مجله مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1396، دوره 17، شماره 6، ص‌ص 444-450

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

معرفی و توسعه سنسور نیروی مغناطیسی نرم نوین براساس اثر هال

حسین میرزانژاد[1]، اشکان فتحیان[2]، محمد مجرّبی‌تبریزی[2]، علی شریف‌نژاد[3]، محمدمهدی عاقلی‌حاجی‌آبادی[4*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- استادیار، بیومکانیک ورزشی، پژوهشگاه تربیت بدنی، تهران
4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 14115-146، agheli@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 20 فروردین 1396
پذیرش: 15 خرداد 1396
ارائه در سایت: 08 تیر 1396

کلید واژگان:
سنسور نرم
رباتیک نرم
سنسور نیرو
اثر هال

چکیده

مقاله پیش‌رو به ارائه یک سنسور نیروی نرم با صرفه اقتصادی بالا، مناسب برای کاربردهای رباتیک نرم که مستلزم انعطاف‌پذیری بالا و گستره اندازه‌گیری وسیع به صورت نقطه‌ای و همچنین سطحی می‌پردازد. همه سنسورهای نیرویی که با سنسور اثر هال تاکنون ساخته شده‌اند، با اندازه‌گیری میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط یک تکه آهن‌ربای جامد در نزدیکی سنسور اثر هال به سنجش نیروهای اعمالی می‌پردازند. سنسور نیروی معرفی شده در این مطالعه با اندازه‌گیری تغییرات چگالی شار مغناطیسی حاصل از پودر مغناطیسی مخلوط شده با سیلیکون رابر، هنگامی که تحت فشار حاصل از نیروی عمودی قرار می‌گیرد، به نیروسنجی می‌پردازد. سنسور در ابعاد و با غلظت‌های متفاوت پودر مغناطیسی طراحی و ساخته شده است تا به یک طراحی بهینه ازنقطه‌نظر حساسیت در کنار خواص خطی قابل‌قبول منجر شود. بررسی نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی نشان می‌دهد که با تنظیم خواص فیزیکی و ویژگی‌های ساختاری سنسور می‌توان به گستره‌های کاری مختلف با حساسیت‌های معین دست پیدا کرد. این سازگاری و انطباق بالا در کنار اعتمادپذیری قابل‌قبول در بسیاری از اجزای اندازه‌گیر نیروی نرم در کاربردهای امروزی به‌خصوص در زمینه رباتیک نرم مورد نیاز است.

Developing a novel soft magnetic force sensor based on Hall Effect

Hossein Mirzanejad[1], Ashkan Fathian[1], Mohammad Mojarrabi Tabrizi[1], Ali Sharifnejad[2], Mohammad Mahdi Agheli Haji Abadi[1*]

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2- Sport Science Research Institute, Centre of Sport Biomechanics, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-146 Tehran, Iran, agheli@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 09 April 2017
Accepted 05 June 2017
Available Online 29 June 2017

Keywords:
Soft Sensor
Soft Robotics
Force Sensor
Hall Effect

ABSTRACT

This paper proposes a new inexpensive soft force sensor suitable for soft robotics applications that require high flexibility and wide range of sensing area. All Hall Effect sensors developed so far use a Hall Effect sensor to detect the magnetic field of a piece of solid magnet. The proposed force sensor in this paper uses a Hall Effect sensor to detect the magnetic flux density change induced by aligned magnetic powder blended with silicone rubber when a normal force is applied. The sensor is designed and tested with different magnetic powder density and sensor dimensions to achieve an optimum design in sensitivity as well as linearity. The experimental results show that different force measurement range with specific desired sensitivity can be achieved by adjusting certain physical properties of the sensor. This is a useful feature for many soft sensing elements in today's applications requiring more compliance and reliable sensors, especially in soft robotics applications.

1- مقدمه

توسعه و بهبود سنسورها و عملگرهای نرم یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی در سال‌های اخیر محسوب می‌شود. زمینه‌های کاربردی زیادی از جمله توسعه رباتیک نرم [1]، حسگرهای لمسی [2]، زیست پزشکی [3] و اندازه‌گیری حرکات مختلف بدن [4] می‌توان نام برد که موجب علاقه پژوهشگران و سوق به مطالعه در این زمینه می‌شود. به دلیل طبیعت تجهیزات نرم، اجزای حس‌کننده باید دارای نرمی و انعطاف‌پذیری مطلوب علاوه‌بر سایر ویژگی‌های مورد انتظار مانند دقت، اعتمادپذیری، خطی بودن و نیز تولید ارزان باشند. امروزه شکل‌پذیری بالای الاستومرها مانند سیلیکون رابر[1] در کنار سایر ویژگی‌های منحصربه فرد آن‌ها چون خواص فیزیکی و شیمیایی مناسب و به‌کارگیری راحت و ارزان سبب استفاده گسترده این مواد به عنوان زمینه نرم در ساختار حسگرها و محرک‌های نرم شده است.

نحوه اندازه‌گیری مؤلفه‌های نیروهای مختلف اعمالی یکی از مهم‌ترین مباحث در حسگرها و محرک‌های نرم است. در حال حاضر از روش‌ها و مفاهیم مختلفی مانند استفاده از سنسورهای نیروی خازنی، مواد

[1] Silicon rubber

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Mirzanejad, A. Fathian, M. Mojarrabi Tabrizi, A. Sharifnejad, M. M. Agheli Haji Abadi, Developing a novel soft magnetic force sensor based on Hall Effect, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 444-450, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.14.4]

پیزوالکتریک، سنسورهای مقاومتی و بسیاری دیگر برای این منظور بهره برده می‌شود. هر یک از این موارد مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند [6,5]. برای نمونه استفاده از لایه‌های خانی [8,7] برای سنجش نیرو یک راه مؤثر برای داشتن سنسورهایی با ضخامت بسیار کم، اما ساخت آن‌ها نیازمند بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته فناوری میکرو است. خواص غیرخطی نسبی از دیگر اشکالات این نوع سنسورهاست.

سنسورهای نیرویی پیزورزیستیو [9] که جاسازی آن‌ها در خواصی مشابه سنسورهای خازنی دارند و نیازمند پیاده‌سازی روی بردهای مدار چاپی جامد است، ساختارهای انعطاف‌پذیر و انحنادار را با مشکل مواجه می‌کند. صلبیت نامطلوب حسگرها برای کاربردهای نرم با جاسازی کانال‌های میکروسیال در زمینه سیلیکونی سنسورهای ارائه‌شده در مراجع [10-12] تا حدی برطرف شده است. نمونه‌های با قابلیت تغییر شکل زیاد این نوع سنسورها برای کاربردهای با کرنش بالا مانند لباس‌های هوشمند مناسب، ولی در این‌جا نیز برای ساخت دقیق میکروکانال‌ها نیاز به روش‌های تولید به نسبت پیچیده است.

گاهی در کاربردهای رباتیک نرم نیاز به اندازه‌گیری نیروهای گسترده سطحی است. بدین منظور از رشته واحدهای حس‌کننده استفاده می‌شود که معمولاً با ایجاد مسیرهای ارتباطی و سیم‌کشی‌های پرتراکم در ساختار شبکه مورد نظر می‌شود. لیف‌پی [13] و همکاران از بارومترهای MEMS در یک ساختار آرایه‌ای به جای سنسورهای پیزورزیستیو و صفحات خازنی برای سنجش نیروهای گسترده صفحه‌ای استفاده کردند. این ایده با وجود ساختار ساده و کاربردی به دلیل وجود بارومترهای صلب و حجیم در ساختار خود ممکن است برای کاربردهای با انعطاف‌پذیری بالا و نیز دارای محدودیت‌های ضخامتی گزینه مناسبی نباشد.

رفتار غیرخطی، ساختار حجیم و فرایند تولید پیچیده و هزینه‌بر برخی از ویژگی‌های نامطلوب سنسورهای یادشده است. با استفاده از سنسورهای مغناطیسی به کمک سنسورهای اثر هال می‌توان بر این مشکلات چیره شد. این سنسورهای مغناطیسی در عین سادگی و ارزانی ساخت به دلیل تغییرات خطی خروجی سنسور اثر هال در اثر تغییرات میدان حول آن می‌توانند با طراحی مناسب خواص خطی قابل قبولی از خود نشان دهند. در جدول 1 به اختصار برخی از این سنسورهای نیروی نرم گزارش شده که براساس اثر هال مؤلفه‌های نیرو را شناسایی و اندازه‌گیری می‌کنند و به همراه کاربردها و ویژگی‌های خاص هر کدام نشان داده شده است.

در تمام این سنسورهای نیروی مغناطیسی یک قطعه آهن‌ربای دائمی کوچک داخل یک پوشش نرم غالباً از جنس سیلیکون رابر جاسازی شده است. در این ساختار در هر واحد سنجش نیرو نیازمند جای‌گذاری دقیق آهن‌رباهای دائمی منفرد در مقابل سنسور اثر هال است. در بسیاری از کاربردهای حس لمسی نیازمند حس توزیع نیروهای وارد در یک سطح گسترده به جای حس نقطه‌ای است و در بسیاری از کاربردها این سطح لزوماً یک سطح مسطح نیست. برای ساخت سنسورهای مناسب در این موارد که براساس اثر هال عمل می‌کنند، جای‌گذاری تعداد بسیار زیادی آهن‌ربای دائمی کوچک در مقابل سنسور اثر هال به طور مناسب برای تشکیل یک رشته از واحدهای حس‌کننده نیاز است. برای چنین سیستمی دو اشکال اصلی مطرح است: 1- وجود تعداد زیادی قطعات جامد در ساختار که برای کاربردهای نرم چندان مطلوب نیست. 2- ایجاد یک سیستم غیرمجتمع با تکه‌های جدای از هم.

در این مقاله برای رفع این نواقص در یک سیستم نیروسنجی براساس اثر هال به معرفی یک روش جدید برای ایجاد میدان مغناطیسی حول سنسور اثر هال با استفاده از پودر مغناطیسی به جای قطعات آهن‌ربا پرداخته می‌شود. شکل 1 شماتیکی از این سنسور جدید بدون به‌کارگیری آهن‌ربای جامد نئودیومی در ساختار آن را نشان می‌دهد. تولید میدان مغناطیسی حول سنسور اثر هال توسط لایه‌ای از پودر مغناطیسی جهت‌گیری شده بالای سنسور هال صورت می‌پذیرد. در این مقاله طراحی، ساخت و بررسی خصوصیات این سنسور جدید ارائه شده است.

این مطالعه بر آن است که مفاهیم و نیز روند ساخت سنسور در بخش 2 ارائه شود. روش‌ها و طراحی آزمون در بخش 3 و نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی و نمودارهای مربوط در بخش 4 آورده شده و مورد بحث و بررسی قرار

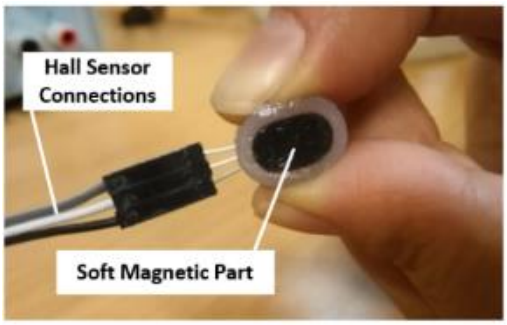

Fig. 1 The prototype of soft force sensor employing magnetic aligned powder to make field around a linear hall effect sensor

شکل 1 نمونه سنسور نیروی نرم مورد مطالعه با انعطاف‌پذیری بالا که از پودر مغناطیسی جهت‌گیری شده برای ایجاد تغییرات میدان مغناطیسی حول سنسور اثر هال بهره می‌برد.

جدول 1 تعدادی از مهم‌ترین کارهای صورت گرفته بر اندازه‌گیری نیرو براساس اثر هال طی سال‌های مختلف

Table 1 Some of major works on force sensing based on hall effect over the years

سال	کاربرد	ابعاد مورد سنجش	ویژگی‌ها
1992	استفاده در دست مصنوعی ماهر (بازوی ربات) [14]	یک‌بعدی (نیروی عمودی)	طراحی ساده و ارزان، حساسیت پایین برای نیروهای برشی
2006	سنسورهای نوک انگشتان ربات انسان‌نمایی موسوم به جیمز [15]	یک‌بعدی (نیروی عمودی)	گستره کاری پایین (نیروهای کم)، رفتار غیرخطی
2013	مفهوم اندازه‌گیری نیرو در سه بعد با سنسور اثر هال [16]	سه‌بعدی	رفتار خطی، حساسیت پایین برای نیروهای برشی
2013	سنسورهای لمسی برای سکوهای رباتیکی حساس [17]	سه‌بعدی	رفتار غیرخطی برای برخی از بارگذاری‌ها، مدل‌سازی المان محدود
2015	نیروسنجی در جراحی بدون آسیب و در ابعاد ریز [3]	یک‌بعدی (نیروی عمودی)	گستره کاری پایین (نیروهای کم)، رفتار خطی
2015	کاربردهای زیست‌پزشکی [18]	سه‌بعدی	پاسخ خطی برای نیروهای عمودی
2016	کاربردهای زیست‌پزشکی [19]	سه‌بعدی	پسماند نسبی، مدل‌سازی ریاضی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.14.4]

گرفته است. در بخش 5 به جمع‌بندی موضوع پرداخته خواهد شد.

2- سنسور

2-1- مفاهیم

سنسور نیروی ارائه شده در این مقاله از یک سنسور اثر هال برای اندازه‌گیری تغییرات چگالی شار مغناطیسی (B) به هنگام اعمال نیروی عمودی بهره می‌گیرد. سنسور به شکل استوانه‌ای و با خواص فیزیکی مختلف شامل قطر ناحیه مغناطیسی (D)، ارتفاع بدنه نرم (h) و غلظت پودر مغناطیسی به کار رفته در ساختار آن ساخته شده است. در ادامه همین بخش به توضیح بیشتر این خواص پرداخته خواهد شد. سنسور اثر هال خطی در وجه مسطح پایینی بدنه نرم استوانه‌ای جاسازی شده به صورتی که قسمت حسگر جلو سنسور رو به بالا قرار گرفته است. در وجه بالایی سنسور مخلوطی همگن از پودر و سیلیکون رابر به صورت لایه‌ای با ضخامت معین قرار گرفته است. دوقطبی‌های ذرات پودر مغناطیسی توسط اعمال میدان مغناطیسی خارجی در حین قالب‌ریزی به صورت عمودی (از بالا به پایین) جهت‌گیری شده‌اند؛ بنابراین می‌توانند مانند یک آهن‌ربای دائمی در نزدیکی سنسور اثر هال مانند شکل 2 عمل کنند. بدنه نرم سنسور از جنس سیلیکون رابر است. هنگام اعمال نیروی عمودی فشاری، بدنه نرم سیلیکونی سنسور متناظر با بزرگی نیروی وارده فشرده شده و بدین‌سان سبب تغییر فاصله ناحیه مغناطیسی نسبت به سنسور اثر هال و تغییرات ولتاژ خروجی آن می‌شود.

2-2- ساخت سنسور

بدنه نرم سنسور مورد نظر از سیلیکون رابر با قابلیت پخت در دمای اتاق با نام تجاری آرتی‌وی 4403 محصول شرکت پی.سی.سی ساخته شده است که بعد از پخت سیلیکونی با سفتی در حدود 10 در مقیاس شور A با ظاهر بی‌رنگ نیمه شفاف به دست می‌دهد. شکل استوانه‌ای سنسور از قالب‌گیری سیلیکون در قالب‌های پلاستیکی از جنس پی- ال- ای که توسط پرینتر سه‌بعدی ساخته شده‌به دست آمده است. ساختار کلی سنسور طی دو مرحله برای تولید دو بخش مختلف آن قالب‌ریزی شده است: بخش بالایی یا بخش مغناطیسی و بخش پایینی یا بخش ارتجاعی. مراحل مختلف تولید این سنسور دوبخشی به ترتیب در شکل 3 نشان داده شده است. مطابق شکل ابتدا لایه نازکی از مخلوط همگن با نسبت معین پودر مغناطیسی و سیلیکون رابر (شکل 3-a) در حضور میدان مغناطیسی ناشی از یک جفت آهن‌ربای دائمی (شکل 3-b) قالب‌گیری شده است. پس از پخت مخلوط در دمای اتاق به مدت تقریبی 15 ساعت، لایه مغناطیسی نرم ایجاد شده در مرکز قالب پایه مانند شکل 3-c قرار داده و قالب بدنه سنسور بر آن سوار می‌شود تا سیلیکون رابر خالص داخل آن ریخته شود، پس از پخت مجدد نمونه نهایی آماده گردد. یک شیار باریک برای جاسازی سنسور اثر هال در بدنه سیلیکونی نمونه

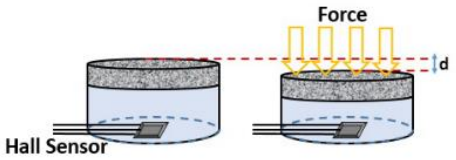

Fig. 2 Applying normal force from above, compresses the soft cylinder and causes the magnetic part (dark region) get closer to the hall sensor.

شکل 2 اعمال نیروی عمودی از بالا، بدنه استوانه‌ای نرم سنسور را فشرده ساخته و سبب نزدیک‌تر شدن ناحیه مغناطیسی (ناحیه تیره) به سنسور اثر هال می‌شود.

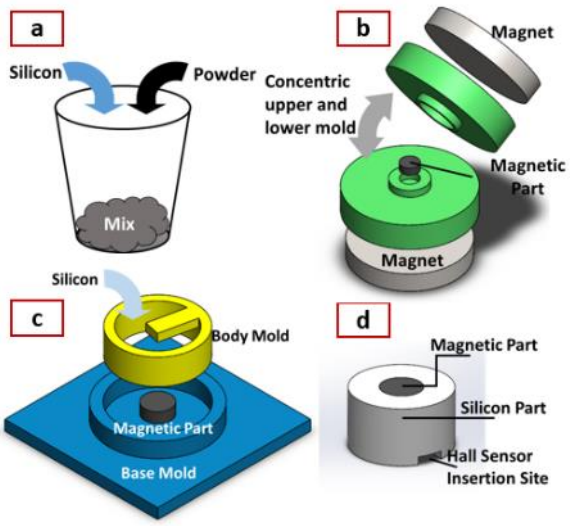

Fig. 3 The fabrication steps of the soft sensor: a- Mixing magnetic powder with silicon, b- Powder alignment with a pair of magnets, c- Molding soft silicon body, d- The fabricated soft sensor.

شکل 3 مراحل ساخت سنسور نرم: الف- مخلوط کردن پودر مغناطیسی با سیلیکون رابر، ب- جهت‌گیری دوقطبی‌های پودر مغناطیسی توسط میدان جفت آهن‌ربا، ج- قالب‌ریزی بدنه نرم سیلیکونی، د- سنسور نرم تولید شده

حاصل تعبیه شده است (شکل 3-d).

دلیل به کار بردن یک جفت آهن‌ربای استوانه‌ای جهت‌دهی دوقطبی‌های مغناطیسی در ساختار مخلوط پودر و سیلیکون در یک جهت خاص (عمودی) است. در حالی که میدان مغناطیسی در اطراف یک آهن‌ربای استوانه‌ای دارای بزرگی و جهت‌های متفاوتی است، قرار دادن دو آهن‌ربای استوانه‌ای روبه‌روی هم به صورت هم‌مرکز (مطابق شکل 4) می‌تواند منجر به ایجاد ناحیه‌ای در فضای بین آن‌ها شود که در آن بزرگی و جهت میدان مغناطیسی به طور قابل قبولی یکنواخت است. این ناحیه روی خطی تحت عنوان cutline در شکل 4 قرار دارد. آهن‌رباهای نئودیومی برای ایجاد میدانی با قدرت مناسب انتخاب شده‌اند. قطر این آهن‌رباها به حد کافی بزرگ انتخاب شده‌اند تا بتوان از تأثیر تغییرات شدید میدان در لبه‌های آن اجتناب کرد. در این‌جا بیشینه قطر بخش مغناطیسی سیلیکون (مخلوط استوانه‌ای شکل سیلیکون و پودر) 12 میلی‌متر است.

قطر آهن‌رباهای استوانه‌ای تولید میدان 30 میلی‌متر انتخاب شده است تا

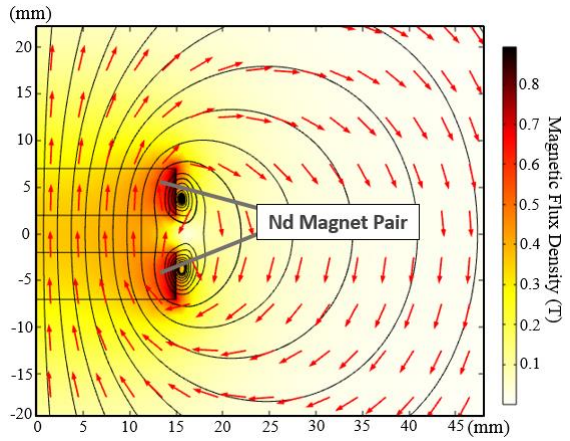

Fig. 4 Field lines around a pair of neodymium magnets

شکل 4 نمایش خطوط میدان در اطراف یک جفت آهن‌ربای دائمی نئودیومی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.14.4]

یکنواختی یادشده حاصل شود. قدرت میدان بین دو آهن‌ربا با تغییر فاصله آن‌ها نسبت به هم (z) تغییر می‌یابد. شکل 5 تغییرات میدان بین یک جفت آهن‌ربای نئودیومی استوانه‌ای با قطر و ارتفاع به ترتیب 5 و 30 میلی‌متر به ازای چندین فاصله مختلف آن‌ها از هم که در نرم‌افزار المان محدود کامسول مولتی‌فیزیکس 5.1 شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. برای هدف مورد نظر در آزمایش‌ها فاصله بین دو آهن‌ربا (z) برابر 4 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مطابق شکل 5 در این فاصله قدرت زیاد میدان ضمن حفظ یکنواختی آن تضمین می‌شود.

3- آزمایش‌های عملی

3-1- روش‌های آزمایش

در این مطالعه تأثیر متغیرهای مختلف بر رفتار خروجی سنسور ارائه شده مورد بررسی قرار گرفته است. متغیرهای تحت بررسی شامل غلظت پودر مغناطیسی یا همان نسبت ترکیب پودر و سیلیکون (*MR*)، قطر ناحیه مغناطیسی (*D*) و ارتفاع کل سنسور استوانه‌ا نرم (*h*) است که در ادامه به شرح هر کدام می‌پردازیم.

الف) غلظت پودر

اثر غلظت پودر ترکیب شده با سیلیکون برای تشکیل ناحیه مغناطیسی سنسور مورد نظر بدین گونه بررسی شده است که سه نسبت ترکیب جرمی مختلف (که به‌اختصار با *MR* نشان می‌دهیم) مورد آزمایش قرار گرفته‌اند: 1:5، 1:2 و 1:1. (نسبت ترکیب 1:n یعنی یک سهم جرمی از پودر با n سهم جرمی از سیلیکون ترکیب شده است.)

ب) قطر ناحیه مغناطیسی

قطر لایه نازک استوانه‌ای موسوم به بخش مغناطیسی سنسور نیز در سه سطح تغییر داده شده است تا اثر این تغییرات بر خروجی سنسور مورد بررسی قرار گیرد. نتایج این بررسی دارای اهمیت بالایی از نظر پاسخ‌گویی به این پرسش است که آیا داشتن ناحیه مغناطیسی وسیع‌تر بهتر است یا خیر. بدین منظور سه قطر 5، 8 و 12 میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفتند، همچنین ارتفاع همه این لایه‌های مغناطیسی استوانه‌ای 2 میلی‌متر است.

ج) ارتفاع سنسور

سه سطح مختلف 5، 7 و 11 میلی‌متر برای ارتفاع کل سنسور مورد مطالعه قرار گرفت.

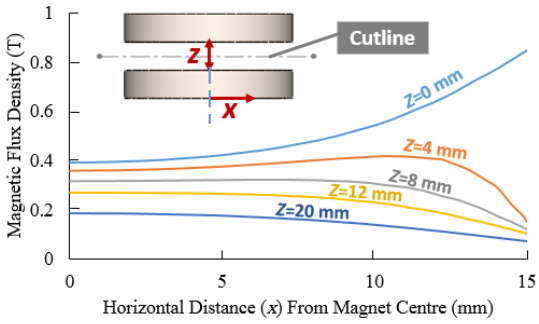

Fig. 5 Magnetic flux magnitude change for different distances between two cylindrical magnets

شکل 5 تغییرات بزرگی چگالی شار مغناطیسی به ازای فاصله‌های مختلف بین دو آهن‌ربای استوانه‌ای

3-2- ست‌آپ آزمایش

مطابق مطالبی که در بخش پیشین توضیح داده شد، تعداد سه پارامتر هر یک در سه سطح در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به تعداد 27 نمونه باید از سنسورها ساخته شده و مورد آزمایش قرار گیرند تا نتایج به جامع‌ترین شکل ممکن حاصل شوند. همه سنسورها به شکل استوانه‌ای با قطر کلی یکسان 12 میلی‌متر مشابه آن‌چه در شکل 6 نشان داده تهیه شده است. در این شکل (شکل 6) همه نمونه‌های دارای غلظت پودر یکسان در بخش مغناطیسی ولی در ابعاد مختلف (قطر ناحیه مغناطیسی و ارتفاع سنسور) نشان داده شده‌اند. هر سنسور می‌تواند با اختصاص یک کد به آن که شامل مقادیر هر سه پارامتر فیزیکی مورد بررسی در ساختار آن است، به طور منحصر به فرد نام‌گذاری شود. برای نمونه کد D8-h5-1:2 به نمونه‌ای با قطر ناحیه مغناطیسی 8 میلی‌متر، ارتفاع کل 5 میلی‌متر و درنهایت غلظت پودر ناحیه مغناطیسی با نسبت ترکیب جرمی 1 به 2 (یک سهم پودر، دو سهم سیلیکون) اشاره دارد. این نام‌گذاری در ادامه مقاله به کار خواهد رفت. ست‌آپ آزمایش‌ها همان‌طور که در شکل 7 نشان داده شده است، شامل یک منبع تغذیه مگاتک ام پی-3005 دی، یک مولتی‌متر (سینومتر دی-ام97) برای خواندن ولتاژ خروجی سنسور اثر هال (اس- اس 49 ای هانی‌ول) با دقت یک میلی ولت و یک مکانیزم اعمال نیرو که برای اعمال نیروهای فشاری مختلف به صورت پله به سنسورهای مورد آزمایش طراحی شده است. خروجی سنسور اثر هال در حالت غیربارگذاری شده که آن را ولتاژ آفست می‌نامیم، در حدود 2.4 ولت به ازای ولتاژ تغذیه 5.0 ولت است. هنگامی که بدنه سنسور نرم موردنظر تحت اثر نیروی فشاری وارد از سمت مکانیزم اعمال نیرو فشرده می‌شود (میزان فشردگی سنسورها توسط ساعت اندازه‌گیری مطابق شکل 8 به‌دست آمده است)، ولتاژ خروجی سنسور اثر هال از مقدار اولیه آن (ولتاژ آفست) شروع به تغییر می‌کند که پاسخ عمومی یک نمونه از سنسورها در شکل 9 آورده شده است. نتایج خالص این آزمایش برای همه 27 نمونه ساخته شده از سنسورها بدون تقویت‌شوندگی در شکل 10 آورده شده است.

4- بحث و نتیجه‌گیری

نمونه‌های شرح داده شده در بخش 3 با اعمال نیروی عمودی از بالای هر کدام مورد آزمایش قرار گرفته و ولتاژهای خروجی آن‌ها ثبت شد. مشاهدات حاکی از آن است که هر سنسور مغناطیسی جدای از مقدار پارامترهای دخیل در ساختار آن (یعنی *D*، *h* و *MR*) یک رویه و رفتار یکسانی مانند آن‌چه در

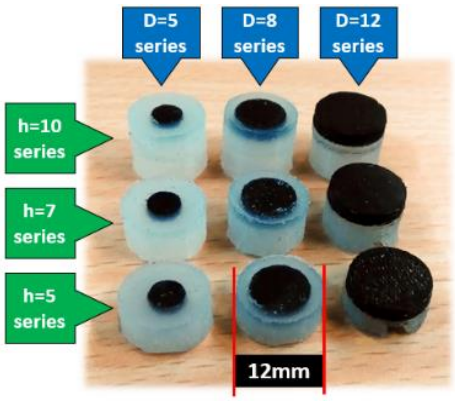

Fig. 6 All 9 prototypes with different D and h but the same MR

شکل 6 همه نمونه‌های با D و h مختلف و غلظت پودر یکسان

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.14.4]

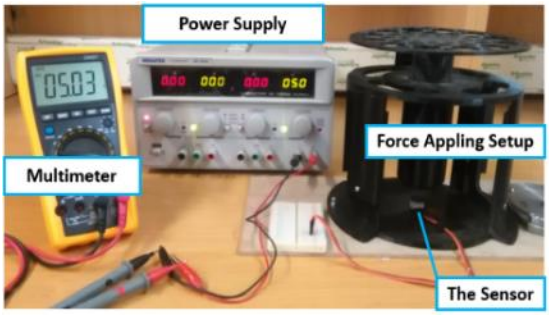

Fig. 7 Experimental set-up

شکل 7 ست‌آپ آزمایش

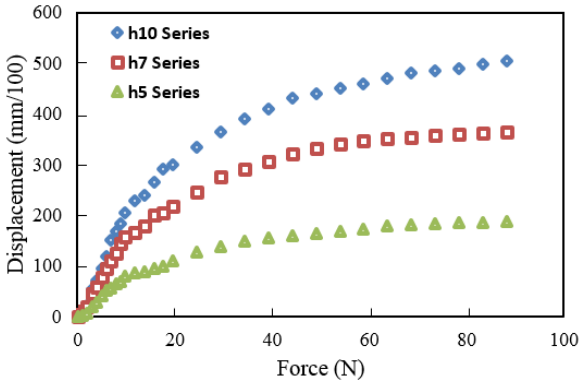

Fig. 8 The measured displacement of the sensors for different forces

شکل 8 جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری‌شده سنسورها به ازای نیروهای مختلف

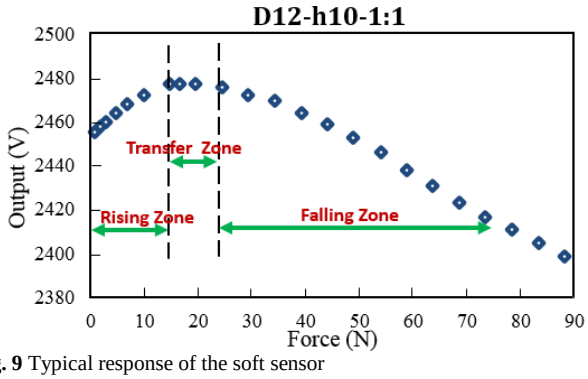

Fig. 9 Typical response of the soft sensor

شکل 9 پاسخ عمومی یک نمونه از سنسور مورد مطالعه

شکل 9 به نمایش گذاشته شده از خود نشان می‌دهد. نمودار آورده شده در این شکل پاسخ متناظر با نمونه D12-h10-1:1 است.

تمام سنسورها به‌گونه‌ای ساخته شده که سطح بالایی لایه مغناطیسی مانند قطب شمال و سطح پایینی آن مانند قطب جنوب یک آهن‌ربا عمل کند. از طرفی رفتار سنسور اثر هال خطی تعبیه شده در زیر این لایه مغناطیسی به‌گونه‌ای است که ولتاژ خروجی آن به هنگام نزدیک‌تر شدن قطب شمال یک آهن‌ربا کاهش و هنگام نزدیک شدن قطب جنوب آهن‌ربا افزایش می‌یابد. پاسخ مورد انتظار از سنسور طراحی شده با این خصوصیات می‌تواند افزایش پیوسته ولتاژ خروجی در اثر اعمال نیروی فشاری بدان باشد. بااین‌وجود پاسخ واقعی سنسورها مطابق آن‌چه در شکل 9 نشان داده شده، به‌گونه‌ای است که ولتاژ خروجی سنسور با افزایش تدریجی فشار وارده ابتدا افزایش می‌یابد (که در شکل 9 با عنوان محدوده صعود مشخص شده است)، سپس وارد ناحیه کوچک گذار شده (که بیشینه ولتاژ خروجی در این ناحیه قرار دارد) و درنهایت با افزایش فشردگی در اثر اعمال نیروهای بزرگ‌تر خروجی سنسور کاهش می‌یابد (محدوده فرود).

پاسخ همه 27 سنسور ساخته شده تحت این آزمایش به صورت دسته‌بندی‌شده در شکل 10 به نمایش گذاشته شده است. تأثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی در ادامه جداگانه بحث شده است.

الف) اثر تغییر در غلظت پودر

براساس شکل 10 افزایش نسبت ترکیب (*MR*) پودر مغناطیسی در سیلیکون سبب افزایش حساسیت در پاسخ سنسور شده و موجب شیب بیشتر پاسخ هم در ناحیه صعود و هم در ناحیه فرود می‌شود.

ب) اثر تغییر در قطر ناحیه مغناطیسی

تأثیر اساسی قطر ناحیه مغناطیسی به صورتی است که هر چه قطر ناحیه مغناطیسی کوچک‌تر باشد، ورود پاسخ سنسور به محدوده فرود به تأخیر خواهد افتاد. به عبارت دیگر نمونه‌های با قطر ناحیه مغناطیسی کمتر دارای گستره سنجش نیرویی وسیع‌تری با شیب مثبت (محدوده صعود) است.

ج) اثر تغییر در ارتفاع سنسور

ارتفاع کلی سنسور تأثیر قابل توجهی بر حساسیت (شیب) پاسخ و نیز بیشینه گستره نیرویی قابل سنجش در محدوده صعود دارد. نمونه‌های نازک‌تر (سنسورهای با ارتفاع کمتر) حساس‌تر از نمونه‌های بلندتر است، ولی پهنای محدوده صعود در این نمونه‌ها به شدت کاهش می‌یابد و پاسخ زودتر وارد ناحیه فرود می‌شود. می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که سنسورهای با ضخامت ناچیز می‌توانند به‌طورکلی در ناحیه فرود آن‌ها برای اندازه‌گیری نیرو به کار روند و از افزایش جزئی پاسخ در ابتدای اندازه‌گیری‌شان صرف‌نظر کرد.

با توجه به بحث‌های بالا بسته به ویژگی مورد انتظار از سنسور نرم، ممکن است انتخاب نمونه‌ای با یک *D*، *h* و *MR* مشخص مناسب در نظر گرفته شود. برای نمونه در اندازه‌گیری‌های گستره پایین و با حساسیت نسبی بیشتر نمونه‌هایی با ناحیه مغناطیسی غلیظ‌تر (حاوی سهم بیشتری از پودر)، ناحیه مغناطیسی کوچک‌تر (*D* کوچک‌تر) و بدنه ضخیم‌تر (*h* بیشتر) مانند نمونه D5-h10-1:1 مطلوب است. برای کاربردهای متفاوت دیگری مانند اندازه‌گیری نیروهای عمودی نواحی مختلف کف پا بر یک کفی کفش (شکل 11) که بیشتر با نیروهایی در مقیاس بزرگ‌تر سروکار داشته و از طرفی سنجش مؤلفه‌های نیرو باید در ناحیه‌ای نسبتاً نازک انجام گیرد، استفاده از سنسورهای نرم با ارتفاع کم (مثل سری D5) معقول‌تر خواهد بود که این نمونه‌ها همان‌طور که پیشتر دیدیم، تقریباً در محدوده فرود و با گستره نیرویی به نسبت بالایی با شیب ثابت عمل می‌کنند. با توجه به شکل 8 می‌توان تغییر ارتفاع (ضخامت) سنسورها در اثر نیروهای مختلف را مشاهده کرد. در این نمودار با توجه به جابه‌جایی برابر نمونه‌های هم ارتفاع، جابه‌جایی میانگین نمونه‌های با ارتفاع برابر آورده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود چنان‌چه عملکرد سنسور در ناحیه صعودی مطلوب باشد، نمونه‌های با ارتفاع بیشتر و به طبع آن با قابلیت جابه‌جایی زیادتر ناحیه مغناطیسی نسبت به سنسور اثر هال برای این استفاده موفق‌تر خواهند بود. برای نمونه با در نظر گرفتن نمونه‌های سری D5 در شکل 10 و توجه به جابه‌جایی‌های متناظر نیروهای وارده در شکل 8 مشاهده می‌شود که حد نهایی سنجش نیرو در محدوده با شیب مثبت برای نمونه‌های با ارتفاع 10، 7 و 5 میلی‌متر به ترتیب 30، 20 و 10 نیوتون است که می‌توان گفت نمونه‌های با ارتفاع بیشتر که

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.14.4]

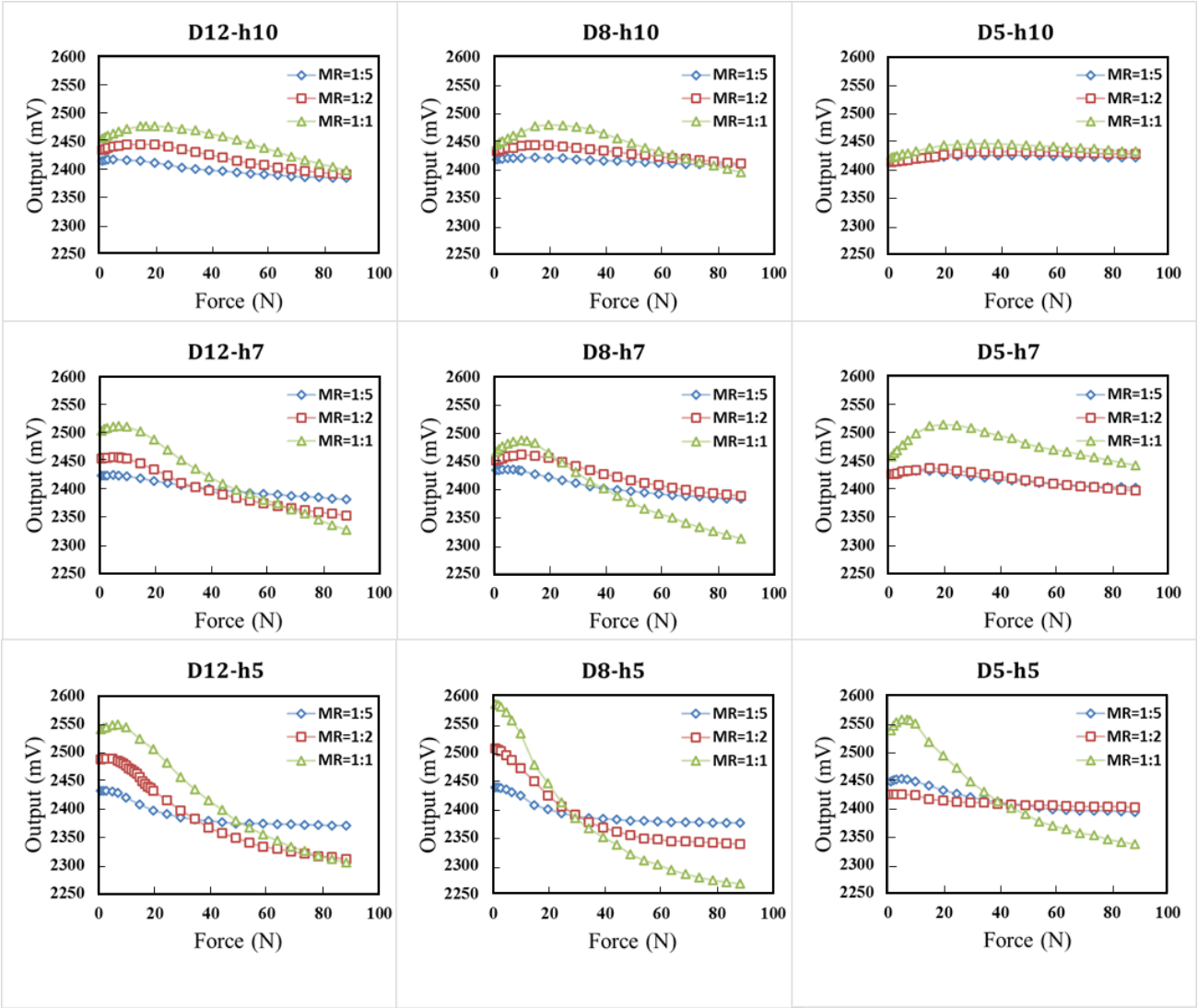

Fig. 10 Output voltage of soft sensor prototypes versus applied normal forces

شکل 10 خروجی ولتاژ نمونه سنسورهای نرم به ازای نیروهای فشاری مختلف اعمالی به آن‌ها

امکان تغییر ارتفاع در آن‌ها بیشتر است در گستره نیرویی وسیع‌تری پاسخ صعودی دارند. برای نمونه در سری D5 جابه‌جایی تا حد نهایی گستره صعودی برای نمونه h10 حدود 3.5 میلی‌متر و برای نمونه h5 تنها در حدود 0.5 میلی‌متر است.

در بررسی دلیل اساسی تفاوت رفتار سنسور در نیروهای بالا و پایین فرضیه‌هایی را می‌توان پایه‌گذاری کرد. یکی از این فرضیه‌ها غلبه اثر قطب دورتر به سنسور هال تحت نیروهای زیاد (فشردگی بیشتر) و دیگری پیچش جزئی لبه‌های سنسور نرم و بیشتر شدن حالت به اصطلاح بشکه‌ای آن در اثر افزایش فشار وارد بر آن است که این پیچش و تغییر زاویه لبه‌های سنسور از حالت صاف ممکن است موجب تغییر در قطب مغناطیسی برایند در مقابل سنسور اثر هال شود. هر چند توجیه اخیر معقول‌تر به نظر می‌آید برای پاسخ قطعی باید بررسی‌های بیشتری صورت گیرد.

5- جمع‌بندی و کارهای آینده

در این مقاله یک سنسور نیروی نرم براساس اثر هال معرفی شد که در ساختار آن از پودر مغناطیسی به جای آهن‌ربای جامد استفاده شد. فرایند طراحی و ساخت این سنسور شرح داده شد و تأثیر پارامترهای مختلف فیزیکی بر خواص نهایی و پاسخ به‌دست‌آمده از سنسور به صورت آزمایش عملی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که تغییر در هر یک از پارامترهای فیزیکی تأثیر ویژه‌ایی در رفتار سنسور یعنی حساسیت و گستره کاری (حد اشباع سنسور) دارد. مطالعات نشان داد که این سنسور می‌تواند به عنوان یک گزینه کارآمد برای کاربردهای مختلف سنجش نیرو در زمینه‌های رباتیک نرم و حسگرهای لمسی که نیازمند سنسورهایی انعطاف‌پذیر، ساده و کم هزینه در نظر گرفته شود. استفاده از پودر مغناطیسی نسبت به آهن‌ربای

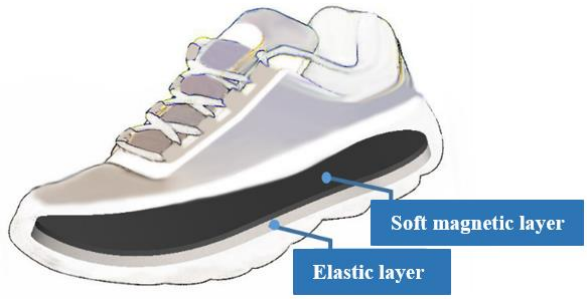

Fig. 11 A smart sensing insole engaging all-around magnetic layer

شکل 11 یک کفی کفش هوشمند که از یک لایه مغناطیسی سرتاسری بهره می‌برد

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.14.4]

جامد از مزایایی برخوردار است. برای نمونه با استفاده از پودر می‌توان لایه‌های مغناطیسی نرم و انعطاف‌پذیری ساخت که به هر شکل دلخواه پیوسته و با هر انحنایی مورد استفاده قرار گیرند. به عنوان یک بررسی موردی این ایده در اندازه‌گیری نیروهای کف پا که باید توسط یک کفی کفش هوشمند انجام گیرد، بسیار مفید خواهد بود. ایده مورد نظر که در واقع کار آینده نویسندگان، به صورت مفهومی در شکل 11 نشان داده شده است. علاوه‌بر این کارهای آتی شامل تلاش‌هایی برای بررسی و بهبود خواص این سنسور با در نظر گرفتن سایر پارامترها مثل تأثیر سفتی سنسور در عملکرد آن خواهد بود. سایر ویژگی‌های سنسور مورد نظر مانند پسماند و پاسخ دینامیکی آن نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

6- فهرست علایم

B	چگالی شار مغناطیسی (T)
D	قطر بخش مغناطیسی (mm)
h	ارتفاع کل سنسور (mm)
MR	نسبت ترکیب پودر با سیلیکون
x	فاصله افقی از مرکز آهن‌ربا (mm)
z	فاصله بین دو آهن‌ربای استوانه‌ای (mm)

7- تقدیر و تشکر

این پروژه طی قرارداد شماره 11/7482 از طرف پژوهشگاه تربیت بدنی پشتیبانی مالی شده است که بدین‌وسیله از پژوهشگاه تربیت بدنی تقدیر و تشکر می‌شود.

8- مراجع

[1] S. Ozel, N. A. Keskin, D. Khea, C. D. Onal, A precise embedded curvature sensor module for soft-bodied robots, *Sensors and Actuators A: Physical*,, Vol. 236, pp. 349-356, 2015.
[2] H. J. Kwon, J. H. Kim, W. C. Choi, Development of a flexible three-axial tactile sensor array for a robotic finger, *Microsyst Technol*, Vol17, No. 12, pp. 1721-1726, 2011.
[3] G. Chatzipirpiridis, P. Erne, O. Ergeneman, S. Pané, B. J. Nelson, A magnetic force sensor on a catheter tip for minimally invasive surgery, *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 37th Annual International Conference of the IEEE*, Milan, Italy, pp. 7970-7973, Aug 25, 2015.
[4] J. H. Low, P. M. Khin, C. H. Yeow, A Pressure-Redistributing Insole using Soft Sensors and Actuator, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* Washington State Convention Center Seattle, Washington, May 26-30, 2015.
[5] M. I. Tiwana, S. J. Redmond, N. H. Lovell, A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 179, pp. 17-31, 2012.
[6] Z. Kappassov, J. A. Corrales, V. Perdereau, Tactile sensing in dexterous robot hands — Review, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 74, pp. 195–220, Dec 31, 2015.
[7] M. Y. Cheng, C. L. Lin, Y. T. Lai, Y. J. Yang, A Polymer-Based Capacitive Sensing Array for Normal and Shear Force Measurement, *Sensors*, Vol. 10, pp. 10211-10225, 2010.
[8] L. Viry, A. Levi , M. Totaro , A. Mondini et al, Flexible Three-Axial Force Sensor for Soft and Highly Sensitive Artificial Touch, *Advanced Materials*, Vol. 26, No. 17, pp. 2610-2610, May, 2014.
[9] L. Beccai, S. Roccella, A. Arena, F. Valvo et al, Design and fabrication of a hybrid silicon three-axial force sensor for biomechanical applications, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 120, pp. 370-382, 2005.
[10] D. M. Vogt, Y. L. Park, R. J. Wood, Design and characterization of a soft multi-axis force sensor using embedded microfluidic channel, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 13, No. 10, October, 2013.
[11] J. T. Muth , D. M. Vogt , R. L. Truby , Y. Menguc et al, Embedded 3D Printing of Strain Sensors within Highly Stretchable Elastomers, *Advanced Materials*, Vol. 26, No. 36, pp. 6307-6312, Sep , 2014.
[12] E. L. White, J. C. Case, R. K. Kramer, Multi-mode strain and curvature sensors for soft robotic applications, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 253, pp. 188–197, 2017.
[13] L. P. Jentoft, Y. Tenzer, D. Vogt, J. Liu et al, Flexible, stretchable tactile arrays from mems barometers, *IEEE 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, Karlsruhe, Germany, Nov 25, 2013.
[14] P. J. Kyberdt, P. H. Chappel, A force sensor for automatic manipulation based on the Hall effect, *Measurement Science and Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 281-287, 1993.
[15] L. Jamone, G. Metta, F. Nori, G. Sandini, James: A Humanoid Robot Acting over an Unstructured World, *6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Genova, Italy, Dec 4, 2006.
[16] C. Ledermann, S. Wirges, D. Oertel, M. Mende et al, Tactile Sensor on a Magnetic Basis using novel 3D Hall sensor- First prototypes and results, *IEEE 17th International Conference on Intelligent Engineering Systems*, Costa Rica, Jun 19-21, 2013.
[17] S. Youssefian, N. Rahba, E. Torres-Jara, Contact behavior of soft spherical tactile sensors, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 14, No. 5, pp. 1435-1442, May, 2014.
[18] D. S. Chathuranga, Z. Wang, Y. Noh, T. Nanayakkara et al, Disposable soft 3 axis force sensor for biomedical applications, *37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Milan, Italy, Aug, 2015.
[19] D. S. Chathuranga, Z. Wang, Y. Noh, T. Nanayakkara et al, Magnetic and mechanical modeling of a soft three-axis force sensor, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, No. 13, July 1, 2016.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.14.4]