مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1395، دوره 16، شماره 2، ص‌ص 253-263

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

طراحی، ساخت و کنترل یک ماژول رباتیکی پیوسته با محرکهای فنر آلیاژ حافظه‌دار

علیرضا هادی[1*]، حسین اکبری[2]، خلیل عالی‌پور[3]

1- استادیار، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تهران، تهران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تهران، تهران
3-استادیار، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تهران، تهران
* تهران، صندوق پستی 143951561، hrhadi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 21 آبان 1394
پذیرش:03 بهمن 1394
ارائه در سایت: 26 بهمن 1394

کلید واژگان:
فنر آلیاژ حافظه‌دار
ماژول پیوسته
طراحی
کنترل

چکیده

بازوهای رباتیکی پیوسته و انعطاف‌پذیر کاربردهای ویژه‌ای در بسیاری از زمینه‌ها، از جمله ادوات پزشکی دارند. نمونه‌هایی از این کاربردها، بازوهای رباتیکی مورد استفاده در انجام عملهای جراحی درون بدن، یا ابزار آندوسکوپی و کلونوسکوپی مجاری داخل بدن انسان، مانند مری و روده می‌باشد. اندازه‌ی کوچک و قابلیت مانور زیاد، توانمندی این ابزارها را در کاربردهای مورد نظر افزایش می‌دهد. یکی از محرکهای مفید در کوچک‌سازی سیستمهای مکاترونیکی، آلیاژهای حافظه‌دار می‌باشد. این مواد که معمولا بصورت محرکهای خطی در سیستمها مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توانند نیروهای بسیار زیادی در مقابل وزن خود اعمال نمایند. در این مقاله، با جایگذاری سه فنر آلیاژ حافظه‌دار در ساختار یک ماژول انعطاف‌پذیر، مکانیزمی دو درجه آزادی ایجاد شده است. این ماژول، قابلیت ویژه‌ای در توسعه‌ی سیستمهای ماژولار رباتیکی، بخصوص بازوهای انعطاف‌پذیر دارد. ماژول طراحی شده تغییر شکلهای بزرگی داشته و فضای دسترسی مناسبی را فراهم می‌کند. در این پژوهش، مدلسازی ماژول، به منظور استخراج پارامترهای طراحی و شبیه‌سازی، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به خواص پیچیده آلیاژ حافظه‌دار و وجود نایقینی در مدل، کنترل ماژول مشکل می‌باشد. از اینرو با به کارگیری الگوریتم کنترلی غیر مدل مبنا، در این مقاله سعی شده است تا شکل نهایی ماژول کنترل گردد. عملکرد کنترلر معرفی شده با آزمایشات تجربی صحه‌گذاری شده است. فضای کاری گسترده و کنترل‌پذیری مناسب ماژول استفاده از آن برای کاربردهای واقعی را کاملا توجیه می‌نماید.

Design, manufacturing and control of a continuum robotic module actuated by shape memory alloys

Alireza Hadi*, Hossein Akbari, Khalil Alipour

Department of Mechatronics Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 143951561, Tehran, Iran, hrhadi@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 November 2015
Accepted 23 January 2016
Available Online 15 February 2016

Keywords:
Shape Memory Alloy Spring
Continuum Module
Design
Control

ABSTRACT

Continuum and flexible manipulators have a special role in medical applications. One application is robotic manipulators used for surgery or endoscopic tool used for inspection of body parts like esophagus or colon. In addition to small size, better maneuverability increases the tool performance in real applications. One of the useful actuators in miniaturizing mechatronic systems is shape memory alloys. This material, typically used as a linear actuator, produces high forces in comparison to weight. In this paper, by embedding three shape memory springs inside the structure of a flexible module, a two-DOF mechanism is provided. The module has rigorous usage in modular robotic systems, especially flexible manipulators. The developed module produces large deflection in addition to covering a large workspace. Modeling of the module is discussed in this paper for extracting module parameters in design and implementing the simulation. Through the complex behavior of SMA and uncertainty in model, control of SMA is a challenge. In this paper using a novel algorithm, a desired shape for the module is provided. Using the new non model based control approach, the final shape or position is realized. The adequacy of introduced controller is verified through experiments. Large workspace and controllability of module make it feasible for real applications.

1- مقدمه

در دهه اخیر، استفاده از مواد هوشمند در توسعه سازه‌های جدید بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. ویژگیهای برجسته مواد هوشمند[1] به عنوان محرک یا سنسور در سازه‌های مختلف منجر به سبکی، انعطاف‌پذیری و در عین حال کوچکی سازه می‌شود.

آلیاژهای حافظه‌دار نوعی از مواد هوشمند هستند که در اثر افزایش دما تغییر شکل خود را جبران کرده و به شکل اولیه خود باز می‌گردند. از این رو آنها را حافظه‌دار می‌نامند. همچنین می‌توان با توجه به این ویژگی، از این

1- Smart materials

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
A. Hadi, H. Akbari, Kh. Alipour, Design, manufacturing and control of a continuum robotic module actuated by shape memory alloys, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 253-263, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.30.5]

مواد به عنوان محرک در سیستمهای مکاترونیکی بهره گرفت. خصوصیت‌های جذاب آلیاژهای حافظه‌دار، مثل کرنش‌های بزرگ، ایجاد نیروی زیاد در مقایسه با ابعاد و وزن کم، ولتاژ راه‌اندازی پایین، امکان تحریک ساده آنها با سخت افزار ساده الکترونیکی، قابلیت سازگاری زیستی بالا و عملکرد بی‌صدا و یکنواخت به کارگیری آنها را در برخی از کاربردها کاملا توجیه می‌نماید. البته معایبی چون رفتار غیرخطی، هیسترزیس و راندمان پایین در مصرف انرژی را نیز در به‌کارگیری آنها باید مدنظر قرار داد.

آندوسکوپها و بروسکوپها به طورگسترده در کاربردهای پزشکی و عمل‌های جراحی کوچک استفاده می‌شوند. در گذشته این ابزارها بدلیل درجات آزادی کم و عملکرد دستی، محدودیت‌های قابل توجهی داشته‌اند. فضای بسیار محدود محرکها و عملکرد مؤثر آنها از نظر گشتاور اعمالی و زاویه دسترسی، از جمله قیدهای فنی در این کاربردها می‌باشند. آندوسکوپهای انعطاف‌پذیر در دهه اخیر تغییر قابل توجهی در صنعت نکرده‌اند؛ لیکن روندی رو به رشد در کاربرد وسیع‌تر آنها در روشهای درمانی داخل مجرایی مشاهده می‌شود. تلاشهای بسیاری در زمینه بهبود طراحی مکاترونیکی این ابزارها در دهه اخیر صورت پذیرفته است.

تلاش فراوانی در راستای بهره‌گیری از ماده هوشمند آلیاژ حافظه‌دار به منظور توسعه آندوسکوپهای فعال صورت پذیرفته است. در نمونه‌های سنتی آندوسکوپ، تنها نوک ابزار از طریق سیمهایی امکان حرکت به سمت دیواره مجرا را دارد. در حالیکه در آندوسکوپهای فعال، قسمتهای مختلف ابزار، امکان تغییر شکل داشته و لذا قابلیت مانور مناسبتری برای عبور از مجرا بوجود می‌آید.

برخی از تلاشها در زمینه طراحی و ساخت آندوسکوپهای فعال جدید و خاص صورت پذیرفته است. دی سارس و همکارانش دو سیستم مختلف برای تحریک آندوسکوپ‌های فعال ارائه دادند [1]. اولین سیستم از ماژولهای دو درجه آزادی تشکیل شده که هر درجه آن توسط یک جفت سیم آلیاژ حافظه‌دار، بصورت دیفرانسیلی تحریک می‌شود. با توجه به استفاده از سیم و کرنش محدود آن برای ایجاد تغییر شکل کافی، ماژول ارائه شده دارای طولی بیش از 30 سانتی‌متر می‌باشد. دومین سیستم شامل یک ماژول چند درجه آزادی می‌باشد که بر اساس یک فنر خاص توسعه داده شده از جنس آلیاژ حافظه‌دار ایجاد شده است. این ماژول دارای تغییر شکل محدودی به میزان حداکثر 13 درجه می‌باشد.

از طرفی تلاش زیادی به منظور توسعه محرکهای خمشی آلیاژ حافظه‌دار با به‌کارگیری تکنولوژیهای جدید، نظیر لایه نشانی به منظور کاربرد در آندوسکوپهای فعال در حال انجام است. ایشیدا و همکارانش، رفتار حافظه‌داری پرده‌های نازک مس- نیکل- تیتانیوم را از نقطه نظر کاربرد عملی، بررسی نمودند [2]. مینتا و همکارانش یک فرآیند ساخت الکتروشیمیایی روی یک ورق آلیاژ حافظه‌دار برای ایجاد محرک های S شکل با ضخامت 38 میکرومتر توسعه دادند [3]. قطر خارجی ابزار جراحی با به‌کارگیری این محرک، بدون تیوپ خارجی، 0.8 mm می‌باشد. یک لوله خارجی از جنس لاستیک سیلیکونی، با ضخامت کم بر روی ابزار جراحی قرار داده شده است؛ با این وجود قطر خارجی کوچکتر از 1 mm بوده است. زاویه خم شدن میل جراحی فعال توسعه یافته بدون لوله خارجی °50 و بعد از قراردادن لوله خارجی °35 می‌باشد. مینتا و همکاران یک سیم هادی فعال با قطر خارجی 0.5 mm توسعه دادند که ساختار ساده و انعطاف‌پذیری داشته و شامل یک محرک خمشی آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم بوده که بصورت فنر از یک صفحه نازک ساخته شده است [4].

بطور کلی سیستمهای ماژولار مبتنی بر استفاده از تعداد زیادی ماژول برای ایجاد یک بازوی انعطاف‌پذیر و پیوسته در این کاربرد رایج است. در این روش، یک بازوی رباتیکی افزونه ایجاد می‌شود که ترکیبهای مختلف سینماتیکی در آن برای رسیدن به یک هدف امکان‌پذیر است. چاپلته و همکارانش، بهینه سازی ساختار یک سیستم ماژولار از طریق الگوریتم ژنتیک را در یک آندوسکوپ فعال هوشمند، برای جراحی با حداقل تهاجم بررسی نمودند [5]. میکرو محرکهای آلیاژ حافظه‌دار دیفرانسیلی در پیکره‌بندی این ماژولها استفاده شده است.

از طرفی، بازوهای رباتیکی پیوسته، با توجه به نوع تغییر شکل و فضای کمی که اشغال می‌نمایند جذابیت زیادی در کاربردهایی نظیر عبور از مجاری باریک دارند. نوعی از این بازوها با تحریک تاندون محقق می‌گردد. کشش تاندون منجر به فشرده سازی بازو و تغییر شکل آن شده و به وسیله قیدهای عملی نظیر عدم امکان فشرده‌سازی تاندون محدود می‌شود. کاماریلو و همکارانش، یک مدل جدید برای تغییر شکل یک ماژول پیوسته در اثر جابجایی تاندون ارائه نموده‌اند [6].

کای و چنگلین، یک ساختار جدید برای ایجاد انحنای فضایی پیوسته در یک ماژول، توسط محرکهای آلیاژ حافظه‌دار ارائه نمودند [7]. سه سیم آلیاژ حافظه‌دار در لاستیک سیلیکونی تعبیه شده و انحنای فضایی از طریق گرم کردن محرکها با جریان الکتریکی انجام می‌شود. ویژگی‌هایی چون نسبت وزن به بار بالا، اتلاف انرژی پایین، ساختار کوچک، کنترل و راه اندازی ساده، عملکرد دقیق و جابجایی انعطاف‌پذیر و ترکیبی در ماژول ارائه شده مشاهده می‌شود. والترز و مک‌گوران، یک ماژول نرم با تغییر شکل زیاد که محرکهای آلیاژ حافظه‌دار در آن تعبیه شده‌اند ارائه نمودند [8]. این ماژول، بوسیله پرینت سه‌بعدی مواد الاستومتر نرم ساخته می‌شود که طراحی آنها شامل کانال‌های داخلی، برای نصب آسان محرکهای آلیاژ حافظه‌دار می‌باشد. ویژگیهای دیگر طراحی، انعطاف‌پذیری در حرکت و تسهیل در سرد کردن محرکهای آلیاژ حافظه‌دار را فراهم می‌نماید. ویلوسلادا و همکاران، یک محرک آلیاژ حافظه‌دار انعطاف‌پذیر طراحی نمودند که جابجایی محدود آلیاژها را افزایش می‌دهد. محرک طراحی شده می‌تواند تا °180 خم شود و لذا آزادی حرکات بیشتر و یکپارچه‌سازی بهتری در رباتهای پوشیدنی نسبت به راه حل های سفت و سخت را تأمین می‌نماید [9].

بخشی از تحقیقات به مدلسازی سیستمهای پیوسته با محرک آلیاژ حافظه‌دار اختصاص دارد. لاگوداس و تاج‌بخش، تغییر شکل یک میله انعطاف‌پذیر استوانه‌ای که در آن محرک آلیاژ حافظه‌دار تعبیه شده بود را مدل نمودند [10]. محرک‌های تکی و چند تایی که به طور موازی با محورهای طولی میله قرار داده شده‌اند تحریک می‌شوند. نیروی محوری، نیروی عرضی و ممان های خمشی در میله در نظر گرفته می‌شود. شکل تغییر یافته با حل معادلات غیرخطی تعادل، استخراج شده است. برینسون در تحقیقی، انحراف یک تیر پیوسته در اثر تحریک آلیاژ حافظه‌دار را بررسی نمود [11]. در این تحقیق، کنترل فعال انحراف تیر از طریق گرم و سرد کردن سیم آلیاژ حافظه‌دار که در خارج از تیر با فاصله نصب شده بود، بررسی گردید. هردو تئوری تیر خطی و غیرخطی برای محاسبه انحراف‌های بزرگ مدنظر قرار گرفت و مدل توسط آزمایشات تایید گردید. شیخی و همکاران

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.30.5]

[12] تغییر شکل یک فنر فشاری، توسط یک سیم آلیاژ حافظه‌دار را بررسی نموده و مدلی برای محاسبه تغییر شکل فنر ارائه نمودند.

بطور کلی، کنترل سیستمهای مبتنی بر محرکهای آلیاژ حافظه‌دار در دهه گذشته در تحقیقات فراوانی مورد بررسی قرار گرفته است. پیچیدگی رفتار این مواد و وجود عوامل غیرخطی، مانند هیسترزیس از عوامل محدود کننده کاربرد این محرکها بوده است؛ لذا چالشهای مذکور در تحقیقات مختلف مورد بحث قرار گرفته و سیستم کنترلی مؤثر توسعه داده شده است. جوزف و همکاران، کنترل غیرخطی یک سوزن انعطاف‌پذیر با محرکهای آلیاژ حافظه‌دار را مورد بررسی قرار داده‌اند [13]. به منظور تعقیب مسیر مطلوب، موقعیت واقعی سوزن با استفاده از سیگنالهای فیدبک مختلف نظیر بینایی، سنسورهای الکترومغناطیسی و فراصوت کنترل می‌شود. دو الگوریتم کنترلی زمان گسسته‌ی مشتقی انتگرالی تناسبی(PID) و یک کنترلر خطای درجه سوم مشتقی-انتگرالی-تناسبی ($PID\text{-}P^3$) در تحقیق آنها بکار رفته است. هادی و همکاران از کنترلر ساختار متغیر[1] برای کنترل یک ماژول رباتیکی دو درجه آزادی با محرکهای آلیاژ حافظه‌دار بهره گرفتند [14].

از سوی دیگر، هوشمندسازی ابزارهای بازرسی داخل بدن بطوریکه پس از ارسال به داخل بدن، بدون اتصال فیزیکی به خارج، به انجام مأموریت پرداخته و پس از خروج از بدن اطلاعات را انتقال دهند در سالهای اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مکانیزم فرمان غیر بصری و غیر ارگونومیک یک مانع بزرگ برای گسترش کاربردهای آندوسکوپی می‌باشد. هدایت خودکار آندوسکوپها راه حلی برای این مشکل می‌باشد، از این رو، واندراستپ و همکارانش، الگوریتم‌های تعیین مسیر و هدایت اتوماتیک آندوسکوپها را مبتنی بر تصویر توسعه دادند [15]. آنها با امید به نتیجه دادن تحقیقات در زمینه اتوماتیک نمودن آندوسکوپها، تمرکز پژوهش خود را بر پیدا کردن الگوریتم و تکنیکهای هدایت مقاوم و مکاترونیکی کم هزینه صرف نموده‌اند.

با توجه به مرور تحقیقاتی که تاکنون انجام گرفته است به نظر می‌رسد توسعه ماژولهای پیوسته کنترل‌پذیر و هوشمند، در آینده، کمک فراوانی به توسعه ابزارهای آندوسکوپی نماید. توسعه ماژولهای پیوسته با محرک آلیاژ حافظه‌دار در تحقیقات مختلف ارائه گردیده است [6-12]. همچنین به‌کارگیری کنترلرهای دقیق در سیستمهای دارای محرک آلیاژ حافظه‌دار نیز مورد بحث قرار گرفته است [13،14]؛ لیکن در این مقاله یک ماژول انعطاف‌پذیر با ساختاری ساده مبتنی بر استفاده از یک فنر فشاری به عنوان پایه سازه و محرکهای فنر آلیاژ حافظه‌دار در اطراف آن توسعه داده شده است. ماژول انعطاف‌پذیر دارای دو درجه آزادی فعال و تغییر شکل زیاد می‌باشد. یک استراتژی کنترلی جدید برای کنترل شکل و موقعیت ماژول در این مقاله توسعه داده شده است. ماژول ارائه شده در این مقاله، از نظر طراحی سیستمی یعنی ترکیب سازه، محرک و کنترلر جدید بوده و دارای نوآوری می‌باشد.

2- طرح ماژول

پایه اصلی ماژول، یک فنر معمولی می‌باشد که همواره تمایل به بازیابی شکل اولیه خود در امتداد خط راست دارد. بر روی این فنر، واشرهایی با قطرهای کوچک و بزرگ قرار گرفته تا تشکیل یک تیر انعطاف‌پذیر دهد (شکل 1). به منظور یکپارچه شدن دیسکها با فنر وسط، دو دیسک انتهایی، توسط دو پیچ خودکار به فنر قفل شده و لذا یک مجموعه یکپارچه انعطاف‌پذیر که امکان خم شدن به طرفین را دارد ایجاد گردیده است. از داخل دیسکهای ماژول سه فنر آلیاژ حافظه‌دار بطور متقارن عبور کرده و دیسکهای ابتدایی و انتهایی را به هم متصل می‌نماید. با تغییر طول فنرهای آلیاژ حافظه‌دار، ماژول به سمت محرک تحریک شده خم می‌گردد که میزان خم شدن وابسته به میزان تحریک می‌باشد. شکل 1، طرح ماژول توسعه یافته را نشان می‌دهد.

شکل ماژول تحریک شده، با دو پارامتر توصیف می‌گردد. یکی از این پارامترها، زاویه چرخش سر فنر می‌باشد که با φ نشان داده شده و دیگری گردش فنر را نشان می‌دهد که با θ بیان شده است (شکل 2). تغییر زاویه θ نیازمند تحریک همزمان چندین محرک می‌باشد در حالیکه با تحریک هر یک از محرکها زاویه φ به تنهایی تغییر می‌نماید. شکل 2 پارامترهای بیان کننده ماژول تغییر شکل یافته را نشان می‌دهد. همچنین در شکل 3، ماژول ساخته شده و تغییر شکل آن در جهات مختلف ملاحظه می‌شود.

یکی از ویژگیهای برجسته ماژول معرفی شده، کنترل‌پذیری آن به شکل

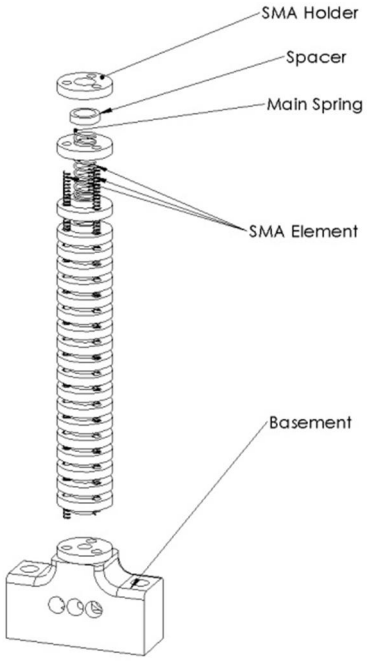

Fig. 1 Developed module design

شکل 1 طرح ماژول توسعه یافته

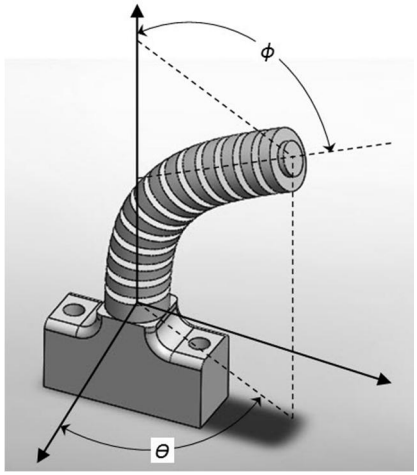

Fig. 2 Angles for defining module position

شکل 2 زوایای بیان موقعیت ماژول

1- Variable structure control

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.30.5]

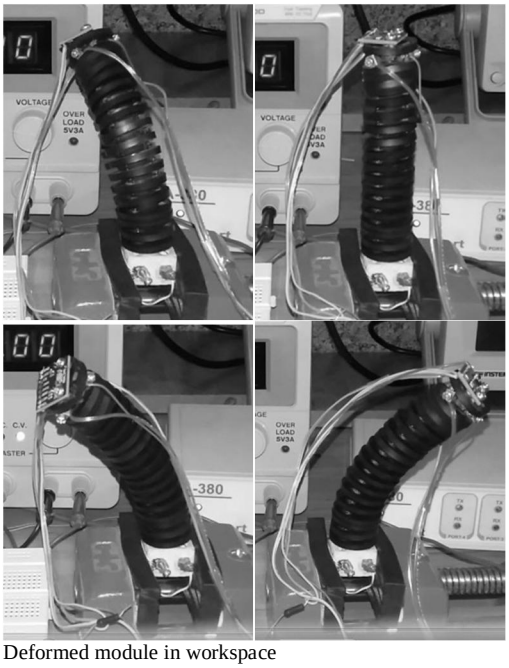

Fig. 3 Deformed module in workspace

شکل 3 ماژول تغییر شکل یافته در فضای کاری

مطلوب می‌باشد (توضیحات مبسوط در این خصوص، در بخش طراحی کنترلر ارایه گردیده است). با توجه به هدف کنترلی مسئله، که ایجاد زوایای مطلوب در آن می‌باشد، اندازه‌گیری این زوایا به عنوان پس‌خور کنترلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ لذا ایجاد یک سیستم سنسوری مناسب و ساده برای رسیدن به این هدف از دیگر قابلیتهای طرح ماژول می‌باشد. ایده به کار گرفته شده در این تحقیق، اندازه‌گیری زوایای θ و φ با اندازه‌گیری زوایای صفحه انتهایی ماژول توسط سنسور شیب‌سنج دو محوره و استفاده از یک تبدیل مناسب می‌باشد. لذا یک سنسور به منظور اندازه‌گیری شیب از نوع زد-سی-تی 260[1] که دارای ابعاد و وزن مناسبی برای این کاربرد می‌باشد روی صفحه انتهایی ماژول نصب گردیده و اطلاعات خروجی آن که شیب لحظه‌ای صفحه انتهایی می‌باشد، بطور مداوم به بورد کنترلی ارسال می‌گردد.

طرح ماژول ارائه شده در این مقاله، از نظر سازه اصلی آن که یک فنر فشاری معمولی بوده و نحوه استقرار محرکهای آلیاژ حافظه‌دار در اطراف آن که منجر به ایجاد یک سازه فعال می‌گردد جدید می‌باشد. همچنین سیستم سنسوری اندازه‌گیری وضعیت ماژول با به کارگیری سنسور شیب و تبدیلات خطی از نوآوریهای طرح محسوب می‌شود.

3- مدلسازی

مدلسازی ماژول در این مقاله، در دو قسمت مورد بحث قرار می‌گیرد. در ابتدا، مدل سینماتیکی و هندسی ماژول هنگام تغییر شکل بیان می‌شود. سپس مدل تغییر شکل ماژول که از تعادل استاتیکی آن در هر لحظه استخراج می‌گردد ارائه می‌شود. این دو مدل، بصورت ممزوج در بیان رفتار ماژول تحریک شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

3-1- مدل تغییر شکل هندسی ماژول (سینماتیکی)

با توجه تغییر شکل الاستیک ماژول از معادلاتی مشابه خیز یک تیر الاستیک برای بیان تغییر شکل آن استفاده شده است. فنر الاستیک بایاس در ماژول هنگام بارگذاری خمشی دچار تغییر شکل می‌گردد؛ بدین معنی که فنر بایاس در مرکز ماژول شبیه یک تیر الاستیک تحت خمش رفتار نموده و فنرهای آلیاژ حافظه‌دار در اطراف آن ایجاد کننده ممان خمشی برای تغییر شکل می‌باشند. نوع بارگذاری که توسط محرکهای آلیاژ حافظه‌دار روی تیر الاستیک ایجاد می‌گردد بصورت یک نیرو و ممان متمرکز مطابق شکل 4 بخش b در انتهای تیر در نظر گرفته شده است. دلیل آن این است که نیروی محرکها بر روی یک صفحه در انتهای ماژول عمل می‌نماید که این صفحه همواره عمود بر امتداد ماژول در نقطه انتهایی قرار می‌گیرد. با فرض رفتار فنر مرکزی مانند تیر کلاسیک تحت خمش کلیه مقاطع تیر پس از تغییر شکل بدون اعوجاج باقی می‌ماند. در اثر بارگذاری محرکهای آلیاژ حافظه‌دار گشتاور خمشی تقریبا ثابتی برابر با گشتاور انتهای تیر در مقاطع ایجاد گردیده و لذا شعاع انحنای ثابتی در تیر ایجاد می‌گردد. با استفاده از شکل 4 می‌توان از معادلات 1 برای بیان هندسه تغییر شکل ماژول استفاده نمود.

$$x = r\cos\theta, y = r\sin\theta, z = \rho\sin\varphi, r = \rho - \rho\cos\varphi \qquad (1\text{-الف})$$

$$l_i = (\rho - r_i\cos(\theta_i)) \times \varphi \qquad (1\text{-ب})$$

در رابطه فوق اندیس i منتسب به هر یک از سه محرک آلیاژ حافظه‌دار در ماژول بوده و l_i طول هر یک از محرکها می‌باشد. همچنین θ_i زاویه بین r_i و راستای مشخص کننده امتداد θ می‌باشد. سایر پارامترها در شکل 4 بیان گردیده است. در شکل 4، در مقطع ماژول سه محرک آلیاژ حافظه‌دار با نامهای SMA1 تا SMA3 مشاهده می‌شود. این سه محرک تحریک شده و باعث جابجایی ماژول بواسطه ممان خمشی ایجاد شده می‌گردند.

برای تبدیل زوایای صفحه انتهایی به زوایای θ و φ، مطابق شکل 5 از روابط سینماتیکی 2 استفاده می‌گردد. سنسور شیب دو محوره دو زاویه که هر یک چرخش سنسور حول محورهای اصلی x و y خود (θ_y,θ_x) می‌باشد را بیان می‌کند. در شکل 5 ارتباط این زوایا و زوایای اصلی ماژول تبیین گردیده است.

اگر $\theta = \frac{\pi}{2} \rightarrow \varphi = \theta_x$ (2-الف)

اگر $\theta \neq \frac{\pi}{2} \rightarrow \tan\theta_y = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi\cos\theta}$ (2-ب)

اگر $\theta = 0 \overset{\theta_x=0}{\Longrightarrow} \varphi = \theta_y$ (2-ج)

اگر $\theta \neq 0 \rightarrow \tan\theta_x = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi\sin\theta}$ (2-د)

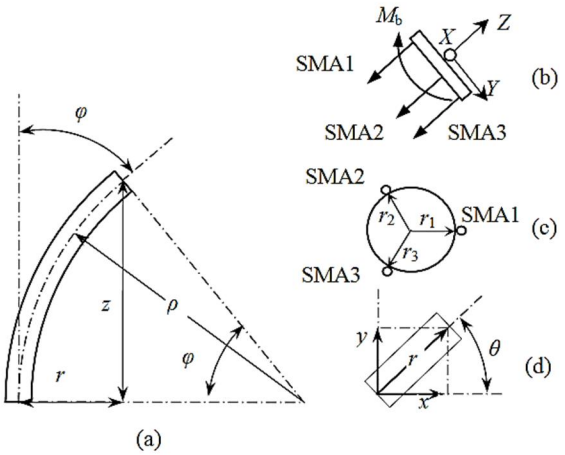

Fig. 4 Geometrical parameters in deformed module

شکل 4 پارامترهای هندسی ماژول تغییر شکل یافته

1- ZCT-260

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.30.5]

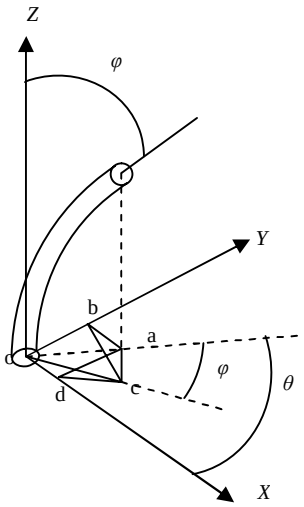

Fig. 5 Relation of θ and φ angles with inclination of end plate

شکل 5 ارتباط زوایای θ و φ با شیب صفحه انتهایی

3-2- مدل تغییر شکل ماژول ناشی از بارگذاری (نیرویی)

مدل ماژول مبتنی بر ترکیب مدل محرکهای آلیاژ حافظه‌دار و مدل تغییر شکل ماژول انعطاف‌پذیر می‌باشد. ساختار ماژول یک بازوی پیوسته از نوع ستون فقراتی می‌باشد که یک فنر فشاری نقش ستون فقرات آنرا ایفا می‌کند. برای مدلسازی تغییر شکل ماژول، بر حسب تحریک محرکهای آلیاژ حافظه‌دار بایستی نیروی حاصل از تحریک محرکها را به تغییر شکل ماژول مرتبط نمود. این مدل، نیازمند استخراج رفتار فنر الاستیک تحت بار خمشی و همچنین استخراج نیروی فنر آلیاژ حافظه‌دار پس از تحریک می‌باشد.

برای بیان تغییر شکل ماژول می‌توان از رابطه تغییر شکل خمشی فنر برحسب ممان خمشی اعمالی طبق رابطه 3 استفاده نمود [12]:

$$\varphi = \frac{NF'yD^2\pi}{4}\left(\frac{1}{EI}+\frac{1}{GJ}\right) \quad (3)$$

که در رابطه 3، N تعداد حلقه‌های فنر بایاس، F' نیروی معادل محرکهای آلیاژ حافظه‌دار و برابر با مجموع آنها، D قطر فنر بایاس، E و G مدولهای یانگ و برشی فنر و I و J لنگر سطح عادی و قطبی سطح مقطع فنر بایاس می‌باشد. در رابطه 3 با نظر گرفتن ممان خمشی به میزان $M=FD/2$ می‌توان تغییر شکل فنر بایاس برحسب ممان خمشی اعمالی روی آنرا با تبدیل رابطه 3 طبق رابطه 4 بیان نمود:

$$M = \frac{2}{ND\pi\left(\frac{1}{EI}+\frac{1}{GJ}\right)}\varphi \quad (4)$$

که این رابطه بصورت ساده شده طبق رابطه 5 بیان می‌گردد:

$$M = k\varphi \quad (5\text{-الف})$$

$$k = \frac{2}{ND\pi\left(\frac{1}{EI}+\frac{1}{GJ}\right)} \quad (5\text{-ب})$$

از طرفی رابطه ساختاری بین تغییر شکل و نیرو در فنر آلیاژ حافظه‌دار از رابطه 6 قابل استخراج است [14]:

$$F = k_1 Y + k_2 \xi_s \quad (6)$$

که در این رابطه F نیروی فنر، Y تغییر شکل فنر و ξ_s درصد فاز مارتنزیت غیردوقلویی[1] می‌باشد. همچنین مقدار ثابتهای k_1 و k_2 از رابطه 7 محاسبه می‌گردد:

1- De-twinned

$$k_1 = \frac{Gd^4}{8D^3N} \quad (7\text{-الف})$$

$$k_2 = \frac{\pi\Omega d^3}{8\sqrt{3}D} \quad (7\text{-ب})$$

در ثابت k_2 مقدار پارامتر Ω از شرایط مرزی تحریک آلیاژ حافظه‌دار قابل استخراج است. بدین منظور می‌توان فنر را در حالت اولیه مارتنزیت دوقلویی[2] (که در حالت بدون بار از آستنیت کامل خنک شده ایجاد شده باشد) در نظر گرفت. در این وضعیت، مقادیر حالتها عبارتست از:

$$F_0 = 0, Y_0 = 0, \xi_{s0} = 0 \quad (8)$$

اگر در این حالت، ماده تحت بارگذاری قرار گیرد تا به مارتنزیت غیردوقلویی تبدیل گردد، حالتهای ماده به صورت زیر تغییر می‌یابد:

$$F_1 = 0, Y_1 = Y_L, \xi_{s1} = 1 \quad (9)$$

لذا می‌توان با استفاده از رابطه ساختاری، ارتباط پارامترهای k_1 و k_2 را به شکل زیر برقرار نمود:

$$F_1 - F_0 = k_1(Y_1 - Y_0) + k_2(\xi_{s1} - \xi_{s0}) \quad (10)$$

با جایگذاری 7 در 10 و با به کارگیری 8 و 9 می‌توان ارتباط ثابتهای k_1 و k_2 را طبق رابطه زیر برقرار نمود:

$$0 = k_1 Y_L + k_2 \rightarrow k_2 = -k_1 Y_L \quad (11)$$

4- شبیه‌سازی

در پیاده‌سازی مدل ماژول در محیط شبیه‌سازی، هدف اعمال ورودی به مدل و ملاحظه رفتار ماژول ضمن استخراج پارامترهای خروجی آن می‌باشد. در مدل ماژول، ولتاژ تحریک محرکهای آلیاژ حافظه‌دار به عنوان ورودی و میزان تغیر شکل ماژول، که با پارامترهای φ و θ بیان می‌شود، خروجی‌های مدل می‌باشد. نحوه پیاده‌سازی مدل در محیط شبیه‌سازی، بصورت بلوک دیاگرامی در شکل 6 ارائه گردیده است.

جهت شبیه‌سازی ماژول، در نرم‌افزار متلب[3] کدنویسی شده است. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول 1 ارائه شده است. برخی از ثابتهای این جدول، از مرجع [14] اتخاذ شده و ثابتهای مربوط به هندسه ماژول، فنر آلیاژ حافظه‌دار و فنر بایاس با استفاده از نتایج تحریک ماژول در محیط شبیه‌سازی به منظور ایجاد فضای کاری مطلوب استخراج گردیده است. البته با توجه به محدودیت در انتخاب فنر آلیاژ حافظه‌دار، این فنر از شرکت داین‌الوی[4] با پارامترهای معرفی شده انتخاب و سایر پارامترهای فنر بایاس متناسب با آن تنظیم شده است. نمونه رفتار تحریک ماژول در محیط شبیه‌سازی، در شکل 7 بیان گردیده است. در این شکل، به ازای تحریک محرک 1 با ولتاژ 4/5 ولت، تغییرات زاویه φ بر حسب زمان نشان داده شده است. همچنین در شکل 7، تغییر شکل ماژول به ازای تحریک محرک 1 با همان ولتاژ شبیه‌سازی در آزمایش تجربی نیز نشان داده شده است.

با توجه به شکل 7 ملاحظه می‌شود که نتیجه شبیه‌سازی با رفتار تجربی ماژول تطابق مناسبی در تخمین میزان تغییر شکل در هنگام تحریک و پس از حذف تحریک دارد. البته نمودار شبیه‌سازی و آزمایش تجربی کاملا با هم تطابق ندارند. دلیل آنرا می‌توان عدم شناسایی کامل پارامترهای مدل و وجود تکرارناپذیری در رفتار آلیاژ حافظه‌دار دانست. بخصوص در هنگام قطع تحریک، ماژول در شبیه‌سازی نسبت به آزمایش سریعتر به حالت ماندگار باز می‌گردد. دلیل آنرا می‌توان علاوه بر موارد ذکر شده به وجود دمپینگ مدل

2- Twinned
3- Matlab
4- Dynalloy

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.30.5]

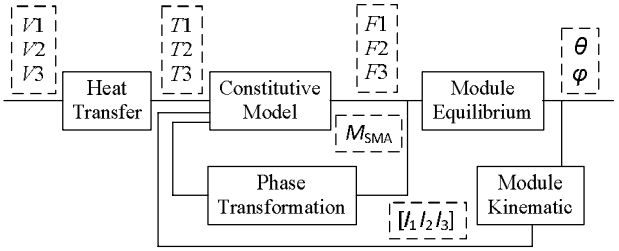

Fig. 6 Block diagram of module numerical simulation

شکل 6 بلوک دیاگرام شبیه‌سازی عددی مدل ماژول

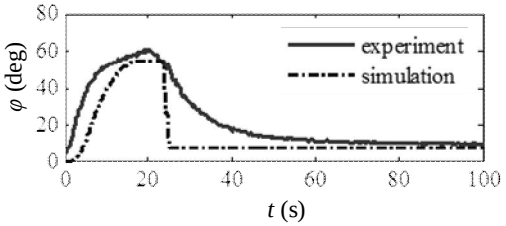

Fig. 7 Module deformation after activating SMA_1 by 4.5 V in simulation

شکل 7 تغییر شکل ماژول پس از تحریک محرک 1 با ولتاژ 4/5 V

جدول 1 ضرائب مورد استفاده در معادلات مدل ماژول

Table 1 Coefficients used in module's model equations

ضرایب	تعریف	مقدار	واحد
R_A	مقاومت الکتریکی آستنیت	3	Ω
R_M	مقاومت الکتریکی مارتنزیت	3	Ω
h	ضریب انتقال حرارت جابجائی	150×10^{-6}	J/m2 ◦Cs
C_p	گرمای ویژه	840	J/kg ◦C
r	فاصله نصب فنر آلیاژ حافظه‌دار از مرکز ماژول	6	mm
C_A	ضریب اثر تنش در دمای تغییر فاز به آستنیت	10.3	◦C
C_M	ضریب اثر تنش در دمای تغییر فاز به مارتنزیت	10.3	◦C
d_{sma}	قطر سیم فنر آلیاژ حافظه‌دار	0.38	mm
D_{sma}	قطر فنر آلیاژ حافظه‌دار	2.54	mm
N_{sma}	تعداد کویل فنر آلیاژ حافظه‌دار	20	-
m	جرم فنر آلیاژ حافظه‌دار	2.14×10^{-6}	kg
l_0	طول اولیه فنر آلیاژ حافظه‌دار	20	mm
y_L	حداکثر طول قابل بازیابی آلیاژ حافظه‌دار	150	mm
G_A	مدول برشی آستنیت	26.9	GPa
G_M	مدول برشی مارتنزیت	17	GPa
E_s	مدول الاستیک فنر بایاس	200×10^6	GPa
D_s	قطر فنر بایاس	3.5	mm
r_s	شعاع مقطع فنر بایاس	0.6	mm
N_s	تعداد کویل فنر بایاس	49	-

نشده در شرایط واقعی که حرکت سیستم را کند می‌کند مربوط دانست. علی‌رغم نایقینیهای فراوان در رفتار محرک آلیاژ حافظه‌دار، پیش‌بینی مدل از رفتار ماژول، هنگام تحریک مناسب می‌باشد.

5- کنترل

یکی از معایب محرکهای آلیاژ حافظه‌دار تکرارپذیری ضعیف و وجود هیسترزیس در رفتار غیرخطی آن می‌باشد. به عنوان مثال، اگر در ماژول بصورت متوالی، چندین تحریک صورت پذیرد، با عوض کردن ترتیب توالی تحریکها نتایج یکسانی در موقعیت ماژول مشاهده نمی‌شود. این رفتار هم بیان کننده رفتار غیرخطی سیستم و عدم صدق اصل جمع آثار در آن می‌باشد و همچنین نشان دهنده تکرارناپذیری سیستم است.

وجود پسماند در محرکهای آلیاژ حافظه‌دار نیز یکی از عیوب رایج و چالشهای پیش رو در توسعه سیستمهای مبتنی بر این نوع محرکها می‌باشد. این رفتار در ماژول توسعه یافته این تحقیق نیز مشاهده می‌شود. رفتار ماژول در شکل 8 مؤید این موضوع نیز می‌باشد. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود تحریکهای یکسان ولی با توالی متفاوت باعث تغییر شکل متفاوت ماژول گردیده است. لذا یکی از نیازها و اهداف این تحقیق موقعیت‌دهی مناسب ماژول با استفاده از الگوریتم کنترلی مطلوب می‌باشد که در بخش 5 به آن پرداخته شده است.

در ماژول ارائه شده در این مقاله، کنترل همزمان درجات آزادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رفتار پیچیده، غیرخطی و تکرار ناپذیر آلیاژ حافظه‌دار کنترل آنرا مشکل نموده است. در بسیاری از سیستمها، از این محرک فقط در حالت خاموش یا روشن استفاده گردیده است و در مواردی که کنترل محرک صورت می‌گیرد، سیستم فقط یک درجه آزادی دارد. حال برای این سیستم دو درجه آزادی که تحریک همزمان سه محرک برای ایجاد تغییر شکل مورد نیاز است مسئله مشکلتر نیز شده است.

در کنترل سیستمهای با محرک آلیاژ حافظه‌دار با توجه به ویژگیهای خاص این مواد مانند نایقینی در مدل و هیسترزیس در رفتار آنها، کنترلرهایی که بر پایه مدل نیستند رفتار مناسبتری داشته و عملکرد موفقتری دارند [14]. کنترل مود لغزشی یکی از کنترلرهای غیرخطی مطلوب برای به‌کارگیری در این سیستمها می‌باشد. این کنترلر عملکرد مناسبی در بسیاری از کاربردهایی که کنترل دقیق آلیاژ حافظه‌دار مدنظر بوده است داشته است [16].

5-1- کنترلر مود لغزشی

استفاده از الگوریتم مطلوب کنترل مود لغزشی برای سیستمهای دینامیکی با محرک آلیاژ حافظه‌دار قبلا مورد بررسی قرار گرفته است [16]. بطور کلی معادله دینامیکی یک سیستم را می‌توان با رابطه 12 به صورت زیر بیان نمود:

$$M(q)\ddot{q} = f_q(q,\dot{q}) + \tau(\sigma) \quad (12)$$

که M ماتریس جرم، q مختصات تعمیم یافته سیستم، f بردار نیروهای غیراینرسی و τ بردار نیروی محرکهای سیستم می‌باشد. در یک سیستم شامل

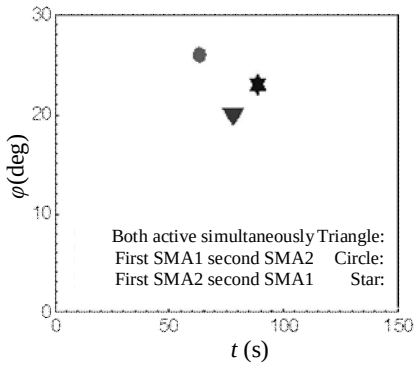

Fig. 8 Position of module end plate through activating SMA_1 and SMA_2 with different regime

شکل 8 موقعیت صفحه انتهایی ماژول به ازای تحریکهای یکسان ولی با رژیم متفاوت در محرک 1 و 2

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.30.5]

محرکهای آلیاژ حافظه‌دار رابطه محاسبه ولتاژ کنترلی محرکها بر اساس تئوری کنترل لغزشی از رابطه 13 محاسبه گردیده است [16]:

$$u = \{\hat{B}^{-1}[-\hat{f} + \hat{M}\dot{S}_r - k\mathrm{sgn}(S)]\} \quad (13)$$

که S تابع سطح لغزش مرتبه دو و k ضریب ثابت می‌باشد. B را می‌توان از روی مدل دینامیکی سیستم بصورت تابعی مطابق رابطه 14 محاسبه نمود:

$$B = \tau_\sigma(I_n - \Omega h_\sigma)^{-1}(\Theta_T + \Omega h_T)g_T \quad (14)$$

در رابطه فوق Ω و Θ ضرائب مربوط به محاسبه فاز و انبساط حرارتی آلیاژ حافظه‌دار، g_T ضریب مدل انتقال حرارت، I_n ماتریس همانی و توابع h_T و h_σ توابع پیچیده‌ای از مدل سینتیکی برای محاسبه درصد فاز ماده می‌باشد.

از رابطه 13 می‌توان استدلال نمود که استخراج ولتاژ تحریک محرکهای آلیاژ حافظه‌دار علاوه بر مدل دینامیکی سیستم نیازمند آگاهی دقیقی از متغیرهای حالت سیستم مانند تنش، دما و موقعیت فضای مفاصل سیستم رباتیکی می‌باشد. لذا به کارگیری این روش در عمل به راحتی میسر نبوده و نیازمند استفاده از اطلاعات سنسوری زیادی می‌باشد. اگرچه در بسیاری از تحقیقات از تخمین‌گر فیلتر کالمن برای تخمین پارامتر تنش استفاده گردیده است؛ ولی پیاده سازی این روش نیز در عمل، چالشهای سخت‌افزاری داشته و نیازمند محاسبات زیاد و وابسته به پارامترهای مدل می‌باشد.

5-2- کنترلر تجربی

با توجه به مشکلات پیاده سازی روش کنترل مود لغزشی در عمل، در این مقاله سعی گردیده از یک کنترلر جدید استفاده گردد. تفاوتی که سیستم مورد نظر در این تحقیق با بسیاری از سیستمهای مبتنی بر محرک آلیاژ حافظه‌دار دارد، وجود چندین محرک و نیاز به تحریک همزمان آنها برای تحقق هندسه مطلوب در ماژول است. در واقع یک مسئله کنترل چند متغیره غیرخطی در اینجا بروز پیدا می‌کند. حل چنین مسئله‌ای از نظر تحلیلی مشکل بوده و نیازمند محاسبات پیچیده و وجود سنسورهای زیاد برای اندازه‌گیری حالتها و پارامترهای مختلف سیستم می‌باشد. هدف از این تحقیق، ارائه یک ماژول کاربردی با قابلیت کنترل موقعیت یا شکل می‌باشد. لذا امکان اعمال موقعیت یا شکل مطلوب در آن توانمندی طرح ارائه شده را بهتر بروز می‌دهد.

کنترلری که در این تحقیق برای ماژول ارائه شده، مبتنی بر استفاده از تجربه و شناخت رفتار آلیاژ حافظه‌دار پس از تحریک می‌باشد. درحقیقت در سیستمهای پیچیده مهندسی یکی از راههای کنترل سیستم استفاده از منطق فازی می‌باشد. در این روش قوانینی بر پایه شناخت و تجربه رفتار سیستم استخراج شده و بر پایه این قوانین سیستم کنترل می‌گردد. الگوریتم ارائه شده در این مقاله بر پایه استخراج قوانینی مؤثر برای کنترل ماژول انعطاف‌پذیر که با سه محرک آلیاژ حافظه‌دار تحریک می‌گردد عمل می‌کند. این قوانین می‌تواند به شکل مؤثری در توسعه کنترلرهای فازی، که برای ماژول ارائه شده با مدل پیچیده کاملا توجیه‌پذیر است، عمل نماید.

قانون کنترل از این واقعیت بهره می‌گیرد که اگر هر یک جفت از محرک ها تحریک شوند، در حالیکه محرک دیگر تحریک نباشد، ماژول در راستای خط نیمساز زاویه بین بردارهای موقعیت آن جفت محرک حرکت می‌کند. به عنوان مثال اگر محرکهای 1 و 2 تحریک گردند ماژول در امتداد نیمساز زاویه‌ای که بردارهای r_1 و r_2 را به هم متصل می‌کند حرکت می‌کند (شکل 4 را ببینید). این زاویه با θ بیان گردیده است. حال اگر تحریک دو محرک کاملا یکسان باشد بطوریکه منجر به ایجاد نیروهای برابر در هر دو گردد ماژول بطور ایده‌آل در امتدادخط نیمساز حرکت می‌کند. ولی اگر میزان تحریک یکسان نباشد، که در عمل نیز همواره همینطور می‌باشد، ماژول به یک سمت منحرف می‌گردد. اگر تحریک محرک 1 از محرک 2 بیشتر باشد زاویه θ کمتر و اگر تحریک محرک 2 از محرک 1 بیشتر باشد زاویه θ بیشتر می‌گردد.

نکته بعدی در خصوص نحوه ایجاد زاویه φ می‌باشد. می‌توان گفت اگر یک جفت محرک بطور همزمان تحریک شوند در حالیکه محرک دیگر تحریک نشده است زاویه φ در امتداد خطی که زاویه θ در ماژول را بیان می‌کند افزایش یافته و در صورتی که تحریک آن جفت محرک قطع شود زاویه φ در همان امتداد کاهش می‌یابد.

حال با توجه به اینکه تحریک هر جفت محرک، می‌تواند روی حرکت ماژول در یک ناحیه 120 درجه‌ای مؤثر باشد، بر اساس مطالب گفته شده برای کنترل ماژول به یک موقعیت مطلوب، ابتدا تعیین می‌شود که زاویه θ در کدام ناحیه قرار دارد. در این مسئله سه ناحیه برای زاویه θ تعین شده است که مطابق جدول 2 می‌باشد. حال با تعیین ناحیه مورد نظر، استراتژی کنترلی مطابق فلوچارت بیان شده در شکل 9 به مسئله اعمال می‌گردد. استراتژی کنترلی ارائه شده در فلوچارت شکل 9 که با آزمایشات تجربی نیز صحه‌گذاری گردیده است از نوآوریهای این مقاله در بخش کنترل محسوب می‌گردد.

6- آزمایش‌های تجربی

در این بخش، ماژول توسعه یافته از نظر عملکرد تجربی ارزیابی شده است. در شکل 10 سخت‌افزار استفاده شده برای تحریک و کنترل ماژول ملاحظه می‌شود. در ابتدا عملکرد ماژول از نظر میزان تغییر شکل و پوشش فضای کاری مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. با تحریک یکی از محرکهای فنر آلیاژ حافظه‌دار، می‌توان تغییر شکل ماژول را به ازای ولتاژهای مختلف تحریک ملاحظه نمود. در شکل 11، نمودار تغییرات تغییر شکل ماژول با افزایش ولتاژ برای وضعیت θ=0 نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش ولتاژ تحریک آلیاژ حافظه‌دار، میزان تغییر شکل افزایش می‌یابد. نکته جالب، افزایش نسبتا خطی میزان تغییر شکل (زاویه φ) با افزایش ولتاژ می‌باشد. البته با افزایش ولتاژ بیش از یک آستانه تغییر شکل ماژول تغییری نمی‌کند. دلیل آن تغییر فاز کامل ماده به آستنیت می‌باشد که دیگر با افزایش بیشتر ولتاژ تغییری نمی‌یابد. همچنین زاویه θ تغییرات ناچیزی در اطراف صفر درجه نموده که بدلیل عدم قطعیتها در ساخت ماژول می‌باشد. البته این شرایط برای تحریک فقط یک محرک بیان گردید. اگر همزمان دو یا سه محرک تحریک شوند آنگاه زاویه θ دیگر صفر نبوده و علاوه بر تغییر شکل ماژول و افزایش زاویه φ زاویه θ نیز تغییر می‌کند.

می‌توان فضای کاری ماژول را با استفاده از پارامترهای φ و θ و آزمایشات تجربی مطابق جدول 3 استخراج نمود. به منظور بررسی عملکرد استراتژی کنترلی در موقعیت دهی ماژول طراحی شده و تنظیم همزمان زوایای φ و θ آزمایشاتی انجام گرفته است. در این آزمایشات چندین موقعیت

جدول 2 نواحی مختلف کاری ماژول برای تعیین محرکهای فعال در کنترل

Table 2 Different areas of module work for selecting active actuators in control

ناحیه	محرکهای قابل تحریک	محدوده θ_d
1	SMA2وSMA1	$0^\circ < \theta_d < 120^\circ$
2	SMA3وSMA2	$120^\circ < \theta_d < 240^\circ$
3	SMA3وSMA1	$240^\circ < \theta_d < 360^\circ$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.30.5]

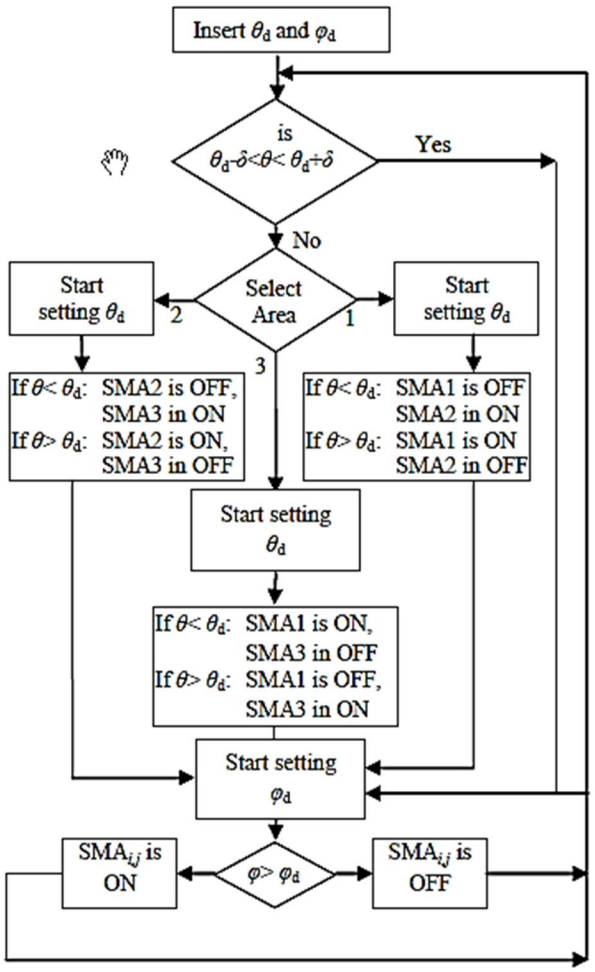

Fig. 9 Algorithm of module position control

شکل 9 الگوریتم کنترل موقعیت ماژول

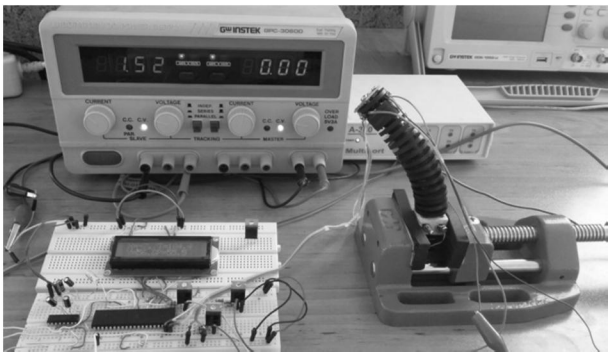

Fig. 10 Hardware of module drive and control

شکل 10 سخت‌افزار تحریک و کنترل ماژول

مطلوب نمونه در فضای کاری ماژول، برای تحقق توسط کنترلر مدنظر قرار گرفته است. نتایج مربوط به موقعیت دهی ماژول، در بخش بعدی ارایه خواهد شد.

7- بحث و بررسی نتایج

در اشکال 12 الی 16 نتایج تجربی اعمال الگوریتم کنترلی بر روی ماژول فنری ارائه شده ملاحظه می‌شود. در اشکال 12 و 13 ولتاژ تحریک محرکها حداکثر 4 ولت در نظر گرفته شده است. لذا همانطور که در اشکال مذکور ملاحظه می‌شود زمان رسیدن به موقعیت مطلوب بیش از 40 ثانیه می‌باشد.

سرعت پاسخ را می‌توان با افزایش ولتاژ تحریک افزایش داد. لذا همانطور که در اشکال 14 و 15 ملاحظه می‌شود پاسخ سیستم به ازای حداکثر ولتاژ تحریک 5 ولت، به کمتر از 5 ثانیه کاهش می‌یابد. حتی می‌توان با افزایش ولتاژ پاسخهای سریعتری را نیز استخراج نمود ولی بایستی مراقب گرم شدن بیش از حد و آسیب دیدن محرک‌ها نیز بود.

البته مشکل اصلی سیستمهای با محرک آلیاژ حافظه‌دار هنگام سرد شدن می‌باشد. زیرا در این مرحله فقط انتقال حرارت طبیعی محرک با هوا باعث تغییر دما و در نتیجه تغییر فاز می‌گردد. البته برخی تدابیر مانند وجود مکانیزم دیفرانسیلی تحریک برای بازگشت سریعتر ماژول به حالت اولیه به این مسئله کمک می‌کند.

با توجه به شکل 13 که نتایج مربوط به موقعیت دهی ماژول برای زوایای $\theta_d=200^\circ$ و $\varphi_d=60^\circ$ را ارائه می‌دهد، با افزایش تغییر شکل ماژول که با پارامتر φ بیان می‌گردد، موفقیت کنترلر برای دستیابی به موقعیت مورد نظر کاهش می‌یابد. دلیل آن ناتوانی نیروی محرک‌های ماژول برای غلبه بر نیروی فنر و ایجاد تغییر شکل مطلوب می‌باشد. این مشکل را می‌توان با افزایش ولتاژ تحریک محرک‌ها برطرف نمود.

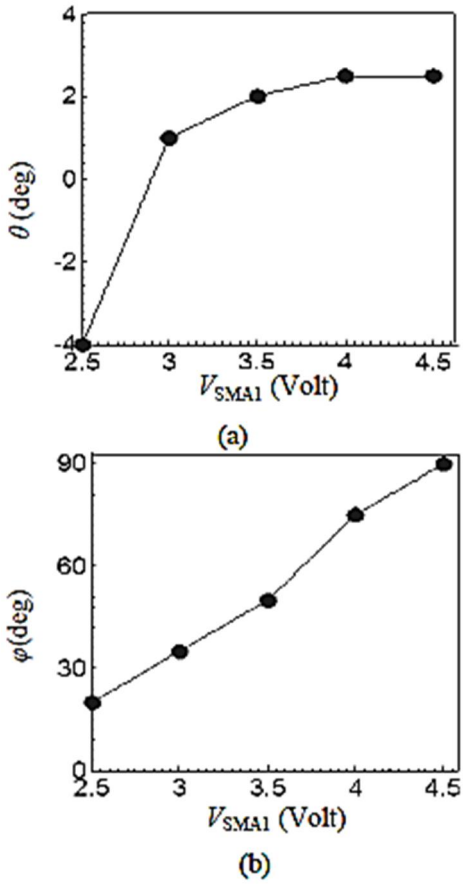

Fig. 11 Module deformation versus time by increasing activation voltage (a) θ , (b) φ

شکل 11 تغییر شکل ماژول برحسب زمان به ازای افزایش ولتاژ تحریک (a) θ، (b) φ

جدول 3 فضای کاری ماژول

Table 3 Module workspace

پارامتر	θ	φ
بازه کاری	Min=0 Max=360	Min=0 Max=90

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.30.5]

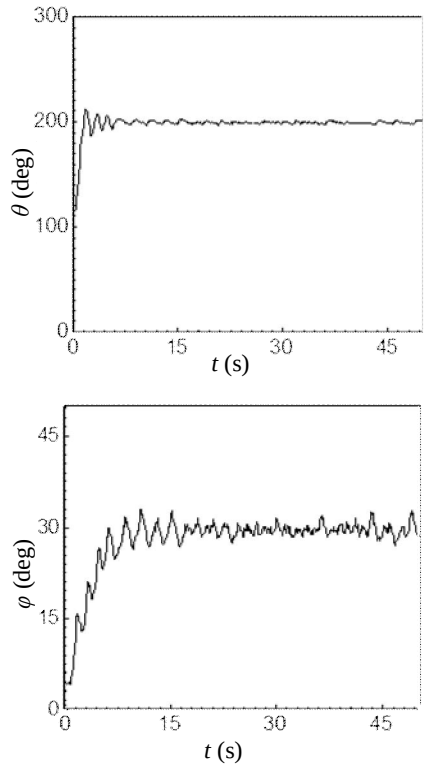

Fig. 14 Module positioning for θ_d=200° and φ_d=30° with 5 V activation voltage (a) θ , (b) φ

شکل 14 موقعیت دهی ماژول برای زوایای θ_d=200° و φ_d=30° با ولتاژ تحریک 5 ولت (a) θ، (b) φ

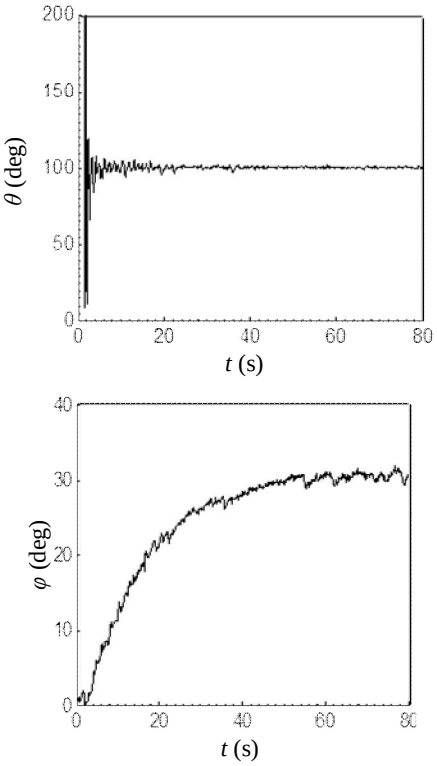

Fig. 12 Module positioning for θ_d=100° and φ_d=30° with 4 V activation voltage (a) θ , (b) φ

شکل 12 موقعیت دهی ماژول برای زوایای θ_d=100° و φ_d=30° با ولتاژ تحریک 4 ولت (a) θ، (b) φ

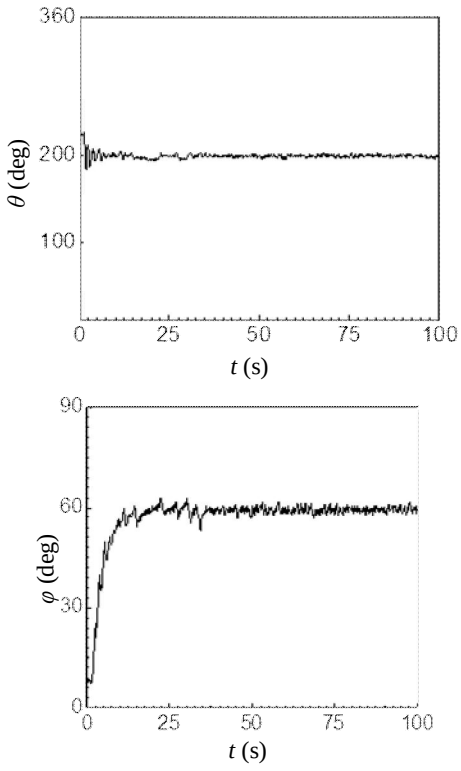

Fig. 15 Module positioning for θ_d=200° and φ_d=60° with 5 V activation voltage (a) θ , (b) φ

شکل 15 موقعیت دهی ماژول برای زوایای θ_d=200° و φ_d=60° با ولتاژ تحریک 5 ولت (a) θ، (b) φ

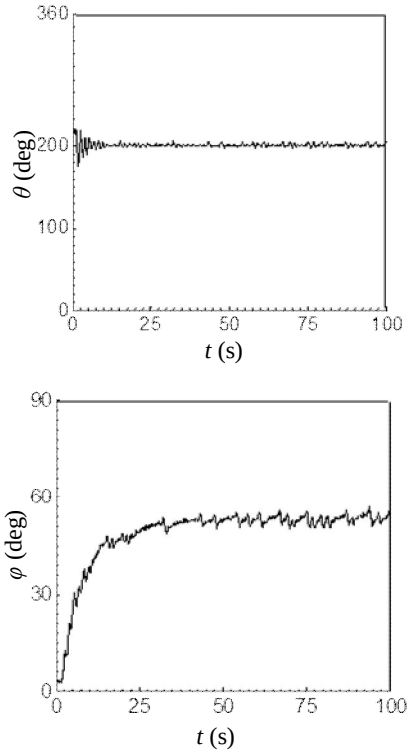

Fig. 13 Module positioning for θ_d=200° and φ_d=60° with 4 V activation voltage (a) θ , (b) φ

شکل 13 موقعیت دهی ماژول برای زوایای θ_d=200° و φ_d=60° با ولتاژ تحریک 4 ولت (a) θ، (b) φ

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.30.5]

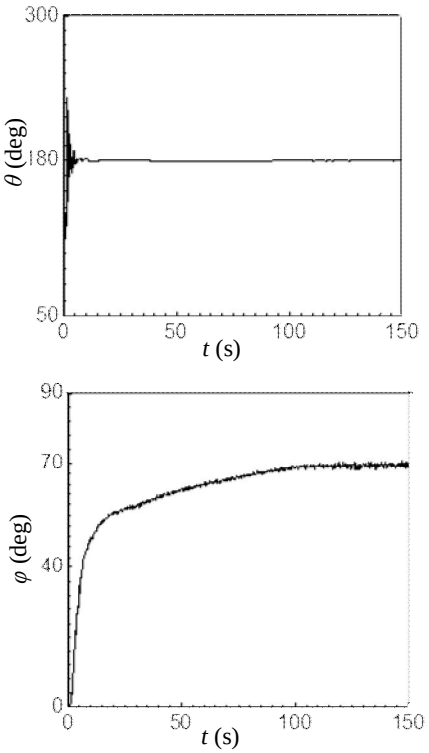

Fig. 16 Module positioning for θ_d=180° and φ_d=70° with 5 V activation voltage (a) θ , (b) φ

شکل 16 موقعیت دهی ماژول برای زوایای θ_d=180° و φ_d=70°با ولتاژ تحریک 5 ولت (a) θ، (b) φ

در اشکال 14 تا 16 موقعیت دهی ماژول به ازای ولتاژ تحریک 5 ولت ارائه شده است. همانطور که در شکل 15 ملاحظه می‌شود رسیدن به موقعیت مطلوب به ازای ولتاژ تحریک 5 ولت میسر گردیده است. این نمودارها عملکرد موفق الگوریتم پیشنهاد شده در فضای کاری ماژول، برای موقعیت دهی مطلوب را نشان می‌دهد.

8- نتیجه گیری

در این مقاله، یک ماژول انعطاف‌پذیر، که با تحریک فنرهای آلیاژ حافظه‌دار تغییر شکل پیدا می‌کند، ارائه گردید. ساختار این ماژول ساده بوده و سازه اصلی آن را یک فنر فشاری تشکیل می‌دهد. با توجه به ایده به کار گرفته شده، ماژول به سادگی قابل توسعه بوده و می‌توان آنرا در طولهای مختلف ایجاد نمود. ماژول توسعه یافته، فضای کاری نسبتا بزرگی داشته و می‌تواند به خوبی به فضای اطراف خود از طریق دو درجه آزادی دسترسی داشته باشد. علاوه بر این، شکل ماژول در فضا نیز می‌تواند با ترکیب دو درجه آزادی ماژول تعیین گردد. بازه درجه آزادی سمت ماژول 360° و بازه درجه آزادی خمیدگی آن 90° تعیین گردید.

مدل سینماتیکی و نیروئی ماژول در این مقاله بررسی گردید. با توجه به مدل توسعه یافته می‌توان پارامترهای ماژول را برای کاربرد مورد نظر در فرآیند طراحی انتخاب نمود. همچنین روند شبیه‌سازی مدل توسعه یافته در یک برنامه کامپیوتری عددی ارائه گردید. با استفاده از این روند می‌توان رفتار ماژول را در کاربردهای مختلف و با پارامترهای مختلف مدلسازی و رفتار آنرا پیش‌بینی نمود.

علاوه بر این در مسئله کنترلی تحقیق، که یک سیستم کنترلی غیرخطی و چند متغیره می‌باشد، به کارگیری الگوریتم کنترل مود لغزشی بررسی گردید. با توجه به اینکه به کارگیری این الگوریتم در عمل ساده نبوده و نیازمند اطلاعات سنسوری کاملی از سیستم می‌باشد، راه حل و الگوریتم مناسب دیگری پیشنهاد گردید. الگوریتم کنترلی جدید از تجربه رفتار آلیاژ حافظه‌دار در یک سیستم مکانیکی و اثرگذاری کنترلرهای ساختار متغیر در کنترل موقعیت آن پیشنهاد گردیده است. با توجه به نتایج آزمایشات تجربی عملکرد الگوریتم ارائه شده صحه‌گذاری گردید. استفاده از قوانین کنترلی به کارگرفته شده در این مقاله در توسعه کنترلرهای مبتنی بر دانش انسانی، مانند کنترلر فازی بسیار مفید می‌باشد. لذا ماژول ارائه شده در این مقاله هم از نظر طراحی مکاترونیکی و سیستم سنسوری و هم از نظر کنترلر آن دارای نوآوری و بداعت می‌باشد.

ترکیب سیستم کنترل ارایه شده با طراحی مکانیزم ماژول یک سیستم مکاترونیکی جدید با قابلیتهای ویژه برای استفاده در سیستمهای ماژولار را ایجاد می‌نماید. انعطاف‌پذیری و تغییر شکل پیوسته ماژول می‌تواند به توسعه بازوهای رباتیکی خاص و ابزارهای هوشمند و توانمند آندوسکوپی به منظور بازرسی مجاری بدن در کاربردهای پزشکی منجر شود.

9- فهرست علائم

B	تابع متغیرهای حالت در سیگنال کنترل لغزشی
f	تابع نیروهای اینرسی
F	نیروی فنر آلیاژ حافظه‌دار
F'	مجموع نیروی فنرهای آلیاژ حافظه‌دار در ماژول
g	تابع انتقال حرارت
h	تابع وابستگی درصد فاز به دما یا تنش
k	ضریب سختی فنر فشاری در خمش
k_1	ضریب وابستگی نیرو به تغییر شکل در فنر آلیاژ حافظه‌دار
k_2	ضریب وابستگی نیرو به درصد فاز در فنر آلیاژ حافظه‌دار
l	طول ماژول (mm)
M	ماتریس جرم
q	مختصات تعمیم یافته
r	شعاع تصویر نقطه انتهای ماژول در صفحه xy (mm)
S	سطح لغزش
T	دما (°C)
u	ولتاژ تحریک محرک (V)
x	مختصه انتهای ماژول (mm)
y	مختصه انتهای ماژول (mm)
z	مختصه انتهای ماژول (mm)

علائم یونانی

ρ	چگالی (kgm^{-3})
θ_x	دوران صفحه انتهای ماژول حول محور x (°)
θ_y	دوران صفحه انتهای ماژول حول محور y (°)
θ	زاویه خط واصل مبدأ تا تصویر نقطه انتهای ماژول نسبت به محور x (°)
φ	تغییر زاویه‌ی ماژول (°)
σ	تنش (MPa)
τ	نیروی محرک‌ها (N)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.30.5]

ξ	درصد فاز ماده
ε	کرنش
Ω	ثابت تبدیل درصد فاز به تنش (MPa)
Θ	ضریب انبساط حرارتی ($C^oMPa/$)

بالانویس‌ها

-1	معکوس

زیرنویس‌ها

d	پارامتر مطلوب
I	شماره محرک
L	حداکثر تغییر شکل محرک
s	مارتنزیت ایجاد شده با تنش
t	مارتنزیت ایجاد شده با دما
T	دما
0	شرایط اولیه
1	شرایط ثانویه
σ	تنش

10- مراجع

[1] V. De Sars, S. Haliyo, J. Szewczyk, A practical approach to the design and control of active endoscopes, *Mechatronics*, Vol. 20, No. 2, pp. 251-264, 2010.

[2] A. Ishida, M. Sato, Z. Gao, Properties and applications of Ti Ni Cu shape-memory-alloy thin films, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 577, No. 1, pp. 184-189, 2013.

[3] T. Mineta, T. Mitsui, Y. Watanabe, S. Kobayashi, Y. Haga, M. Esashi, Batch fabricated flat meandering shape memory alloy actuator for active catheter, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 88, No. 2, pp. 112-120, 2001.

[4] T. Mineta, T. Mitsui, Y. Watanabe, S. Kobayashi, Y. Haga, M. Esashi, An active guide wire with shape memory alloy bending actuator fabricated by room temperature process, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 97, No. 4, pp. 632-637, 2002.

[5] F. Chapelle, P. Bidaud, Evaluation functions synthesis for optimal design of hyper-redundant robotic systems, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 41, No. 10, pp. 1196-1212, 2006.

[6] D. B. Camarillo, C. F. Milne, C. R. Carlson, M. R. Zinn, J. K. Salisbury, Mechanics modeling of tendon-driven continuum manipulators, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 6, pp. 1262-1273, 2008.

[7] Y. Kai, G. Chenglin, Research and application of entirely-integrated spatial-bending shape memory alloy actuator, *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems*, Seoul, Korea, Oct. 8-11, 2007.

[8] P. Walters, D. McGoran, Digital fabrication of smart structures and mechanisms-creative applications in art and design, *International Conference on Digital Printing Technologies and Digital Fabrication*, Minneapolis, USA, Oct. 2-6, 2011.

[9] A. Villoslada, A. Flores, D. Copaci, D. Blanco, L. Moreno, High-displacement flexible shape memory alloy actuator for soft wearable robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 73, No. 1, pp. 91–101, 2015.

[10] D. C. Lagoudas, and I.G. Tadjbakhsh, Active flexible rods with embedded SMA fibers, *Smart Materials and Structures*,Vol. 1, No. 2, pp. 162-167, 1992.

[11] L. C. Brinson, M. S. Huang, C. Boller, W. Brand, Analysis of controlled beam deflection using sma wires, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, No. 1, pp. 12-25, 1997.

[12] M. M. Sheikhi, A. Hadi, M. Qasemi, Design and dynamic modeling of a module included a compressive spring and actuated by shape memory alloy wire , *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 17-26, 2015 (in Persian فارسی).

[13]F. O. M. Joseph, M. Kumar, K. Franz, B. Konh, P. Hutapea, Y.-J. Zhao, A. P. Dicker, Y. Yu, T. K. Podder, Control of shape memory alloy actuated flexible needle using multimodal sensory feedbacks, *Journal of Automation and Control Engineering*, Vol. 3, No. 5, pp. 428-434, 2015.

[14] A .Hadi, A .Yousefi-Koma, M .Moghaddam, M .Elahinia, A. Ghazavi, Developing a novel SMA-actuated robotic module, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 162, No. 1, pp. 72-81, 2010.

[15] N. Van Der Stap, F. Van Der Heijden, I. A. Broeders ,Towards automated visual flexible endoscope navigation, *Surgical Endoscopy*, Vol. 27, No. 10, pp. 3539-3547, 2013.

[16] H. Ashrafiuon and V. R. Jala, Sliding mode control of mechanical systems actuated by shape memory alloy, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 131, No. 1, pp. 011010-1-011010-6, 2009.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.30.5]