



طراحی و ساخت سنسور نیرو/گشتاور شش محوره با استفاده از استرین گیج

محمد رضا طاهرزاده قهفرخی^۱، محمد رضا کرفی^{۲*}

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵، karafi@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق، یک سنسور نیرو/گشتاور شش محوره با استفاده از استرین گیج طراحی و ساخته شده است. ویژگی حداقل بودن کوپلینگ مکانیکی در طراحی این سنسور از اهمیت زیادی برخوردار است که برای این منظور، یک آرایش متشکل از ۲۴ عدد استرین گیج به گونه‌ای انتخاب شده که ولتاژهای خروجی شش پل و تستون متناظر با مؤلفه‌های بارگذاری، از هم مستقل باشند. سنسور ساخته شده، تحت بارگذاری‌های یک و چند مؤلفه‌ای قرار گرفته، خروجی پل‌های و تستون اندازه‌گیری و خطای کوپلینگ محاسبه شده است. میانگین ۷/۳٪ خطای کوپلینگ سنسور، نشان دهنده ویژگی استقلال خروجی‌ها از یکدیگر می‌باشد. فرایند کالیبراسیون طبق استاندارد ANSI1979 انجام شد و مشخصات سنسور محاسبه شده است که کمترین دقت و بیشینه خطای غیر خطی، مربوط به مؤلفه Fx و به ترتیب برابر Fs ۱۴/۷۸٪ و Fs ۶/۴۲٪ است و بیشینه خطای تکرارپذیری، مربوط به مؤلفه Mz و برابر Fs ۹/۶۳٪ می‌باشد. با هدف کاهش تلفات هیستریزس، بارگذاری مستقیم روی سازه انعطاف‌پذیر برای مؤلفه Fz اعمال شده است که در نتیجه، دقت به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و به مقدار ۳/۹۹٪ رسیده و خطاهای غیرخطی بودن و تکرارپذیری کاهش پیدا کرده و به مقدار ۰/۵۲٪ و ۲/۶۰٪ رسیده است.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۲۳ اسفند ۱۴۰۰
داوری اولیه: ۲۶ فروردین ۱۴۰۱
پذیرش: ۷ تیر ۱۴۰۱
کلیدواژگان:
سنسور نیرو/گشتاور شش محوره
استرین گیج
سازه انعطاف‌پذیر
کوپلینگ مکانیکی

Design and fabrication of six axis force/torque sensor using strain gauges

Mohammad Reza Taherzadehghahfarokh, Mohammad Reza Karafi*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, karafi@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 14 March 2022
First Decision: 15 April 2022
Accepted: 28 June 2022

Keywords:

Six-axis Force/Torque Sensor
Strain Gauge
Flexible Structure
Mechanical Coupling

Abstract

In this paper, a six-axis force/torque sensor is designed and fabricated using strain gauge. The characteristic of minimal mechanical coupling or independent output voltages is very important in designing this type of sensors. For this purpose, an arrangement consisting of 24 strain-gauges is used so that the output voltages of the six Wheatstone bridges corresponding to the loading components are independent of each other. Sensor is subjected to single and combined loads, the output of the Wheatstone bridges is measured and coupling error is calculated. An average of 7.3% of coupling error indicates the independence of the outputs from each other. The calibration process was performed according to the ANSI1979 and the sensor specifications were calculated. The minimum accuracy and maximum nonlinearity error are related to Fx loading and equal to 14.78%Fs and 6.42%Fs respectively and the maximum repeatability error related to the Mz loading is equal to 9.63%Fs. In order to reduce hysteresis losses, loading is applied directly to flexible structure for the Fz. As a result, the accuracy has increased significantly to 3.99%Fs and the errors of nonlinearity and repeatability have decreased to 0.52%Fs and 2.60%Fs.

۱- مقدمه

قرار می‌گیرد، می‌تواند مقدار و جهت نیرو/گشتاور اعمالی را اندازه‌گیری کند. بزرگترین مانع برای توسعه این سنسورها وجود کوپلینگ مکانیکی و تأثیرپذیری متقابل خروجی‌های مختلف بارگذاری از یکدیگر است. یکی از طرح‌های متداول برای کاهش اثرات کوپلینگ مکانیکی، استفاده از تیرهای تکیه‌گاهی الاستیک است. در این پژوهش با استفاده از این طرح، یک سنسور نیرو/گشتاور با حداقل کوپلینگ مکانیکی طراحی شده است. برای اندازه‌گیری کرنش‌های ایجاد شده توسط شش مؤلفه

اندازه‌گیری نیرو/گشتاور از طریق اندازه‌گیری کرنش‌های حاصل از بارگذاری روی یک سازه مکانیکی، در بسیاری از سنسورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری کرنش‌های مذکور روش‌های مختلفی به کار گرفته شده است. متداول‌ترین روش، نصب استرین گیج‌ها روی سازه سنسور و چیدمان آنها در قالب پل و تستون است. یک سنسور شش محوره نیرو/گشتاور، وسیله‌ای است که وقتی در محدوده مجاز خود تحت بارگذاری

Please cite this article using:

M. R. Taherzadehghahfarokh, M. R. Karafi, Design and fabrication of six axis force/torque sensor using strain gauges, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 1- 10, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.157663>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بارگذاری، از ۲۴ استرین گیج در قالب شش پل و تستون کامل استفاده شده است. با اعمال بارگذاری روی سازه اصلی سنسور، کرنش در محل نصب استرین گیج‌ها ایجاد شده و در نتیجه مقاومت آنها تغییر می‌کند. تغییر مقاومت استرین گیج‌ها، باعث برهم خوردن تعادل پل‌های و تستون شده و در نتیجه ولتاژ در خروجی پل ایجاد می‌شود. با اندازه‌گیری این خروجی، می‌توان مقدار و جهت بارگذاری در هر راستا را محاسبه کرد.

استفاده از این سنسورها در ربات‌های انسان نما و به طور خاص سنجش نیرو در پا و دست‌های ربات در کارهای تحقیقاتی متنوعی موضوع تحقیق بوده است [۲،۱]. تحقیقات حوزه بیومکانیک، تجهیزات پزشکی و توانبخشی با بحث توسعه این سنسورها همبستگی زیادی دارد [۴،۳]. در حوزه پزشکی، امروزه توسعه ربات‌های جراح موضوع مورد علاقه بسیاری از محققین است چرا که اینگونه ربات‌ها با کاهش خطاهای انسانی درصد موفقیت عمل جراحی را افزایش می‌دهند. از این سنسورها به عنوان گشتاور سنج در ماشین‌های راه‌سازی و در دستگاه‌های پولیش بدنه استفاده می‌شود [۶،۵]. به عنوان حوزه پرکاربرد دیگر می‌توان به صنایع هوا فضا و ربات‌های مورد استفاده در فضا اشاره کرد [۷]. سنجش هرچه دقیق‌تر نیرو بسیار حیاتی است زیرا اشتباه در محاسبه نیرو و یا گشتاور اعمالی می‌تواند منجر به خسارات جبران‌ناپذیری شود. در طراحی سنسورهای ربات‌ها، نوآوری در طراحی سازه انعطاف‌پذیر با هدف ایجاد کرنش یکنواخت و افزایش حساسیت، مورد توجه محققین بوده است که در همین راستا در سال ۲۰۰۳، یک طراحی جدید برای سازه انعطاف‌پذیر بر اساس پلت‌فرم استورات توسط ژنلین و همکاران [۸] توسعه داده شده است. در این پژوهش، پارامترهای سختی انتقالی و سختی پیچشی برای سنسور تعریف و تحلیل شده است که بر اساس آنها یک طرح بهینه برای ساختار سنسور پیدا شده است. در سال ۲۰۰۵، پارک و کیم [۹] یک سنسور شش درجه آزادی را برای یک ربات توسعه دادند که در این سنسور از آرایش صفحات موازی استفاده شده است.

هایاشی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۰، با استفاده از روش المان محدود و با کد نویسی در نرم‌افزار متلب، مقادیر تکینه ماتریس کالیبراسون را به عنوان تابع هدف، با روش‌های بهینه سازی بهبود داده‌اند. سنسور طراحی شده یک سنسور چهار محوره برای استفاده در انگشت ربات بوده است. ما و سونگ [۱۱] در سال ۲۰۱۳ یک حل تحلیلی برای تخمین توزیع کرنش روی تیرهای عرضی یک سنسور شش محوره نیرو/گشتاور ارائه کردند. در این پژوهش برای بارگذاری‌های مختلف، مدل‌های

مکانیکی ارائه شده و در هر مؤلفه از بارگذاری، رابطه بین مؤلفه نیرو، پارامترهای ابعادی سنسور و کرنش‌ها روی تیرهای عرضی بدست آمده است. روش ارائه شده راه را برای طراحی سنسورهای با ساختار مشابه هموار کرده است. کیم و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۶، یک سنسور شش محوره ارزان قیمت برای کاربردهای رباتیک با استفاده از اندازه‌گیرهای خازنی ارائه کردند. در این سنسور از اثر فرینج برای افزایش حساسیت سنسور استفاده شده است. همچنین به دلیل استفاده از خازن به عنوان المان اندازه‌گیری، مونتاژ قطعات محدودیت کمتری دارد و توزیع کرنش تأثیر کمتری بر روی عملکرد سنسور دارد و بنابراین استفاده از مواد با سختی کمتر (در اینجا آلایژ آلومینیوم) ممکن شده است. در سال ۲۰۱۷، وانگ و همکاران [۱۳] با هدف استخراج پارامترهای تأثیر گذار بر توزیع کرنش روی سطح تیرهای الاستیک در ساختار صلیبی، به صورت تحلیلی ساختار سنسور را مورد بررسی قرار داده و فرمول‌های نیرو/کرنش را استخراج کرده‌اند. برای اعتبارسنجی، مدل تحلیلی با خروجی روش اجزاء محدود مقایسه شده است. هوانگ و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۸، با استفاده از المان‌های FBG^۱ یک سنسور شش محوره مقاوم در محیط‌های خشن توسعه دادند. این سنسور نسبت به نویزهای مکانیکی و الکترومغناطیسی مقاوم بوده و بنابراین می‌توان از آن در محیط‌های پر نویز استفاده کرد. برای جبران اثرات دما از تفاضل خروجی FBGها استفاده شده است. این سنسور شامل چهار تیر عرضی الاستیک و چهار تیر تکیه‌گاهی به فرم صفحات فبری است. کبده و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۹، با یک چیدمان جدید به صورت جفتی روی هر سطح مقطع و استفاده از ۳۲ المان استرین گیج و با تکنیک‌های کاهش خطا به صورت سخت‌افزاری، سعی در کاهش اثرات کوپلینگ مکانیکی و افزایش حساسیت سنسور شش درجه آزادی داشته‌اند. ساختار به کار رفته در این سنسور، به صورت صلیبی و صفحات فبری است. پروسه کالیبراسیون با استفاده از تکنیک حداقل مربعات خطا انجام شده است.

۲- تعریف مسأله و معادلات حاکم بر مسأله

در این پژوهش یک طرح صلیبی برای سازه انعطاف‌پذیر مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده که سازه نسبت به محورهای x و y متقارن است. شماره ۱ نشان دهنده تیر عرضی الاستیک، شماره ۲، هاب مرکزی است که بارگذاری خارجی از طریق آن به

^۱ Fibre Bragg Grating

۲-۱- رابطه کرنش‌ها و مؤلفه‌های بارگذاری

در مراجع [۱۳، ۱۱]، روابط بین مؤلفه‌های بارگذاری و کرنش‌های روی تیرهای عرضی با حل معادله تیر تیموشنکو بدست آمده است. در اینجا با ترکیب روابط مذکور با معادلات حاکم بر پل و تستون، ارتباط بین مؤلفه‌های بارگذاری و ولتاژهای خروجی بدست آمده است. ارتباط بین مؤلفه‌های بارگذاری و کرنش روی تیرهای عرضی الاستیک به صورت روابط (۱) تا (۴) است که میزان حساسیت سنسور به هر یک از پارامترها تشخیص داده شده و در طراحی سازه انعطاف‌پذیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\varepsilon_{Fx(y)} = \frac{zNF_{x(y)}(c-x)}{EI_{Ax}(4M+2N)}$$

$$N = \frac{e}{2\kappa GA_{Gx}} + \frac{e^3}{96EI_{Gx}}; A_{Gx} = df; I_{Gx} = \frac{f^3 d}{12}$$

$$M = \frac{c}{\kappa GA_{Ax}} + \frac{c^3}{12EI_{Ax}}; A_{Ax} = ab; I_{Ax} = \frac{a^3 b}{12} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{Fz} = \frac{zF_z(c-x)}{4EI_{Az}} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{Mx(y)} = \frac{z(c-x)c\left(c+\frac{g}{2}\right)M_{x(y)}}{EI_{Ax}\left(GI_{AMx}(2P)+Q+2c\left(c+\frac{g}{2}\right)^2\right)}$$

$$P = \frac{c}{\kappa GA_{AZ}} + \frac{c^3}{3EI_{AZ}}$$

$$Q = \frac{c}{2\kappa GA_{EZ}} + \frac{c^3}{96EI_{EZ}} \quad (3)$$

$$I_{AMx} = 0.141a^3 b \quad (4)$$

$$\varepsilon_{Mz} = \frac{zM_z(c-x)}{(4c+2g)EI_{Az}} \quad (4)$$

پارامترهای هندسی به کار رفته در فرمول‌های (۱) تا (۴) در شکل ۳ مشخص شده‌اند. در روابط (۱) و (۳)، ضریب κ ضریب شکل برشی^۱، x فاصله نقاط روی تیرهای عرضی از هاب مرکزی، E مدول یانگ، A_{ij} مساحت مقطع تیرهای عرضی، G مدول یانگ، I_{ij} ممان اینرسی دوم سطح مقطع تیرهای عرضی هستند.

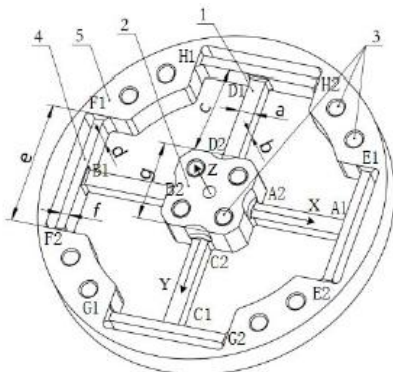


Fig. 3 Used geometric parameters in (1-4) equations [13]

شکل ۳ پارامترهای هندسی مورد استفاده در روابط (۱-۴) [۱۳]

¹ Shearing-shape coefficient

تیرهای الاستیک منتقل می‌شود. شماره ۳، سوراخ پیچ‌های مونتاژ سنسور و شماره ۴، تیرهای تکیه‌گاهی هستند که به توزیع مناسب تنش روی تیرهای عرضی الاستیک کمک می‌کنند.

شکل ۲، آرایش ۲۴ عدد استرین گیج به کار رفته در این ساختار را نشان می‌دهد که این استرین گیج‌ها با هدف جبران اثرات دما در قالب شش پل و تستون کامل قرار داده شده‌اند.

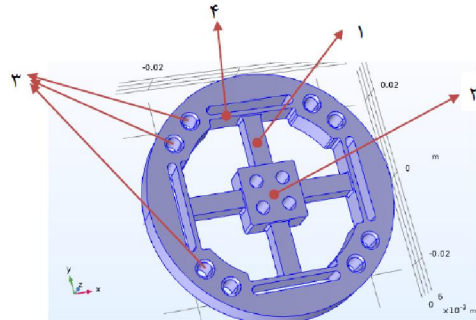


Fig. 1 Used structure in current project

شکل ۱ سازه مورد استفاده در پژوهش حاضر

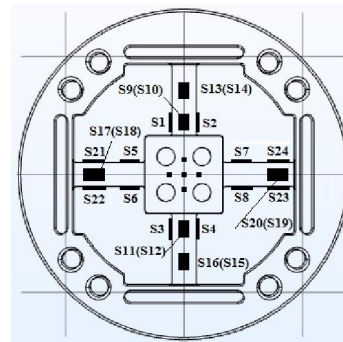


Fig. 2 Strain-gauge arrangement on cross beams

شکل ۲ آرایش استرین گیج‌ها روی تیرهای عرضی

از ۲۴ کرنش سنج به کار رفته شده، S1، S2، S3 و S4 برای محاسبه F_x ؛ S5، S6، S7 و S8 برای F_y ؛ S9، S10، S11 و S12 برای F_z ؛ S13، S14، S15 و S16 برای M_x ؛ S17، S18، S19 و S20 برای M_y ؛ S21، S22، S23 و S24 برای اندازه‌گیری M_z در نظر گرفته شده است.

فولاد ضد زنگ ۳۰۴ به دلایل مقاومت در برابر خوردگی و دما، استحکام بالا در دمای پایین و حد دوام بالا برای سازه انعطاف‌پذیر استفاده شده است. در پژوهش حاضر، مدول یانگ 193GPa، ضریب پواسون $\nu = 0.31$ و حد تسلیم ۲۰۵MPa در نظر گرفته شده است علاوه بر این استرین گیج‌های نصب شده دارای ابعاد ۳ mm × ۲ mm بوده و برای نصب آنها روی سطح تیرها از چسب مخصوص استرین گیج استفاده شده است.

۲-۲- رابطه ولتاژ خروجی و مؤلفه‌های بارگذاری

رابطه ۵، ارتباط بین کرنش‌های اندازه‌گیری شده توسط استرین-گیج‌ها و ولتاژ خروجی پل و تستون را نشان می‌دهد. در این رابطه gf حساسیت تغییر مقاومت استرین گیج با اعمال کرنش را نشان می‌دهد.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{gf}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، V_o ولتاژ خروجی و V_s ولتاژ تغذیه و ε_{1-4} کرنش‌های اندازه‌گیری شده توسط استرین‌گیج‌های یک پل و تستون کامل^۲ است.

با ترکیب رابطه (۵) و روابط (۱-۴)، ارتباط ولتاژ خروجی پل و تستون و مؤلفه‌های بارگذاری بدست آورده شده است.

$$\frac{V_o}{V_s} = gf \cdot \frac{NF_{x(y)} \cdot 0.56}{EI_{Ax}(4M + 2N)} \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{c}{3} \quad (6)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{gf \cdot F_z \cdot c}{Eab^2} \quad (7)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = gf \cdot \frac{\frac{b}{2} \cdot \frac{c^2}{3} \left(c + \frac{g}{2} \right) M_{x(y)}}{EI_{Ax} \left[GI_{AMx}(2P + Q) + 2c \left(c + \frac{g}{2} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = gf \cdot \frac{4cM_z}{(4c + 2g)Eab^2} \quad (9)$$

با استفاده از روابط (۶) تا (۹)، مقدار تأثیر ولتاژ خروجی پل‌های و تستون متناظر با مؤلفه‌های مختلف بارگذاری، از هر یک از پارامترهای طراحی سازه سنسور، مشخص می‌شود. شکل-های ۴ تا ۷، چگونگی تغییرات ولتاژهای خروجی را به ازای پارامترهای ابعادی سنسور نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل ۴ پیداست، با افزایش طول تیرهای عرضی و تکیه‌گاهی، سختی سیستم کاهش و در نتیجه کرنش و ولتاژ خروجی افزایش یافته است، همچنین افزایش ابعاد سطح مقطع تیرهای عرضی و تکیه‌گاهی هم مطابق انتظار باعث افت ولتاژ خروجی پل‌های و تستون شده است. از بین پارامترهای تأثیرگذار بر ولتاژ خروجی پل و تستون، ابعاد سطح مقطع تیرهای عرضی، بیشترین تأثیر را بر حساسیت سنسور به مؤلفه بارگذاری دارد. با توجه به نمودار شکل ۴، اندازه کمتر از ۴ میلی‌متر برای ابعاد سطح مقطع تیرهای عرضی (پارامترهای a و b) و کمتر از ۲ میلی‌متر برای ابعاد سطح مقطع تیرهای تکیه‌گاهی (پارامترهای d و f)، بیشترین حساسیت سنسور را برای این مؤلفه دارد.

همچنین با افزایش طول تیرهای عرضی و تکیه‌گاهی به بیش از ۱۲ میلی‌متر، روند افزایشی ولتاژ خروجی کاهش یافته و عملاً افزایش طول تیرهای تکیه‌گاهی بیش از این مقدار، باعث افزایش ابعاد سنسور، افزایش لختی سیستم و در نتیجه افزایش زمان

نشست در پاسخ سیستم به مؤلفه‌های بارگذاری می‌گردد. با تحلیل مشابه آنچه برای مؤلفه F_x و F_y گفته شد، نمودارهای ۵، ۶ و ۷ تحلیل شده و نتایج این تحلیل در قالب جدول ۱ آورده شده است.

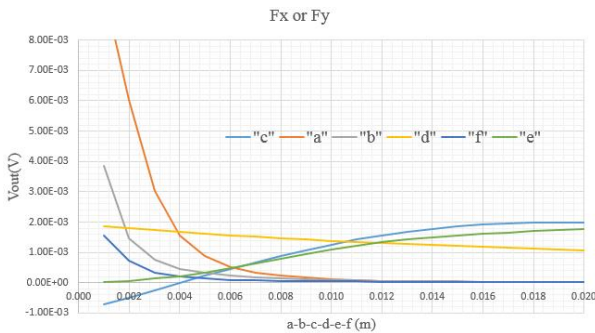


Fig. 4 Output voltage variations Vs different parameters for F_x or F_y شکل ۴ تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب پارامترهای مختلف برای مؤلفه F_x یا F_y

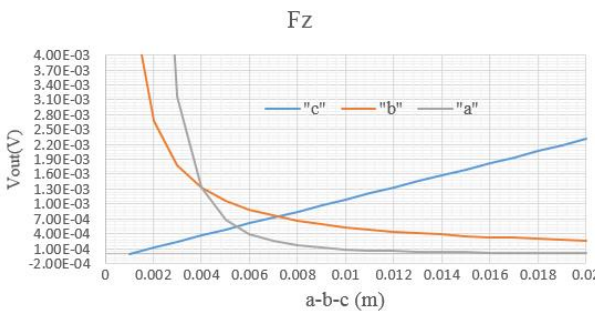


Fig. 5 Output voltage variations Vs different parameters for F_z شکل ۵ تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب پارامترهای مختلف برای مؤلفه F_z

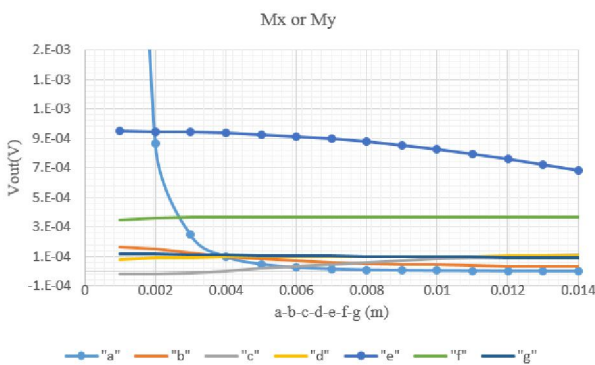


Fig. 6 Output voltage variations Vs different parameters for M_x or M_y شکل ۶ تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب پارامترهای مختلف برای مؤلفه M_x یا M_y

با در نظر گرفتن ملاحظات می‌توان گفت کوچکترین استرین گیج قابل تهیه در بازار داخلی و همچنین کوچک بودن ابعاد سنسور برای استفاده در ربات‌های توان‌بخشی، محدوده ابعاد سنسور مشخص شده و برای یافتن کمترین خطای کوپلینگ در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده است.

¹ Gauge factor

² Full Wheatstone bridge

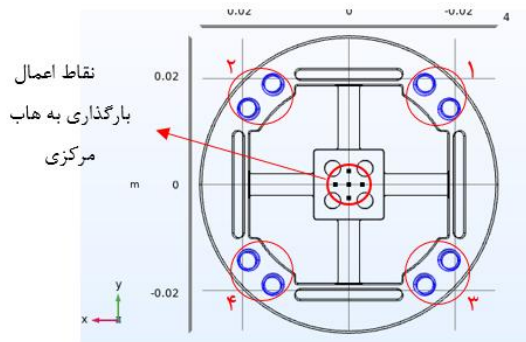


Fig. 8 Loading points on flexible structure

شکل ۸ نقاط اعمال بارگذاری روی سازه انعطاف پذیر

جدول ۲ خطای کوپلینگ بدست آمده از شبیه سازی

Table 2 Obtained coupling error from simulation

مؤلفه های بارگذاری	Fx	Fy & Fz	Fy&Fz&Mx
نسبت بیشترین ولتاژ ناخواسته به کمترین ولتاژ مطلوب (%)	۰/۱	۰/۰۵	۰/۳

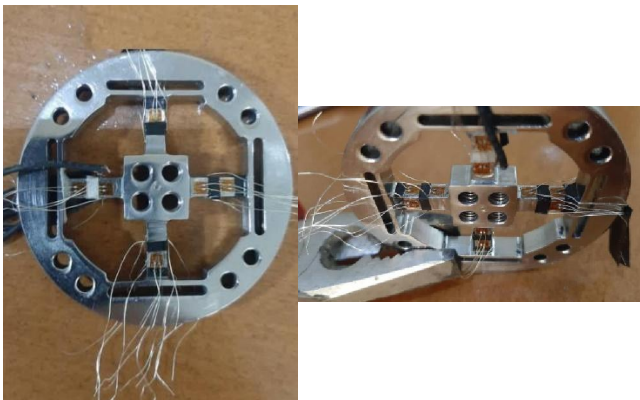


Fig. 9 Manufactured flexible structure

شکل ۹ سازه انعطاف پذیر ساخته شده



Fig. 10 Strain-gauges connection to the PCB

شکل ۱۰ اتصال استرین گیج ها به برد چاپی

۴- کالیبراسیون سنسور

آزمون کالیبراسیون سنسور مطابق با استاندارد ANSI 1979 انجام شده است. طبق این استاندارد طی چند سیکل متوالی، مقادیر مشخصی از بارگذاری روی سنسور به صورت مؤلفه های خالص اعمال شده و برداشته می شود. مشخصات مهم سنسور

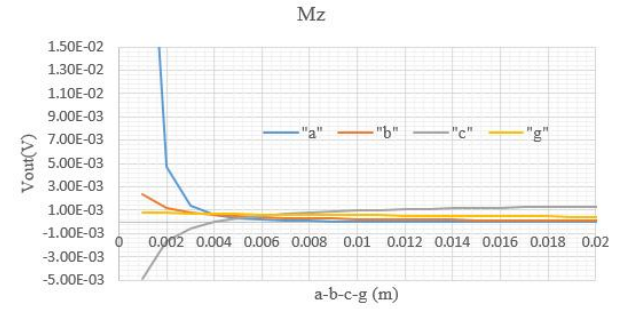


Fig. 7 Output voltage variations Vs different parameters for Mz

شکل ۷ تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب پارامترهای مختلف برای مؤلفه Mz

جدول ۱ ابعاد مورد نیاز برای دستیابی به حداکثر حساسیت سنسور

Table 1 Dimensions required to achieve maximum sensor sensitivity

	a	b	c	d	e	f	g
Fx or Fy	۴>	۴>	۱۲< ۱۴>	۲>	۱۲< ۱۴>	۲>	-
Fz	۴>	۴>	Not Limited	-	-	-	-
Mx or My	۳>	۳>	۱۰< ۱۲>	Not Limited	۸>	Not Limited	Not Limited
Mz	۳>	۳>	۱۰< ۱۲>	-	-	-	Not Limited

۳- شبیه سازی و ساخت سنسور

برای بررسی عملکرد سنسور، بارگذاری ترکیبی روی سازه انعطاف پذیر در نرم افزار کامسول شبیه سازی شده که برای این منظور، موقعیت های ۱ تا ۴ در شکل ۸ ثابت در نظر گرفته شده اند و مؤلفه های بارگذاری به نقاط مشخص شده در مرکز هاب، وارد شده اند.

برای بررسی استقلال خروجی ها از یکدیگر، سنسور تحت بارگذاری ترکیبی در نرم افزار COMSOL شبیه سازی شده و خطای کوپلینگ (نسبت خروجی نامطلوب به خروجی مطلوب) برای تعدادی از این شبیه سازی ها در جدول ۲ آورده شده است.

نتایج شبیه سازی بارگذاری های ترکیبی، نشان دهنده ایزوله بودن خروجی پل های وتستون از یکدیگر است که ویژگی مورد انتظار از یک سنسور با خروجی های مستقل می باشد.

پس از اطمینان از عملکرد مطلوب سنسور، اجزاء سنسور و همچنین مکانیزم اعمال بارگذاری ساخته شده اند. شکل ۹ سازه انعطاف پذیر ساخته شده را نشان می دهد.

میزان تأثیر هریک از پارامترهای ابعادی، ضریب شکل، ضریب پواسون، مدول یانگ و مدول برشی بر ولتاژ خروجی، از روابط (۶) تا (۹) قابل محاسبه است.

شکل ۱۰، نحوه اتصال برد چاپی مربوط به شش پل وتستون مربوط به مؤلفه های بارگذاری و استرین گیج های نصب شده روی سازه انعطاف پذیر را نشان می دهد.

برابر ۱/۱، ۱/۱، ۱/۱، ۱/۱، ۱/۲ و ۱/۱ است.

در ادامه فرایند کالیبراسیون، تمامی ولتاژهای اندازه‌گیری شده مندرج در جدول ۲ روی یک نمودار ترسیم شده و با روش حداقل مربعات، معادله بهترین خط قابل برازش روی داده‌ها بدست آمده است (شکل ۱۱).

رابطه مقدار بارگذاری بر حسب kg و خروجی پل وتستون مربوط به بارگذاری Fz در معادله (۴) ذکر شده است.

$$V_{OUT}(mV) = 0.1141 \cdot Load(Kg) \quad (10)$$

با استفاده از رابطه (۱۰)، مقادیر ولتاژ تخمین زده شده توسط خط برازش شده روی داده‌ها، بدست آورده شده و در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۴ ولتاژهای خروجی پل‌های وتستون در بارگذاری Fz خالص (mV)
Table 4 Wheatstone bridge output voltages in pure Fz loading(mV)

Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۹۸	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱

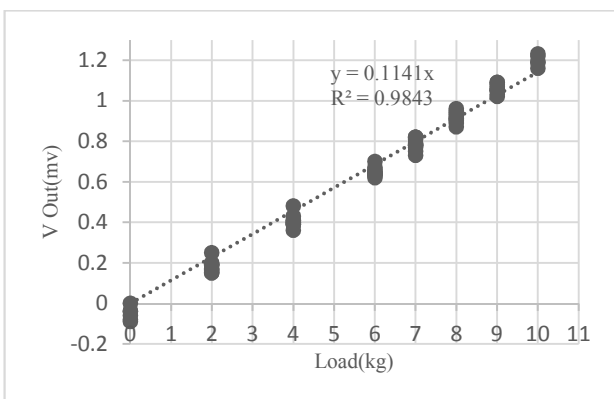


Fig. 11 Fitting curve on Fz loading outputs

شکل ۱۱ منحنی برازش شده روی خروجی‌های بارگذاری Fz

جدول ۵ ولتاژهای برآورد شده توسط خط برازش شده روی خروجی‌های (mV)Fz
Table 5 Estimated voltages by curve fitting on Fz outputs(mV)

Load(Kg)	۲	۴	۶	۷	۸	۹	۱۰
Vout(mV)	۰/۲۳	۰/۴۶	۰/۶۸	۰/۸۰	۰/۹۱	۱/۰۳	۱/۱۴

برای محاسبه صحت سنسور، اختلاف ولتاژهای برآورد شده در جدول ۵ از مقادیر اندازه‌گیری شده جدول ۳ محاسبه شده و در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. محدوده صحت سنسور، بازه بین کوچکترین و بزرگترین انحراف داده است (در اینجا از یکی از داده‌ها صرف نظر شده که در تحلیل‌های آماری قابل صرف نظر می‌باشد). در این سنسور این مقدار برابر $\pm 0.09mV$ معادل $\pm 0.78kg$ است، لذا طبق تعریف، صحت سنسور به صورت رابطه

نظیر دقت، صحت، خطاهای غیر خطی بودن، هیستریزیس و سیستماتیک به کمک ولتاژهای اندازه‌گیری شده طی این آزمون محاسبه شد. در ادامه برای هر یک از مؤلفه‌های بارگذاری، آزمون کالیبراسیون به صورت مجزا با اعمال پلکانی وزنه‌ها تا ۸۰٪ مقدار بیشینه قابل تحمل توسط سنسور و سپس برداشتن وزنه‌ها تا مقدار صفر انجام و نتایج گزارش شده است. لازم به ذکر است در تمامی مراحل آزمون از منبع تغذیه DC با ولتاژ خروجی ثابت ۵/۱۵V استفاده شده است.

۴-۱- کالیبراسیون برای مؤلفه Fz

در ادامه، مراحل کالیبراسیون برای مؤلفه Fz به تفصیل بیان شده است و برای سایر مؤلفه‌های بارگذاری به ذکر نتایج اکتفا شده است. بارگذاری به صورت افزایش پلکانی تا میزان ۱۰۰N انجام شده و سپس با همان ترتیب، وزنه‌ها تا مقدار صفر کاهش داده شده است. این کار برای پنج سیکل انجام شده و نتایج در جدول ۳ آورده شده است.

در اینجا مسأله مستقل بودن خروجی‌های سنسور به صورت تجربی تحقیق شده و نتایج در جدول ۴ آورده شده است. مقادیر مندرج در این جدول، در حالت حداکثر بارگذاری ثبت شده است.

جدول ۳ ولتاژهای خروجی پل وتستون Fz در آزمون کالیبراسیون (mV)
Table 3 Fz wheatstone bridge output voltages in calibration test(mV)

مقدار وزنه (Kg)	سیکل اول	سیکل دوم	سیکل سوم	سیکل چهارم	سیکل پنجم
۲	۰/۲۵	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۱۷
۴	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۳۹	۰/۴۱	۰/۴۱
۶	۰/۷۰	۰/۶۳	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۶۵
۷	۰/۸۱	۰/۷۳	۰/۷۵	۰/۷۸	۰/۷۸
۸	۰/۸۵	۰/۸۷	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۹۲
۹	۱/۰۹	۱/۰۲	۱/۰۵	۱/۰۶	۱/۰۵
۱۰	۱/۲۳	۱/۱۶	۱/۱۹	۱/۲۲	۱/۱۹
۹	۱/۰۹	۱/۰۳	۱/۰۵	۱/۰۸	۱/۰۷
۸	۰/۹۶	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۹۳
۷	۰/۸۲	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۷۹	۰/۸۲
۶	۰/۶۶	۰/۶۲	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۶۷
۴	۰/۴۰	۰/۳۹	۰/۴۰	۰/۳۶	۰/۳۹
۲	۰/۱۷	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۱۹

مقادیر مندرج در جدول ۴، مستقل بودن خروجی پل‌ها را نشان می‌دهد. با تعریف خطای کوپلینگ به صورت نسبت بیشترین مقدار سیگنال نامطلوب به سیگنال مطلوب، خطای کوپلینگ برای مؤلفه‌های Fx، Fy، Mx، My و Mz به ترتیب

(۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\frac{\text{Max. of Deviation}}{V_{\text{Out Limit}}} = \frac{0.09}{1.14 - 0.23} = \frac{0.09}{0.91} = 9.86\% FS \quad (11)$$

نمودار میانگین انحراف بالا رونده و پایین رونده بر حسب مقدار بارگذاری در شکل ۱۳ نشان داده شده است. از این نمودار برای محاسبه خطای غیرخطی بودن سنسور استفاده می‌شود که با توجه به این شکل به صورت رابطه (۱۲) محاسبه شده است.

$$\frac{0.057}{1.14 - 0.23} = 6.24\% FS \quad (12)$$

برای محاسبه خطای تکرارپذیری مقدار انحراف از معیار اختلاف ولتاژهای اندازه‌گیری شده از مقادیر برآورد شده، محاسبه شده است. بیشینه مقدار انحراف از معیار در هنگام باربرداری وزنه ۲ کیلوگرمی به میزان ۰/۳۴۹۲ میلی ولت است لذا خطای تکرارپذیری به صورت رابطه ۱۳، از تقسیم بیشترین مقدار انحراف از معیار بر محدوده ولتاژ خروجی (طبق جدول ۴) محاسبه می‌شود.

$$\frac{\text{Max. of standard deviation}}{V_{\text{Out Limit}}} = \frac{0.034928}{1.14 - 0.23} = 3.83\% FS \quad (13)$$

خطای هیستریزیس به صورت بیشترین اختلاف داده سیکل بالارونده از سیکل پایین رونده تعریف می‌شود. بیشترین اختلاف داده سیکل بالارونده از سیکل پایین رونده در سیکل اول برای وزنه ۴ کیلوگرمی وجود دارد و برابر ۰/۰۸ میلی ولت است، بنابراین خطای هیستریزیس طبق رابطه (۱۴)، از تقسیم این مقدار بر محدوده ولتاژ خروجی محاسبه می‌شود.

$$\frac{0.08}{1.14 - 0.23} = 8.76\% FS \quad (14)$$

بازه خطای سیستماتیک سنسور از بیشترین و کمترین مقادیر میانگین سیکل‌ها به دست می‌آید. برای مؤلفه Fz این بازه برابر رابطه ۱۵ است.

$$\frac{0.057}{1.14 - 0.23} = 6.24\% FS$$

$$\left| \frac{-0.0684}{1.14 - 0.23} \right| = 7.49\% FS \quad (15)$$

۲-۴- خلاصه نتایج کالیبراسیون مؤلفه‌های F_x ، F_y ، M_x ، M_y و M_z

فرایند کالیبراسیون مطابق آنچه در قسمت قبل توضیح داده شد، برای سایر مؤلفه‌های بارگذاری انجام شده و نتایج این کالیبراسیون در این قسمت عنوان شده است.

در جدول ۶، خطای کوپلینگ سنسور به ازای هر شش مؤلفه بارگذاری محاسبه شده و بیشترین خطای کوپلینگ در بارگذاری M_y و مربوط به خروجی F_x است. به عنوان یک معیار، میانگین خطای کوپلینگ سنسور برابر ۷/۳٪ است.

صحت، خطای غیرخطی بودن، تکرارپذیری، خطای هیستریزیس و خطای سیستماتیک برای تمامی مؤلفه‌های بارگذاری با استفاده از خروجی‌های بدست آمده از فرایند کالیبراسیون، محاسبه و در جدول ۷ آورده شده است. از بین مشخصات مندرج در جدول ۷، صحت کمترین و هیستریزیس بیشترین مقدار را داراست.

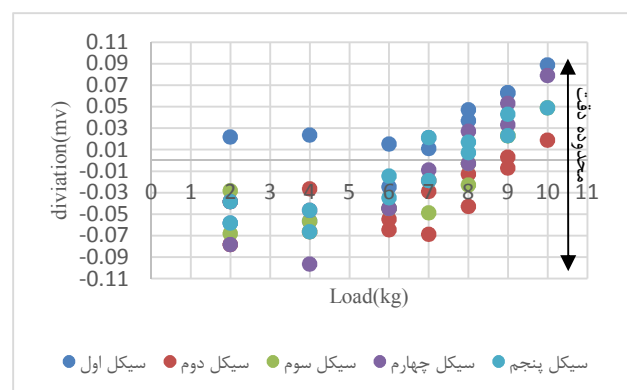


Fig. 12 Outputs voltages difference from fitting voltages according to Fz loading amount

شکل ۱۲ اختلاف ولتاژهای خروجی از ولتاژهای برآزش شده بر حسب مقدار بارگذاری Fz

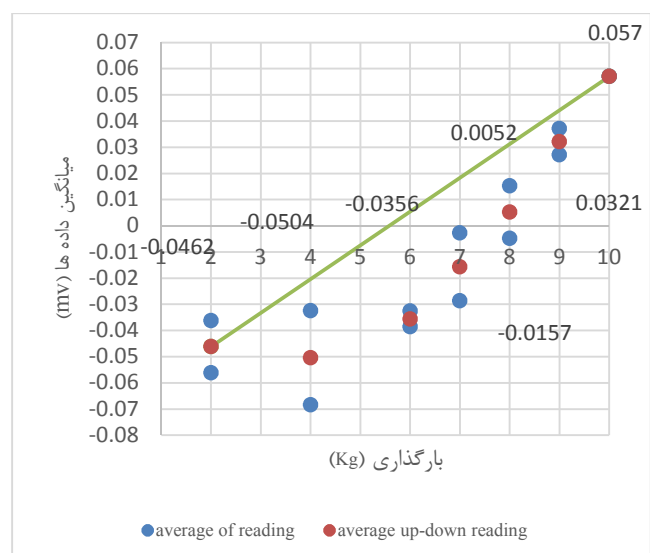


Fig. 13 Graph of average data difference in up-down reading cycle based on amount of applied weight in Fz loading

شکل ۱۳ نمودار میانگین اختلاف داده‌ها در سیکل بالا رونده و پایین رونده بر حسب مقدار وزنه اعمال شده در بارگذاری Fz

اجمال همزمان چند مؤلفه انجام شده که به عنوان نمونه، در جدول ۹، ولتاژهای اندازه‌گیری شده از اعمال همزمان پنج مؤلفه بارگذاری به سنسور آورده شده است. در جدول ۹ مقادیر سطر بالایی، ولتاژهای اندازه‌گیری شده و مقادیر سطر پایینی، ولتاژهای برآورد شده از خط برازش هستند. بیشترین اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده از خط برازش شده مربوط به مؤلفه M_y و برابر $9\% \cdot F_s$ است که نشان دهنده وجود خروجی‌های مستقل از هم در شرایط بارگذاری ترکیبی است.



Fig. 14 Integrated connection of pillar and flexible structure
شکل ۱۴ اتصال یکپارچه ستون اعمال بارگذاری و سازه انعطاف‌پذیر

جدول ۸ مشخصات سنسور پس از اعمال مستقیم بارگذاری برای مؤلفه F_z (بر حسب $\%F_s$)

سیستماتیک	هیستریزیس	تکرارپذیری	غیر خطی بودن	صحت	بارگذاری
۱/۷۲	۳/۹۹	۲/۶۰	۰/۵۲	۳/۹۹	F_z

جدول ۹ مقایسه مقادیر ولتاژ اندازه‌گیری شده و ولتاژ محاسبه شده از منحنی کالیبراسیون (F_z & F_x & M_y & M_x & M_z)

مقدار بارگذاری	ولتاژ اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از منحنی کالیبراسیون					
	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
$M_x(N.m)$	۰/۷۲					
$M_y(N.m)$	۰/۳۶					
$F_x(N)$	۲۰	۰/۱۹	۰/۰۳	۰/۲۴	۰/۳۱	۰/۰۹
$F_z(N)$	۲۰	۰/۱۵	۰/۰۰	۰/۲۳	۰/۳۱	۰/۱۲
$M_z(N.m)$	۱/۰۴					

۵- اندازه‌گیری زمان نشست در پاسخ به ورودی پله

برای اندازه‌گیری زمان لازم برای رسیدن به مقدار نهایی (زمان نشست) ولتاژ خروجی مربوط به یک بارگذاری خاص، بارگذاری

جدول ۶ جمع‌بندی خطای کوپلینگ سنسور

Table 6 Sensor coupling error						
در صد خطای کوپلینگ						
مؤلفه‌های بارگذاری	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
F_x	-	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۴
F_y	۱/۳	-	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۴
F_z	۱	۱	-	۱	۲	۱
M_x	۱۰	۱۰	۹	-	۱۰	۷/۲
M_y	۱۷	۴/۳	۱۷	۰/۰	-	۱۳
M_z	۱۲	۲/۴	۰/۰	۴/۸	۱۲	-

جدول ۷ جمع‌بندی مشخصات سنسور (بر حسب $\%F_s$)

Table 7 Sensor specifications($\%F_s$)					
سیستماتیک	هیستریزیس	تکرارپذیری	غیر خطی بودن	صحت	بارگذاری
۹/۳۱	۱۶/۴۳	۷/۳۹	۶/۴۲	۱۴/۷۸	F_x
۹/۲۳	۱۶/۶۳	۶/۴۵	۶	۱۴/۷۸	F_y
۷/۴۹	۸/۷۶	۳/۸۳	۶/۲۴	۹/۸۶	F_z
۷/۷۰	۱۹/۷۸	۶/۶۸	۳/۲۸	۱۲/۳۶	M_x
۶/۴۸	۱۵/۰۵	۸/۶۷	۲/۹۴	۱۲/۰۴	M_y
۵/۷۹	۱۴/۵۶	۹/۶۳	۴/۷۵	۱۴/۵۶	M_z

صحت ترکیبی از خطاهای غیرخطی بودن و هیستریزیس است و از آنجا که سنسور رفتار خطی قابل قبولی دارد، بنابراین اتلافات هیستریزیس باعث کاهش صحت سنسور شده است. با توجه به اینکه سازه انعطاف‌پذیر به صورت یکپارچه ساخته شده بنابراین تلفات هیستریزیس ناشی از اتصال پیچی ستون اعمال بارگذاری به سازه انعطاف‌پذیر است. این اتصال در بارگذاری F_z حذف، بار به صورت مستقیم روی سازه انعطاف‌پذیر اعمال شده و مراحل کالیبراسیون انجام و خروجی‌های اندازه‌گیری شده است. نتایج در جدول ۸ آورده شده است. شکل ۱۴، ستون اعمال بارگذاری، سازه انعطاف‌پذیر و اتصال آنها به یکدیگر را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از مقادیر جدول ۸ مشخص است، صحت به مقدار قابل قبولی افزایش داشته و خطاهای هیستریزیس، غیرخطی بودن، سیستماتیک و تکرارپذیری به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داشته است.

۳-۴- ارزیابی رفتار سنسور تحت بارگذاری ترکیبی

پس از بدست آوردن پیشینه بارگذاری مجاز با شبیه‌سازی در COMSOL، در چند مرحله بارگذاری روی سنسور به صورت

و باربرداری به صورت متوالی طی چهار مرحله انجام شده است. در هر مرحله زمان رسیدن به خروجی نهایی اندازه گیری شده است. نتایج در جدول ۱۰ آورده شده است.

جدول ۱۰ زمان لازم برای رسیدن به پاسخ نهایی (ثانیه)

Table 10 Time required to reach final response (second)

میانگین	مرتبه چهارم	مرتبه سوم	مرتبه دوم	مرتبه اول
۰/۹۷	۱/۰۱	۰/۹۱	۱/۰۶	۰/۸۹

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، یک سنسور شش محوره با استفاده از استرین گیج برای کاربردهای حوزه رباتیک توسعه داده شده است. یک طرح صلیبی برای سازه انعطاف پذیر در نظر گرفته شده که سازه نسبت به محورهای x و y متقارن است. این طرح به دلیل سادگی پروسه ساخت و اتلافات کم هیستریزیس که حاصل از ساخت یکپارچه سازه است، نسبت به طرح های مورد استفاده در پژوهش های پیشین انتخاب شده است. برای ساخت این سازه از فولاد ضد زنگ ۳۰۴ به دلایل مقاومت در برابر خوردگی، استحکام بالا در دمای پایین و حد دوام بالا استفاده شده است.

برای بررسی عملکرد سنسور، بارگذاری ترکیبی روی سازه انعطاف پذیر در نرم افزار کامسول شبیه سازی شده و خطای کوپلینگ (نسبت خروجی نامطلوب به خروجی مطلوب) از این شبیه سازی ها محاسبه شده که نتایج نشان دهنده ایزوله بودن خروجی پل های وتستون از یکدیگر است. پس از اطمینان از عملکرد مطلوب سنسور، اجزاء سنسور و همچنین مکانیزم اعمال بارگذاری ساخته شده اند. سنسور با استفاده از استاندارد ANSI1979 کالیبره شده است. مشخصات مهم سنسور نظیر دقت، صحت، خطاهای غیر خطی بودن، هیستریزیس و سیستماتیک به کمک ولتاژهای اندازه گیری شده طی این آزمون محاسبه شد. نتایج نشان دهنده رفتار خطی سنسور در محدوده اندازه گیری است. سنسور ساخته شده با میانگین خطای کوپلینگ $3/7\%$ ، خروجی های مستقل از هم را مطابق با نتایج شبیه سازی نشان می دهد. عملکرد سنسور با اعمال مستقیم بارگذاری مورد ارزیابی قرار گرفته است و به عنوان نتیجه، با حذف اتصالات پیچی، تلفات هیستریزیس کاهش و صحت سنسور افزایش یافت. همچنین سنسور ساخته شده تحت بارگذاری ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج استقلال خروجی ها در شرایط بارگذاری ترکیبی را نشان داد.

۷- فهرست علائم

E	مدول یانگ (GPa)
G	مدول برشی (GPa)
V	ولتاژ
gf	گیج فاکتور
I	ممان اینرسی دوم سطح مقطع تیر
A	مساحت سطح مقطع تیر
c	طول تیر عرضی
a	عرض سطح مقطع تیر عرضی
b	طول سطح مقطع تیر عرضی
g	طول هاب مرکزی
e	طول تیر تکیه گاهی
d	طول سطح مقطع تیر تکیه گاهی
f	عرض سطح مقطع تیر تکیه گاهی

علائم یونانی

ε	کرنش
κ	ضریب شکل برشی
ν	ضریب پواسون

زیر نویس ها

out خروجی

۸- مراجع

- [1] G. S. Kim, H. J. Shin, J. W. Yoon, Development of 6-axis force/moment sensor for humanoid robot's intelligent foot, *Sensor and Actuators A*, Vol. 141, No. 2, pp. 276-281, 2008.
- [2] C. Yuan, L. P. Luo, Q. Yuan, J. Wu, R. J. Yan, H. Kim, K. S. Shin, C. S. Han, Development and evaluation of a compact 6-axis force moment sensor with a serial structure for the humanoid robot foot, *Measurement*, Vol. 70, pp. 110-122, 2015.
- [3] C. Jacq, B. Lüthi, Th. Maeder, O. Lambercy, R. Gassert, P. Ryser, Thick-film multi-DOF force/torque sensor for wrist rehabilitation, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 162, No. 2, pp. 36-366, 2010.
- [4] Y. Hayashi, N. Tsujiuchi, T. Koizumi, H. Oshima, Development of a Novel Six-Axis Force/Moment Sensor Attached to a Prosthetic Limb for the Unrestrained Gait Measurement, *33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS Boston, Massachusetts USA*, 30 August–3 September, 2011.
- [5] F. Ballo, M. Gobbi, G. Mastinu, G. Previati, Advances in Force and Moments Measurements by an Innovative Six-axis Load Cell, *Experimental Mechanics*, Vol. 54, No. 4, pp. 571–592, 2014.

- beams six-axis force/torque sensors by mechanical modeling, *Sensors* 13 6669-6686, 2013.
- [12] U. Kim, D. H. Lee, Y. B. Kim, D. Y. Seok, H. R. Choi, A novel 6-axis force/torque sensor for robotic applications, *36rd Annual International Conference of the IEEE EMBS Boston, Massachusetts USA*, 30 August–3 September, 2016.
- [13] Y. Wang, G. Zuo, C. liang, L. Liu, Strain analysis of six-axis force torque sensors based on analytical method, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 17, No. 14, pp. 4394–4404, 2017.
- [14] J. Huang, C. Y. Wong, D. T. Pham, Y. Wang, C. Ji, S. Su, W. Xu, Q. Liu, Z. Zhou, Design of a novel six-axis force/torque sensor based on optical fibre sensing for robotic applications, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 138, No. 3, pp. 276–281, 2018.
- [15] G. A. Kebede, A. R. Ahmad, S. C. Lee, C. Y. Lin, Decoupled six-axis force-moment sensor with a novel strain gauge arrangement and error reduction techniques, *Sensors* 19, 3012, 2019.
- [6] L. Feng, G. Lin, W. Zhang, H. Pang, T. Wang, Design and optimization of a self-decoupled six-axis wheel force transducer for a heavy truck, *Journal of Automobile Engineering*, Vol. 229, No. 12, pp. 1585–1610, 2015.
- [7] Y. Sun, Y. Liu, T. Zou, M. Jin, H. Liu, Design and optimization of a novel six-axis force/torque sensor for space robot, *Measurement*, Vol. 65, pp. 135–148, 2015.
- [8] J. Zhenlin, G. Feng, Z. Xiaohui, Design and analysis of novel isotropic six-component force/torque sensor, *Sensor and Actuators A* 109, 2003.
- [9] J. J. Park, G. S. Kim, Development of 6-axis force/moment sensor for an intelligent robot's gripper, *Sensor and Actuators A* 118, 2005.
- [10] Y. Hayashi, N. Tsujiuchi, T. Koizumi, H. Oshima, Optimum design of the thin-type four-axis force/moment sensor for robot finger, *IECON 2010 - 36th Annual Conference*, 2010.
- [11] J. Ma, A. Song, Fast estimation of strains for cross-