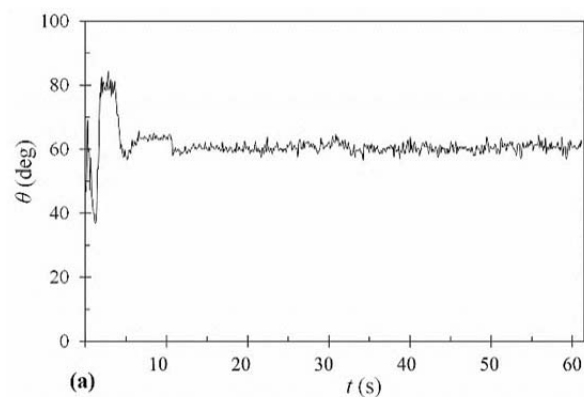
| پارامتر | θ | φ |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| بازه کاری | Min= 0° Max= 36° | Min= 0° Max= 60° |

کنترلی که در این تحقیق برای ماژول استفاده شده، مبتنی بر استفاده از تجربه و شناخت رفتار آلیاژ حافظه دار پس از تحریک است. در حقیقت در سیستم های پیچیده مهندسی یکی از راه های کنترل سیستم، استفاده از منطق فازی است. در این روش قوانینی بر پایه شناخت و تجربه رفتار سیستم، استخراج و سیستم بر پایه این قوانین کنترل می شود. الگوریتم استفاده شده در کنترل ماژول بر پایه استخراج قوانینی موثر برای کنترل ماژول انعطاف پذیر عمل می کند که با سه محرک آلیاژ حافظه دار تحریک می شود. این قوانین می تواند به شکل موثری در توسعه کنترلرهای فازی که برای ماژول ارایه شده با مدل پیچیده کاملاً توجه پذیر است، عمل نماید. برای کنترل موقعیت و سیستم تثبیت موقعیت ماژول از الگوریتم

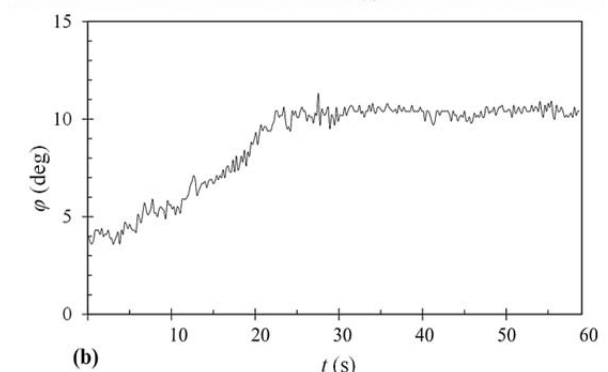
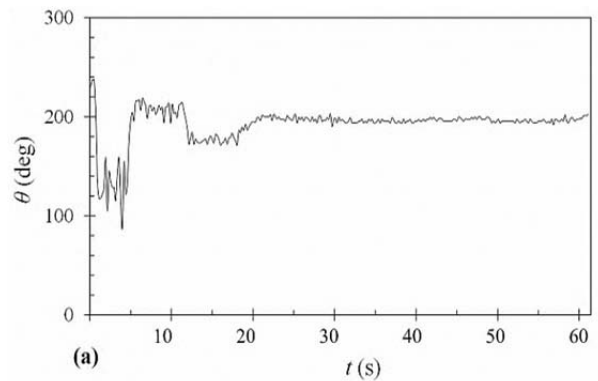
طراحی یک ماژول پایه‌ای برای حرکت زاویه‌ای مفاصل کروی با به‌کارگیری محرک‌های آلیاژهای SMA
نیروهای مخالفت‌کننده محرک‌های دیگر در برابر خمیدگی ماژول باشد.



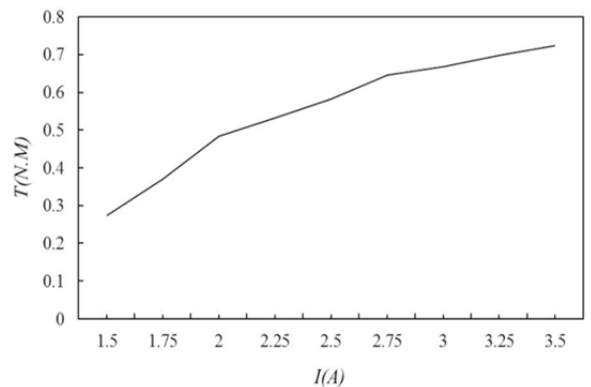
نمودار ۵ موقعیت‌دهی ماژول برای زاویه $\theta_d=200^\circ$ و $\varphi_d=30^\circ$ بدون استفاده از سیستم تثبیت‌کننده موقعیت: (a) $\theta_d=200^\circ$, (b) $\varphi_d=30^\circ$



نمودار ۶ موقعیت‌دهی ماژول برای زاویه $\theta_d=60^\circ$ و $\varphi_d=20^\circ$ بدون استفاده از سیستم تثبیت‌کننده موقعیت: (a) $\theta_d=60^\circ$, (b) $\varphi_d=20^\circ$



نمودار ۳ موقعیت‌دهی ماژول برای زاویه $\theta_d=200^\circ$ و $\varphi_d=30^\circ$ با کاربرد یک محرک فنری در هر جهت: (a) $\theta_d=200^\circ$, (b) $\varphi_d=30^\circ$



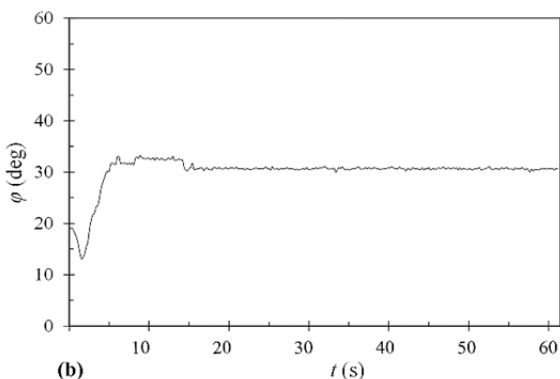
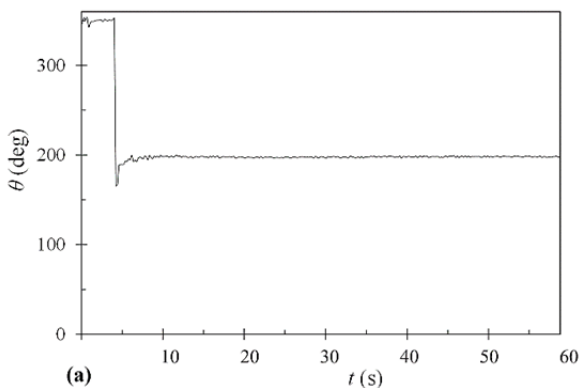
نمودار ۴ گشتاور ایجادشده توسط ماژول حاصل از سیکل عملکردی یک جفت از محرک‌های فنری آلیاژ حافظه‌دار

در مرحله بعد با تغییر طراحی ماژول از حالت محرک‌های تک‌فنر به محرک‌های دوقلو، آزمایشات جدیدی با ولتاژ تحریک ۵/۵ ولت روی ماژول به‌منظور خمیدگی در جهات مختلف با کاربرد سیستم تثبیت موقعیت ماژول و البته بدون کاربرد سیستم تثبیت موقعیت انجام گرفته که نتایج آن در قسمت بعدی ارائه شده است.

در نمودارهای ۷-۵ نتایج مربوط به آزمایش توانایی میکروکنترلر برای موقعیت‌دهی به نقاط $(\theta_d=200^\circ-\varphi_d=30^\circ)$ ، $(\theta_d=60^\circ-\varphi_d=20^\circ)$ و $(\theta_d=340^\circ-\varphi_d=40^\circ)$ البته بدون استفاده از سیستم تثبیت موقعیت ارائه شده است، به‌گونه‌ای که وظیفه تثبیت در موقعیت مطلوب را خود محرک‌ها بر عهده دارند. همان‌گونه که از اشکال مشخص بوده، موفقیت کنترلر برای پایدارنگهداشتن ماژول در موقعیت مطلوب با نوساناتی همراه شده است. همان‌گونه که قابل پیش‌بینی بوده این نوسانات برای زاویه φ بیشتر است که می‌تواند به‌دلیل نیروی مقاومت‌کننده پوشش لاتکسی و همچنین

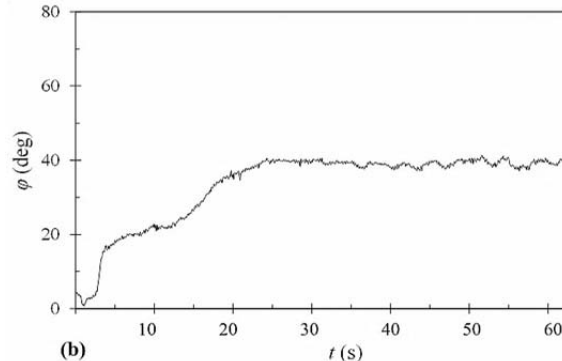
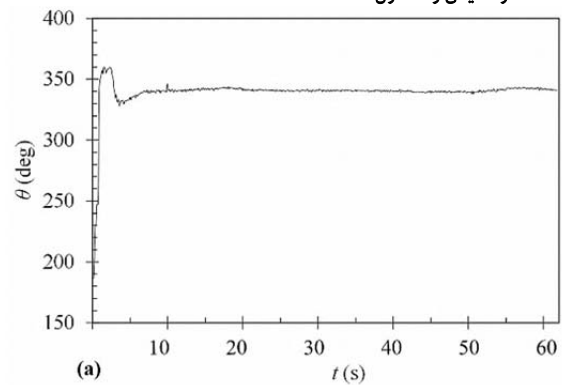
مطلوب ماژول قابل توجیه به نظر می‌رسد.

برای تثبیت موقعیت می‌شد از روش‌های مختلفی مانند به‌کارگیری ترمز مکانیکی استفاده نمود که با اعمال نیروی اصطکاک حرکت ماژول متوقف شود. لیکن طراحی ارائه‌شده در این مقاله برای سیستم به‌کارگیری سیستم ترمز مغناطیسی برای تثبیت و توقف حرکت ماژول بوده است. این سیستم ضمن دارا بودن سرعت مناسب از مصرف انرژی کمتری در مقایسه با تحریک محرک‌های آلیاژ حافظه‌دار برخوردار است. نکته دیگر با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، نزدیک شدن ماژول به موقعیت مطلوب در کمتر از ۱۰ ثانیه در اکثر نمودارها است که این افزایش سرعت پاسخ نسبت به نتایج حالت تک‌فتر می‌تواند به دلیل استفاده از فنرها به صورت جفتی و همزمان افزایش ولتاژ متناسب با محرک‌های دوقلو باشد. به‌طور کلی یکی از نقاط ضعف آلیاژهای حافظه‌دار، سرعت پاسخ کند آنها به دلیل زمان مورد نیاز برای تغییر دما و گرم یا سرد شدن آنها است. البته سرعت گرم شدن ماده را می‌توان با افزایش لحظه‌ای جریان تا میزان مورد نیاز افزایش داد، ولی به‌طور کلی برای تحریک ایمن و عدم افزایش بیش از حد دمای ماده که منجر به ازدست‌دادن خاصیت آن می‌شود، از جریان‌های بالا برای تحریک استفاده نمی‌شود. در سیستم توسعه‌یافته در این تحقیق نیز این نقطه ضعف مشاهده می‌شود. البته باید توجه نمود که ماژول توسعه‌یافته در کاربردهایی که رسیدن به موقعیت زاویه‌ای مطلوب مورد نظر بوده و سرعت دستیابی به آن خیلی مهم نباشد، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.



نمودار ۸ موقعیت‌دهی ماژول برای زاویه $\theta = 200^\circ$ و $\varphi = 30^\circ$ با استفاده از سیستم تثبیت‌کننده موقعیت؛ (a) $\theta = 200^\circ$ ، (b) $\varphi = 30^\circ$

همان گونه که در نمودارها مشخص است موفقیت کنترلر برای رسیدن ماژول به زاویه φ به‌ویژه در تغییر شکل‌های بزرگ‌تر، کمتر از زاویه θ است. این کاهش موفقیت به دلیل ناتوانی نیروی محرک‌های ماژول برای غلبه بر وزن قسمت فوقانی ماژول، نیروی



نمودار ۷ موقعیت‌دهی ماژول برای زاویه $\theta = 340^\circ$ و $\varphi = 40^\circ$ بدون استفاده از سیستم تثبیت‌کننده موقعیت؛ (a) $\theta = 340^\circ$ ، (b) $\varphi = 40^\circ$

در نمودارهای ۱۰-۸ نتایج تجربی اعمال الگوریتم کنترلی روی ماژول مفصلی ارائه شده است. ولتاژ تحریک ۵/۵ ولت در نظر گرفته شده و سیستم تثبیت موقعیت نیز به کار گرفته شده است. این سیستم تثبیت موقعیت، پس از رسیدن ماژول به موقعیت مورد نظر فعال و همزمان تحریک محرک‌ها قطع می‌شود و جریان الکتریکی به آنها اعمال نمی‌شود. همان گونه که از نمودارها مشخص است، پس از عمل کردن سیستم تثبیت موقعیت، پایداری ماژول تا انتهای زمان فعال بودن سیستم تثبیت موقعیت ادامه داشته است و با قطع جریان محرک‌های فتری، آنها فرصت کافی برای سرد شدن با هوا و تغییر فاز را داشته‌اند.

به دلیل این که فنرهای استفاده‌شده در ماژول، شدت جریان متغیری را با توجه به تحریک فنرها در جهات مختلف تا رسیدن به موقعیت مطلوب مصرف می‌کنند، توان مصرفی ماژول در محدوده ۱۹ تا ۲۲ وات متغیر است. به دلیل این که سیستم تثبیت موقعیت پس از قطع کامل جریان ورودی به فنرها فعال می‌شود، توان مصرفی ماژول کاهش می‌یابد و به ۲/۲ وات می‌رسد.

مطابق با الگوریتم کنترلی به‌ویژه هنگام موقعیت‌یابی زاویه θ ، در هر لحظه تنها یک جفت از محرک‌های استفاده‌شده در ماژول انرژی‌دار شده تا در اثر تحریک به موقعیت مطلوب نزدیک شود و هنگام تحریک جفت محرک‌های بعدی، محرک‌های قبلی خاموش می‌شوند. در موقعیت‌یابی زاویه φ ، ممکن است در لحظاتی هر دو جفت از محرک‌های ماژول که به موقعیت مطلوب نزدیک‌ترند، تحریک شوند و زاویه را تنظیم کنند. اگر شدت جریان مصرفی در هر جفت فنر هنگام تحریک، ثابت فرض شود با توجه به ولتاژ اعمالی ۵/۵ ولت، توان مصرفی آلیاژهای حافظه‌دار به‌کاربرده‌شده در ماژول هنگام موقعیت‌یابی بین ۱۹ تا ۲۲ وات متغیر است. بنابراین مقدار مصرف انرژی به‌منظور حفظ ماژول در موقعیت مطلوب مناسب نیست و از این رو استفاده از سیستم تثبیت موقعیت مغناطیسی با توان مصرفی ۲/۲ وات به‌منظور حفظ موقعیت

یک‌باره ماژول هنگام تغییر زاویه جلوگیری می‌شود و خطای موقعیت‌یابی را کاهش می‌دهد.

مشکلات ناتوانی کنترلر برای رسیدن به زاویه‌های خمیدگی بزرگ را می‌توان با افزایش ولتاژ تحریک کاست، اما همان گونه که در قسمت قبل برای تک‌فاز اشاره شد، این افزایش ولتاژ تحریک باعث گرم شدن بیش از حد محرک‌ها و آسیب دیدن آنها می‌شود.

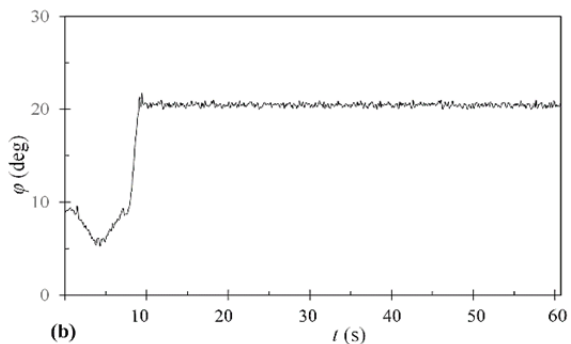
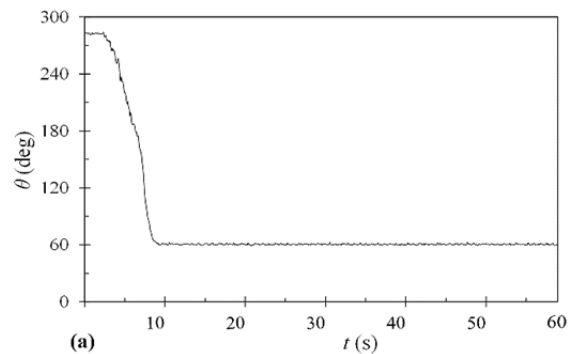
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ماژول انعطاف‌پذیر از نوع مفصلی که با تحریک فنرهای آلیاژ حافظه‌دار تغییر شکل پیدا می‌کند، همراه با مکانیزمی به‌منظور تثبیت موقعیت ماژول در مواقع لزوم ارائه شد. ساختار این ماژول ساده است و بدنه اصلی آن را دو بازو که حول یک مفصل کروی می‌چرخند، تشکیل می‌دهد. ماژول توسعه‌یافته، فضای کاری مناسبی دارد و می‌تواند به‌خوبی به فضای اطراف خود از طریق ۲ درجه آزادی دسترسی داشته باشد. علاوه بر این شکل ماژول در فضا نیز می‌تواند با ترکیب ۲ درجه آزادی ماژول تعیین شود. بازه درجه آزادی حول محور عمودی 360° و بازه درجه آزادی خمیدگی آن 60° است. همچنین ماژول می‌تواند پس از رسیدن به موقعیت مطلوب ثابت شود و نیروهایی را که به آن وارد می‌شود تا حدودی تحمل کند.

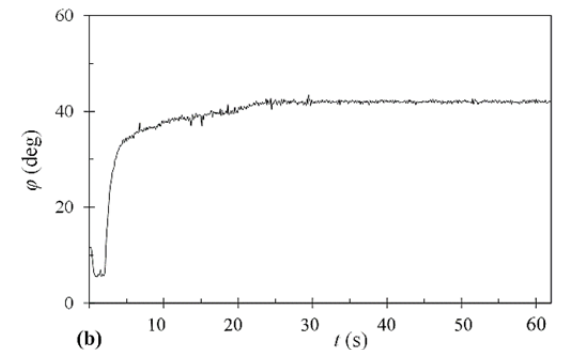
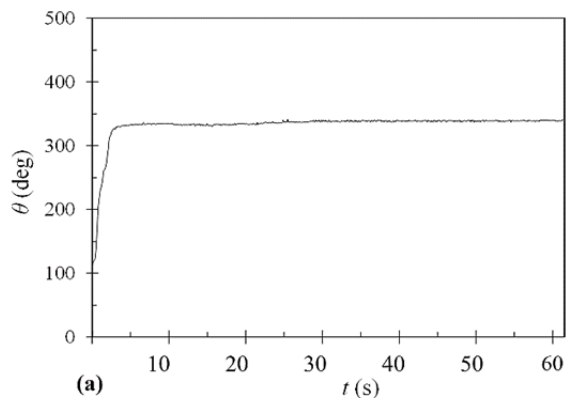
مدل نیرویی ماژول در این مقاله برای هر سه طرح بررسی شد. مدل تئوری نیروی قابل تحمل توسط سیستم تثبیت موقعیت ماژول استخراج شد که با کار تجربی سه طرح مقایسه شد و نشان داد که این نیرو با تنها پارامتر قابل تغییر یعنی جریان الکتریکی اعمالی، تغییر می‌کند و بر خلاف مدل تئوری که نیرو همیشه در حال افزایش است، از جایی نیروی الکترومغناطیس حاصل از میدان اشباع می‌شود و ثابت می‌ماند. بالابودن سطح نیروی قابل تحمل طرح سوم نسبت به دو طرح اول و دوم کاملاً مشخص است. در توضیح مقایسه این نتایج با نتایج مدل تئوری به‌دست‌آمده، عدم تبعیت نمودار تجربی از مدل تئوری می‌تواند به‌دلیل پدیده اشباع مغناطیسی هسته باشد. همچنین قسمتی از جریان الکتریکی نیز به‌دلیل کمبود قطر سیم با افزایش ولتاژ به گرما تبدیل و باعث کاهش میدان و خاصیت مغناطیسی می‌شود و نهایتاً در نیروی کششی سیستم تثبیت موقعیت، اثر منفی می‌گذارد. می‌دانیم که افزایش جریان الکتریکی باعث منظم شدن مولکول‌های مغناطیسی هسته می‌شود و در نتیجه میدان درون هسته رو به افزایش می‌رود. اما مقدار این افزایش خطی نیست و به‌مرور در حال نقصان است تا جایی که دیگر افزایشی صورت نمی‌گیرد و هر چه عامل مغناطیس‌کننده بیشتر شود، در افزایش میدان تأثیری ندارد که به این پدیده اشباع مغناطیسی می‌گوییم. علت این امر این است که افزایش میدان در هسته‌های فرومغناطیس با منظم شدن مولکول‌های مغناطیسی انجام می‌شود. هر چه این مولکول‌ها منظم‌تر شوند، میدان افزایش می‌یابد تا جایی که تمام مولکول‌های مغناطیسی منظم می‌شوند و دیگر با افزایش جریان الکتریکی، میدان افزایش نمی‌یابد.

ترکیب سیستم کنترل ارائه‌شده با طراحی مکانیزم مکانیکی ماژول، یک سیستم رباتیک جدید با قابلیت‌های ویژه برای استفاده در جاهایی که نیاز به جابه‌جایی اشیا و ابزارهای گوناگون است را ایجاد می‌نماید. انعطاف‌پذیری و تغییر شکل و در عین حال تغییر استحکام ماژول در مواقع لازم می‌تواند به توسعه بازوهای رباتیک خاص و ابزارهای هوشمند به‌منظور استفاده در زمینه امور پزشکی از جمله تشخیصی-درمانی و همچنین کارهای صنعتی از جمله

اصطکاک مفصل و نیروی پوشش لاتکسی ماژول به‌منظور تغییر شکل مطلوب است.



نمودار ۹) موقعیت‌دهی ماژول برای زاویه $\theta_d=60^\circ$ و $\phi_d=20^\circ$ با استفاده از سیستم تثبیت‌کننده موقعیت؛ (a) $\theta_d=60^\circ$ ، (b) $\phi_d=20^\circ$



نمودار ۱۰) موقعیت‌دهی ماژول برای زاویه $\theta_d=330^\circ$ و $\phi_d=40^\circ$ با استفاده از سیستم تثبیت‌کننده موقعیت؛ (a) $\theta_d=330^\circ$ ، (b) $\phi_d=40^\circ$

پوشش لاتکسی استفاده‌شده روی مفصل باعث حفظ ساختار مفصل در هنگام تغییر شکل ماژول می‌شود و همچنین از حرکت

stiffness through antagonistic actuation using rolamite springs. Mechanism and Machine Theory. 1999;34(1):27-40.

2- Tondou B, Lopez P. Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators. IEEE control systems Magazine. 2000;20(2):15-38.

3- Farley CT, Houdijk HH, Van Strien C, Louie M. Mechanism of leg stiffness adjustment for hopping on surfaces of different stiffnesses. Journal of applied physiology. 1998;85(3):1044-1055.

4- Kanda T, Ishiguro H, Imai M, Ono T. Development and evaluation of interactive humanoid robots. Proceedings of the IEEE. 2004;92(11):1839-1850.

5- Brooker JC, Saunders PB, Shah SG, Williams CB. A new variable stiffness colonoscope makes colonoscopy easier: A randomised controlled trial. Gut. 2000;46(6):801-805.

6- Van Ham R, Vanderborgh B, Van Damme M, Verrelst B, Lefeber D. MACCEPA, the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator: Design and implementation in a biped robot. Robotics and Autonomous Systems. 2007;55(10):761-768.

7- Kong K, Bae J, Tomizuka M. Control of rotary series elastic actuator for ideal force-mode actuation in human-robot interaction applications. IEEE/ASME transactions on mechatronics. 2009;14(1):105-118.

8- English CE, Russell D. Mechanics and stiffness limitations of a variable stiffness actuator for use in prosthetic limbs. Mechanism and machine theory. 1999;34(1):7-25.

9- Boyer K, Federolf P, Lin C, Nigg B, Andriacchi T. Kinematic adaptations to a variable stiffness shoe: Mechanisms for reducing joint loading. Journal of biomechanics. 2012;45(9):1619-1624.

10- Choi J, Hong S, Lee W, Kang S, Kim M. A robot joint with variable stiffness using leaf springs. IEEE Transactions on Robotics. 2011;27(2):229-238.

11- Yang K, Yang G, Wang J, Zheng T, Yang W. Design analysis of a 3-DOF cable-driven variable-stiffness joint module. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Zhuhai, China. Piscataway: IEEE; 2015. pp. 529-534.

12- Firouzeh A, Mirrazavi Salehian SS, Billard A, Paik J. An under actuated robotic arm with adjustable stiffness shape memory polymer joints. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, WA, USA. Piscataway: IEEE; 2015. pp. 2536-2543.

13- Sugawara T, Hirota KI, Watanabe M, Mineta T, Makino E, Toh S, et al. Shape memory thin film actuator for holding a fine blood vessel. Sensors and Actuators A: Physical. 2006;130-131:461-467.

14- Hadi A, Yousefi-Koma A, Moghaddam MM, Elahinia M, Ghazavi A. Developing a novel SMA-actuated robotic module. Sensors and Actuators A: Physical. 2010;162(1):72-81.

15- Shi Z, Wang T, Liu D, Ma C, Yuan X. A fuzzy PID-controlled SMA actuator for a two-DOF joint. Chinese Journal of Aeronautics. 2014;27(2):453-460.

16- Woehrmann M, Doerbaum M, Ponick B, Mertens A. Design of a fully actuated electromagnetic bending actuator for endoscopic applications. Innovative Small Drives and Micro-Motor Systems; 9. GMM/ETG Symposium, Nuremberg, Germany. Frankfurt: VDE; 2013.

17- Cetinkunt S. Mechatronics with experiments. 2nd Edition. Hoboken: John Wiley & Sons; 2015.

بازرسی‌ها در مسیرهای پیچیده منجر شود.

ماژول ارائه شده در این مقاله از نظر طراحی مکانیکی از جمله طراحی سیستم تثبیت موقعیت الکترومغناطیسی و همچنین کاربرد پوششی از جنس لاتکس به دلیل خاصیت ارتجاعی و محافظت از مفصل کروی دارای بداعت و نوآوری است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله از دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران که امکان انجام این پژوهش را فراهم نمود، تشکر می‌نمایند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. ضمناً محتویات علمی و ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: نویسندگان هیچ گونه تعارض منافع برای این اثر ندارند. **سهم نویسندگان:** محمد مراد شیخی (نویسنده اول)، روش شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۳٪)؛ علیرضا هادی (نویسنده دوم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۳٪)؛ محسن قاسمی‌ورزنده (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۳۴٪)

منابع مالی: منابع مالی خاصی برای انجام این پژوهش استفاده نشده است.

۶- پی‌نوشت

| علایم | شرح |
|----------------------|---|
| علایم اختصاری | |
| A | سطح مقطع سیم پیچ (m) |
| B | چگالی میدان مغناطیسی (T) |
| E | نیروی حاصل از چگالی میدان مغناطیسی روی بخشی از ماده |
| F | نیروی ایجادکننده گشتاور (N) |
| f_s | نیروی اصطکاک ایستایی (N) |
| I | شدت جریان (A) |
| L | ضریب خودالقایی (H) |
| l | طول سیم پیچ (m) |
| n | تعداد دور سیم پیچ |
| N | نیروی عمودی تکیه‌گاه بین دو سطح (N) |
| R | طول بازوی ایجادکننده گشتاور (m) |
| R_B | مقاومت مغناطیسی (An/Wb) |
| r | شعاع کره مفصل (m) |
| T | دما (°C) |
| V_{bemf} | ولتاژ نیروی محرکه الکتریکی برگشتی |
| W | وزن مجموعه قاب استوانه‌ای (Kg) |
| x | فاصله هوایی بین دو سطح |
| علایم یونانی | |
| θ | زاویه چرخش انتهای ماژول نسبت به محور x (°) |
| μ | ضریب نفوذپذیری ماده |
| μ_0 | ضریب نفوذپذیری هوا |
| μ_m | ضریب نفوذپذیری آهن |
| μ_s | ضریب اصطکاک ایستایی |
| Φ_B | شار مغناطیسی (Wb) |
| φ | زاویه خمیدگی ماژول (°) |
| زیرنویس‌ها | |
| d | پارامتر مطلوب |
| sol | سلونوئید |

منابع

1- English C, Russell D. Implementation of variable joint