مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1396، دوره 17، شماره 10، ص‌ص 153-164

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

پیشنهاد شاخصی برای مقایسه کیفی حسگرهای نیرو/ گشتاور شش محوره و بهینه‌سازی هندسه تیرهای متقاطع با هدف کاهش خطای تداخل

افشین کازرونی[1*]، حسین اکبری[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* تهران، صندوق پستی 16785-136، kazerooni@srttu.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 تیر 1396

پذیرش: 20 شهریور 1396

ارائه در سایت: 21 مهر 1396

کلید واژگان:

حسگر نیرو/ گشتاور شش محوره

بهینه‌سازی عددی

تداخل اصلی

سازه تیرهای متقاطع

چکیده

در این مقاله اصول اندازه‌گیری هم‌زمان سه بردار متعامد نیرو (F_x، F_y، F_z) و سه بردار متعامد گشتاور (M_x، M_y، M_z) برای طراحی حسگر نیرو/ گشتاور شش محوره مورد توجه قرار گرفته است. در ابتدا شاخصی جدید (η) برای مقایسه و قضاوت صحیح‌تر در خصوص کیفیت حسگرهای نیرو/ گشتاور شش محوره پیشنهاد داده شده و سپس با استفاده از آن خطای تداخل چند حسگر در مطالعات پیشین ارزیابی و مقایسه شده‌اند. در ادامه با استفاده از فرآیند بهینه‌سازی عددی روشی سیستماتیک برای طراحی حسگر نیرو/ گشتاور شش محوره توصیف شده است. این شیوه بر مبنای ارتباط متقابل بین الگوریتم برنامه‌نویسی درجه دوم متوالی (SQP) کدشده در متلب و استفاده از روش تحلیل اجزای محدود (FEM) در نرم‌افزار انسیس است. هندسه انتخاب شده برای سازه حسگر از نوع تیرهای متقاطع اصلاح یافته است. خطای تداخل اصلی به عنوان تابع هدف انتخاب شده تا طول چهار متغیر هندسی سازه حسگر را بهینه کند، همچنین قیدهای حساسیت کرنش‌سنج‌ها، بیشینه تنش اعمالی و طول ابعاد هندسی سازه حسگر در مسأله فرمول‌بندی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که خطای تداخل اصلی طرح حسگر بهینه‌شده با نسبت گشتاور به نیروی بالا (0.1Nm/N) به زیر 1.49% کاهش یافته است.

Proposing an index for qualitative comparison of six-axis force/torque sensors and optimization of Maltese cross geometry to reduce cross-coupling error

Afshin Kazerooni*, Hossein Akbari

Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.
* P.O.B. 16785-136 Tehran, Iran, kazerooni@srttu.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 July 2017
Accepted 11 September 2017
Available Online 13 October 2017

Keywords:
Six-axis force/torque sensor
Numerical optimization
Principle cross-coupling
Maltese cross structure

ABSTRACT

In this paper the principles of simultaneous measurement of three orthogonal force vectors F_x, F_y, F_z and three orthogonal torque vectors M_x, M_y, M_z to design a six axis force/torque sensor are considered. At first, a new index (η) for a qualitative comparison of six-axis force/torque sensors is proposed and then, cross-coupling error of several sensors presented in previous studies is evaluated and compared by using the new index. In the following, a systematic method for designing the six-axis force/torque sensor is described using numerical optimization procedure. This method is based on interactive interface between the SQP algorithm created in MATLAB and FEM analysis in ANSYS software. The geometry of sensor structure is selected to be a modified Maltese cross type. Principle cross-coupling error is chosen as the objective function to optimize four geometrical design variables of the sensor structure. Also, strain gauge sensitivity, maximum applied stress and geometric sizes of the sensor structure as constraints are formulated in problem. Results show that principle cross-coupling error of the optimal sensor design is less than 1.49% with a high moment to force specification (0.1 Nm/N).

1- مقدمه

حسگر نیرو/ گشتاور شش محوره سازه‌ای است که اگر تحت تأثیر هم‌زمان سه بردار متعامد نیرو (F_x، F_y، F_z) و سه بردار متعامد گشتاور (M_x، M_y، M_z) قرار بگیرد، باید بتواند مستقلاً اندازه و جهت این کمیت‌ها را به ترتیب در امتداد و حول محورهای x، y و z در دستگاه مختصات کارتزین خود اندازه‌گیری کند. ابتدا در اوایل دهه هفتاد میلادی بود که کاربرد این حسگرها در زمینه‌های روباتیک تشخیص داده شد و تأکید گردید [1]. به منظور کنترل دقیق‌تر حرکات ظریف روبات ماهر نه تنها اطلاعات مربوط به موقعیت و مکان بازوها و مجری نهایی لازم است، بلکه باید نیروهای اعمال شده بر آن‌ها نیز به کنترل‌کننده بازخورد شود؛ بنابراین ایجاد ساز و کاری برای سنجش نیروها و گشتاورهایی با بزرگی و جهت دلخواه به یک موضوع چالش‌برانگیز و حیاتی برای افزایش انعطاف‌پذیری در فعالیت‌های روباتیک تبدیل شد [2].

از یک سو تقاضا برای انجام وظایف پیچیده و متنوع در روبات‌های

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Kazerooni, H. Akbari, Proposing an index for qualitative comparison of six-axis force/torque sensors and optimization of Maltese cross geometry to reduce cross-coupling error, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 153-164, 2017 (in Persian)

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.16.4]

صنعتی روبه فزونی گذاشته و از سوی دیگر دامنه کاربرد این حسگرها در حوزه‌های دیگر نظیر فناوری‌های نوین پزشکی [3-5]، ورزشی [6]، توان‌بخشی [7]، اتوماسیون [8]، فرآیندهای ماشین‌کاری [9]، هوافضا [10] و غیره سبب رونق فعالیت‌های تحقیقاتی برای توسعه این نوع حسگرها شده که البته با قیمت تجاری بالایی عرضه می‌شوند [11].

در طراحی این حسگرها مسائل متفاوتی عنوان شده که گاهی کاربرد آن‌ها را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. نخست اندازه‌گیری هم‌زمان چند بردار نیرو/ گشتاور تا حدی سبب ایجاد خطای تداخل[1] بین آن‌ها شده که در نتیجه سبب افت صحت[2] اندازه‌گیری محورها می‌شود؛ حذف این تداخل یک موضوع کلیدی محسوب شده و همچنان ادامه تحقیقات در جهت بهبود آن ضروری به نظر می‌رسد. دوم برای افزایش تفکیک‌پذیری[3] و کاهش اثرات تخریب‌کننده‌هایی مانند اختلال روی سیگنال‌های خروجی باید حساسیت اندازه‌گیری[4] محورها تا حد امکان بالا رود. این امر به واسطه کاهش استحکام[5] قابل دستیابی است؛ با این وجود استحکام پایین سبب افزایش غیرمجاز تغییرشکل الاستیک[6] فنر بستر[7]، بیشتر شدن تداخل بین محورها و پایین آمدن فرکانس طبیعی حسگر می‌شود. سوم برای یکسان‌شدن دقت اندازه‌گیری در همه محورها و جلوگیری از انتشار خطا باید حساسیت‌های اندازه‌گیری محورها تا جای ممکن هم‌سان[8] باشد. افزون بر این مباحثی مانند خطی‌پذیری[9]، تکرارپذیری[10] و هیسترزیس[11] نیز مطرح است که پس از ساخت حسگر و با آزمایش‌های تجربی باید محاسبه شوند.

تاکنون مقالات زیادی با هدف بهبود این موارد منتشر شده است. این تحقیقات را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد. در دسته اول که متکی به تجربه بوده از روش سعی و خطا در روال انجام پژوهش استفاده شده است [12-15]. دسته دوم مطالعاتی است که سیستماتیک بوده [16-19] و از روش‌های بهینه‌سازی مختلف برای رفع موارد یاد شده استفاده کرده‌اند. یکی از مراحل مشترک مهم در هر دو دسته شناسایی رفتار مکانیکی سازه حسگر است. در این صورت این مشخصات یا به روش‌های تحلیلی بر مبنای نظریه‌های الاستیسیته و یا به کمک روش‌های عددی و بر پایه اجزاء محدود[12] شناسایی می‌شوند. روش‌های تحلیلی صرفاً در مواردی به کار می‌روند که هندسه سازه پیچیده نبوده و از توابع هدف و قید ساده‌ای برای معادلات بهینه‌سازی استفاده شده باشد.

یوچی‌یاما و همکاران [15] یک شاخص استاندارد به نام عدد شرطی[13] برای ارزیابی و مقایسه حسگرها پیشنهاد دادند. در ادامه [16] تحلیل‌های عددی را به وسیله روش اجزاء محدود اجرا کرده و نشان دادند که هم‌خوانی خوبی بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد. طبق توصیه ایشان استفاده از نظریه‌های الاستیسیته ساده شده در گام‌های طراحی چندان مناسب نیست، اما ساختار حسگر آن‌ها تداخلات آشکاری را نشان می‌داد. اسوینین و یوچی‌یاما [17] به کمک روابط تحلیلی یک مدل تعمیم‌یافته را برای بهینه‌سازی عدد شرطی توسعه دادند، اما این مدل بعدها توسط آن‌ها و سایر محققان مورد استفاده قرار نگرفت. بایو و استابل [18] اولین بار از روش المان محدود برای بهینه‌سازی یک حسگر خرپا شکل کمک گرفتند و تابع هدف را عدد شرطی انتخاب کردند، اما گزارش کمّی از میزان خطای تداخل‌ها ارائه ندادند. چاو و چن [19]، فرآیند بهینه‌سازی را اجرا نمودند و جرم حسگر را به عنوان تابع هدف به نسبت ساده‌ای انتخاب کردند که به سختی می‌توانست کنترلی روی میزان تداخل‌ها داشته باشد. لیو و همکاران [20] تابع هدف را حجم سازه درنظر گرفته و آن را از روش المان محدود کمینه کردند اما حسگر آن‌ها درجات بالایی از تداخل را نشان می‌داد. وثوقی و همکاران [21] ابتدا با اعمال فرضیات ساده‌کننده مدل‌سازی تحلیلی، سه تابع جداگانه شامل عدد شرطی، عدد صلبیت و حساسیت جهتی را انتخاب کردند و با انجام فرآیند بهینه‌سازی توانستند هندسه مطلوب را از بین چند مدل مختلف انتخاب کنند. آن‌ها [22] بدون اعمال فرضیات ساده‌کننده و با استفاده از روش اجزای محدود، ابعاد بهینه سازه را محاسبه و مشخصات حسگر شبیه‌سازی شده را با یک نمونه واقعی مقایسه کردند. با این وجود حسگر آن‌ها از نوع حسگرهای مکانیکی متداخل است. وو و همکاران [23] ترکیبی از عدد شرطی و حساسیت کرنش‌سنج‌ها[14] را به عنوان تابع هدف برای بهینه‌سازی یک سازه با ضخامت کم پیشنهاد دادند. با این‌که خطای تداخل 2.13% گزارش شد، اما آن‌ها کاهش بیشتر این عدد را برای استفاده در فناوری‌های پیشرفته مورد نظرشان مانند روبات‌های انسان‌نما[15] ضروری دانستند. کیم و همکاران [24-30] اگرچه ساختارهای هندسی مختلفی را برای بهبود معایب حسگرهای نیرو/ گشتاور شش محوره ارائه دادند و در بعضی از این گزارش‌ها در کنار روش عددی توانستند روش‌های تحلیلی را بسط دهند، اما هرگز از روش‌های بهینه‌سازی برای رسیدن به ابعاد مناسب استفاده نکردند. خطای تداخل حسگرهای ارائه‌شده توسط آن‌ها در بهترین حالت 2% گزارش شد. البته این میزان خطا بدون در نظر گرفتن نسبت نیرو به گشتاور مجاز حسگر به هیچ عنوان قابل مقایسه نیست. در بخش 2-3 این مقاله به‌تفصیل توضیحاتی در مورد تأثیر این نسبت ارائه شده است. وانگ و همکاران [31] ابتدا یک راه‌حل تحلیلی برای یافتن پارامترهای اثرگذار روی اندازه و توزیع کرنش‌های ایجاد شده در سازه الاستیک حسگر خود ارائه دادند و سپس نتایج را با اندازه‌های دریافت شده از روش حل عددی مقایسه کردند. نتایج تحلیلی آن‌ها به جز در بخش ابتدا و انتهای تیرهای الاستیک و برای محدوده‌ای مشخص از نسبت ابعادی، انطباق نسبی را با اندازه‌های عددی نشان می‌داد. آن‌ها تأکید کردند که نتایج عددی انطباق بیشتری با نتایج واقعی دارد. سپس توسط جعبه ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب و با انتخاب الگوریتم برنامه‌نویسی درجه دوم متوالی[16]، فرآیند بهینه‌سازی ابعادی غیرخطی را با هدف قراردادن حساسیت اندازه‌گیری کرنش‌سنج‌ها اجرا کردند. با این حال برای ساده‌سازی و فراهم کردن امکان بهینه‌سازی به کمک حل تحلیلی و جعبه ابزار متلب، از قید مهم حداکثر تنش اعمالی به سازه صرف‌نظر کردند. تحقیقات آن‌ها دربرگیرنده اطلاعاتی در خصوص اثرات مهم تداخل نیست.

کانگ و همکاران [32] برخلاف مطالعات پیشین اثرات تداخل را مستقیماً مورد توجه قرار دادند و معیار جدیدی به عنوان تداخل اصلی[17] را برای تابع هدف بهینه‌سازی معرفی کردند. سپس آن را با استفاده از روش‌های عددی و با نسبت نیرو به گشتاور تقریباً بالا کمینه کردند و خطای تداخل شبیه‌سازی 2.5% و تجربی 3.2% را گزارش دادند. اما آن‌ها قید حداکثر تنش اعمالی یا ایمنی را آشکارا در مسأله بهینه‌سازی فرمول‌بندی نکردند و

[1] Cross-coupling or interference error
[2] Accuracy
[3] Resolution
[4] Measurement sensitivity
[5] Stiffness
[6] Elastic deformation
[7] Foundation spring
[8] Isotropy
[9] Linearity
[10] Repeatability
[11] Hysteresis
[12] Finite Element Method (FEM)
[13] Condition number
[14] Strain gauge sensitivity
[15] Humanoid robot
[16] Sequential Quadratic Programming (SQP) algorithm
[17] Principal coupling

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.16.4]

آن را فقط خارج از چرخه بهینه‌سازی و به صورت سعی و خطا بررسی نمودند؛ بنابراین با لحاظ کردن این قید مهم حتی ممکن است اجرای خودکار بهینه‌سازی بدون یافتن پاسخ مناسب متوقف شود که این موضوع در بخش 5 این مقاله نشان داده شده است.

در این مطالعه قید حداکثر تنش با ضریب ایمنی 2.5 به فرآیند بهینه‌سازی گزارش شده در مرجع [32] اضافه شده و برای افزایش احتمال دستیابی به پاسخ مناسب، کران قیدها نیز گسترده‌تر شده است. فرآیند مش‌بندی در منطقه نصب کرنش‌سنج‌ها نیز پالایش یافته است، همچنین برای کاهش اثرات تمرکز تنش علاوه‌بر لبه‌های کناری، محل اتصال لبه‌های بالا و پایین تیرها به بلوک وسط و نیز به دیواره‌های فنری گرد شده است. در این مقاله شاخص مقایسه‌کننده جدید η برای قضاوت صحیح‌تر در خصوص خطای تداخل حسگرها در بخش 2-3 پیشنهاد داده شده است.

سازه‌ای که کانگ و همکاران [32] برای فنر بستر الاستیک حسگرشان استفاده کردند از نوع تیرهای متقاطع است. به همین دلیل در این‌جا توضیحاتی در این خصوص ارائه می‌شود. تاکنون مدل‌های هندسی متفاوتی برای حسگرهای نیرو/ گشتاور چند محوره ارائه شده که می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی تقسیم کرد: دسته اول [22-18,16,13,12] حسگرهایی که به صورت مکانیکی متداخل‌اند، دسته دوم [32,31,28-23,14] آن‌هایی که مکانیکی نامتداخل هستند. در دسته اول با اعمال یک مؤلفه نیرو یا گشتاور بیش از یک محور تحت تأثیر قرار می‌گیرد که این سیگنال‌های متداخل باید توسط یک ماتریس کالیبراسیون نسبتاً پیچیده و گاهی به روش‌هایی نظیر شبکه‌های عصب مصنوعی[1] [12] جداسازی شوند. در دسته دوم با اعمال یک مؤلفه بار یک محور از حسگر در مقابل سایر محورها حساسیت بسیار بالاتری نشان می‌دهد. کالیبراسیون این دسته نسبت به دسته اول آسان‌تر است، اما عیب بزرگ آن‌ها ساده نبودن هندسه حسگرها و کم و بیش مشاهده اثرات تداخل در بعضی محورهاست. سازه تیرهای متقاطع در دسته دوم قرار دارد. شینمن [33] نخستین بار این ساختار هندسی را برای حس هر شش بردار نیرو/ گشتاور اعمالی بر بازوی روبات استنفورد پیشنهاد داد. سپس این سازه اصلاح و تبدیل به مدلی شد که بعدها به نام مالتس‌کراس[2] شهرت یافت [35,34]. این هندسه به دلایل زیر کماکان مورد توجه پژوهشگران است: یک‌پارچه بودن[3] فنر بستر الاستیک آن و در نتیجه پایین بودن خطای تکرارپذیری و هیسترزیس، استحکام و خطی‌پذیری بالا، ایزوتروپی مناسب، امکان ساخت آن برای رنج‌های بارگذاری و حجم‌های متنوع متناسب با سیستمی که قرار است در آن نصب شود و دستیابی به فرکانس رزونانس بالا برای استفاده در کاربردهای دینامیکی [18].

در ادامه این مقاله و در بخش 2 اصول اندازه‌گیری در حسگرهای نیرو/ گشتاور شش محوره به کمک کرنش‌سنج‌ها، اثرات تداخل، معیار تداخل اصلی کانگ و شاخص پیشنهاد داده شده η تشریح شده است. بخش 3 دربرگیرنده ساختار هندسی حسگر و الگوی نصب کرنش‌سنج‌هاست. در بخش 4 مسأله بهینه‌سازی فرموله شده و چگونگی انجام فرآیند بهینه‌سازی به کمک نرم‌افزارهای متلب[4] و انسیس[5] توضیح داده شده است. در بخش 5 نتایج به‌دست‌آمده مقایسه و بحث شده‌اند و در بخش 6 نتیجه‌گیری نهایی ارائه می‌شود.

[1] Artificial Neural Network (ANN)
[2] Maltese Cross
[3] Monolithic
[4] MATLAB® 9.1- R2016b
[5] ANSYS® 17.0 -R2017

2- اصول اندازه‌گیری در حسگر نیرو/ گشتاور شش محوره

2-1- روش تشخیص بارهای اعمالی

هر سیستمی ممکن است در معرض نیروها و گشتاورهای خارجی قرار بگیرد که اندازه‌گیری مستقل و هم‌زمان این بارها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. برای نمونه شکل 1 یک دست روباتیک را در تعامل با یک شیء نشان می‌دهد که در معرض نیروهای خارجی F_w و گشتاورهای خارجی M_w قرار دارد. این بارها توسط مکانیزم‌هایی به حسگر انتقال می‌یابد و حسگر آن‌ها را در دستگاه مختصات خود اندازه‌گیری می‌کند. با استفاده از بردارهای F_s و M_s و به کمک روابط هندسی بین دستگاه‌های مختصات حسگر دست و شیء می‌توان بردارهای F_w و M_w را به آسانی محاسبه کرد. با این حال پارامترهای این روابط هندسی باید جداگانه برای هر سیستمی بسط داده شود و نمی‌توان آن‌ها را تعمیم داد. در عمل حسگرهای نیرو/ گشتاور شش محوره با توجه به بزرگی بردارهای F_s و M_s طراحی می‌شوند [15]، همچنین با فرض استاتیک بودن شرایط، اثرات اینرسی مکانیزم‌ها نادیده گرفته می‌شود. یوچی‌یاما و کیتاگاکی [36] این اثرات را در حالت دینامیکی و با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته[6] جداسازی کردند.

نیروها و گشتاورهای اعمالی به حسگر از طریق اندازه‌گیری کرنش‌های ایجاد شده در مکان‌های خاصی از سازه حسگر تشخیص داده می‌شوند (در این مقاله صرفاً روش اندازه‌گیری کرنش با مبدل کرنش‌سنج مورد نظر است). با این شرط که رفتار حسگر در ناحیه الاستیک قرارگیرد، آن‌گاه رابطه خطی بین بارهای خارجی و کرنش‌های داخلی برابر با رابطه (1) است [37,18-16].

$$\hat{\varepsilon} = \hat{C}\hat{f} \tag{1}$$

جایی که $\hat{\varepsilon} \in R^n$ بردار کرنش شامل n کرنش اندازه‌گیری شده از مکان روی سطح فنر بستر الاستیک حسگر و $\hat{f} \in R^m$ بردار بار شامل m مؤلفه نیرو F_s و گشتاور M_s اعمال شده به مبدأ مختصات کارتزین حسگر است. برای حسگرهای شش محوره $m = 6$ است. $\hat{C} \in R^{n\times m}$ ماتریس انطباق کرنش[7] است که درایه‌هایش وابسته به سازه حسگر بوده و به روش‌های تحلیلی، عددی یا تجربی و به ازای بردار بار واحد تعیین می‌شوند. از آن‌جا که تغییر شکل سازه در ناحیه الاستیک قرار دارد پس ماتریس $\hat{C}$ ثابت است. یک معکوس تعمیم‌یافته از ماتریس $\hat{C}$ از رابطه $\hat{C}\hat{C}^{\#} = I$ در حالی که I ماتریس یکه[8] است، می‌تواند برای بازخوانی اطلاعات بردار بار به صورت رابطه (2) استفاده شود [17].

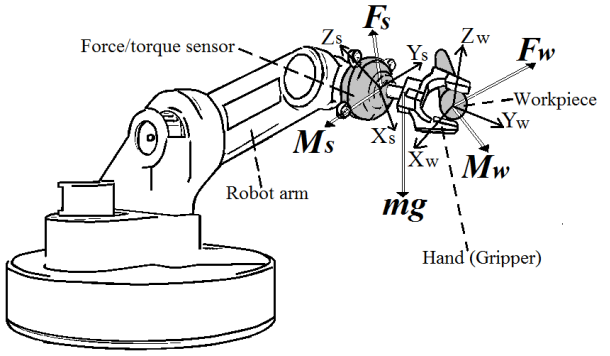


Fig. 1 Measurement of external forces and moments by a six-axis force/torque sensor

شکل 1 اندازه‌گیری نیروها و گشتاورهای خارجی به وسیله حسگر نیرو/ گشتاور شش محوره

[6] Extended Kalman filter
[7] Strain compliance matrix
[8] Identity matrix

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.16.4]

$$\hat{f} = \hat{C}^{\#}\hat{\varepsilon} \tag{2}$$

ماتریس معکوس تعمیم‌یافته $\hat{C}^{\#} \in R^{m\times n}$ را ماتریس سختی کرنش[1] یا کالیبراسیون[2] گویند.

واحد درایه‌های سه ستون اول ماتریس انطباق کرنش در رابطه (1) μSt/N و سه ستون دوم μSt/Nm است (میکرواسترین $\mu St = 10^{-6} m/m$ یک عبارت بی‌بعد است). وقتی در مرحله طراحی قرار است کیفیت حسگرها براساس معیارهای معینی ارزیابی شوند، باید از ماتریس انطباق کرنش استفاده کرد [37,18,17]. به دلیل وابستگی خصوصیات ماتریس $\hat{C}$ به واحدهای نیرو و گشتاور باید ابتدا آن را با توجه به بیشینه نیروها و گشتاورهای مجاز طراحی حسگر نرمال کرد و مستقل از بارگذاری کرد. بدین منظور به کمک ماتریس N_f از فرم بی‌بعدشده بردار بار $\hat{f}$ یعنی f استفاده می‌شود [37]، همچنین ممکن است مؤلفه‌های بردار کرنش $\hat{\varepsilon}$ از نظر بزرگی اندازه‌ها متفاوت باشند و به همین علت گاهی برای یکسان کردن مقیاس درایه‌های ماتریس $\hat{C}$ از ماتریس N_ε هم استفاده می‌شود [37]. این موضوع به صورت روابط (3) و (4) بسط داده شده است.

$$\hat{f} = N_f f, \qquad N_f = \mathrm{diag}\{f_{1\max}, f_{2\max}, \dots, f_{m\max}\} \tag{3}$$

$$\hat{\varepsilon} = N_\varepsilon \varepsilon, \qquad N_\varepsilon = \mathrm{diag}\{\varepsilon_{1\max}, \varepsilon_{2\max}, \dots, \varepsilon_{n\max}\} \tag{4}$$

جایی که $f_{i\max}$ بیشینه نیرو یا گشتاور مجاز طراحی برحسب N یا Nm و $\varepsilon_{i\max}$ مقدار مطلق بیشینه کرنش مجاز برحسب (μSt) است. مورد دوم از کمترین مقدار بین کرنش مجاز کرنش‌سنج‌ها و کرنش الاستیک جنس سازه انتخاب می‌شود؛ بنابراین رابطه بین بردارهای بی‌بعد بار f و کرنش مقیاس شده ε برابر با رابطه (5) است.

$$\varepsilon = Cf \tag{5}$$

جایی که C ماتریس انطباق نرمال‌شده[3] است که به صورت رابطه (6) محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon = Cf \rightarrow N_\varepsilon^{-1}\hat{\varepsilon} = CN_f^{-1}\hat{f} \rightarrow \begin{cases} \hat{\varepsilon} = N_\varepsilon C N_f^{-1}\hat{f} \\ \hat{\varepsilon} = \hat{C}\hat{f} \end{cases} \rightarrow$$
$$N_\varepsilon C N_f^{-1} = \hat{C} \rightarrow C = N_\varepsilon^{-1}\hat{C}N_f \tag{6}$$

بعضی محققان [32] ماتریس N_ε را نادیده گرفته و در تحقیقاتشان از ماتریس انطباق بی‌بعدشده[4] مطابق با رابطه (7) استفاده کرده‌اند.

$$C = \hat{C}N_f \tag{7}$$

این موضوع تأثیری روی مقایسه نتایج آن‌ها با نتایج سایر محققان ندارد؛ چراکه اگر معیارهای کیفی حسگرها نظیر عدد شرطی و تداخل اصلی توسط هر کدام از ماتریس‌های انطباقی موجود در روابط (6) یا (7) محاسبه شوند، باز هم نتیجه یکسان خواهد بود. در این مقاله چون معیار طراحی تداخل اصلی است از این‌رو از رابطه (7) استفاده شده است.

2-2- خطای تداخل و تداخل‌های اصلی

در حالت ایده‌آل اگر با اتخاذ تدابیری نظیر انتخاب تعداد و مکان مناسبی برای کرنش‌سنج‌ها و نیز نصب آن‌ها در مداری موسوم به پل وتستون[5] (تشریح کامل این مدارها در بخش 3 ارائه شده است)، بتوان ماتریس C را تبدیل به ماتریس مربعی $C \in R^{m\times m}$ کرد $(n = m)$ که همه درایه‌های آن به جز درایه‌های قطر اصلی صفر باشند؛ آن‌گاه حسگر را به لحاظ مکانیکی کاملاً نامتداخل گویند. در عمل دستیابی به حسگر کاملاً نامتداخل غیرممکن است، زیرا وقتی تنها یک مؤلفه بردار بار $\hat{f}$ به حسگر اعمال گردد در عوض به دلیل هندسه یک‌پارچه سازه، کرنش‌هایی در سرتاسر آن ایجاد می‌شود که در بعضی ناحیه‌ها کوچک و در جایی دیگر بزرگ است. پس همه کرنش‌سنج‌های متصل شده، تحت تأثیر قرار گرفته و مطابق با رابطه (8) درایه‌های غیرصفری خارج از قطر اصلی ظاهر خواهند شد.

$$C_{ij_{(i\neq j)}} \in R^{m\times m} \neq 0 \tag{8}$$

بنابراین برای حسگرهایی که به صورت مکانیکی نامتداخل طراحی می‌شوند (حتی حسگرهایی که به لحاظ مکانیکی متداخل‌اند و ماتریس انطباق کرنش مربعی دارند [12]) باید اندازه این آثار تداخل ناخواسته برآورد و گزارش شود. با استفاده از ماتریس انطباق بی‌بعدشده C در رابطه (7)، خطای تداخل به صورت رابطه (9) برآورد می‌شود.

$$(CC)_{ij}(\%) = \frac{C_{ij}}{C_{ii}} \times 100 = \frac{N_{f_{(jj)}} \times \hat{C}_{ij}}{N_{f_{(ii)}} \times \hat{C}_{ii}} \times 100 \tag{9}$$

جایی که $i,j = 1,\dots,m$ و $i \neq j$ است. برای حسگرهای نیرو/ گشتاور شش محوره، m مساوی 6 است. از نظر مفهوم فیزیکی C_{ij} معادل کرنش ناخواسته یا مزاحم ایجاد شده تحت بیشینه مؤلفه بار j-ام در کرنش‌سنج‌هایی است که برای اندازه‌گیری مؤلفه بار i-ام نصب شده است. C_{ii} معادل کرنش اصلی یا مطلوب ایجاد شده تحت بیشینه مؤلفه بار i-ام در کرنش‌سنج‌هایی است که برای اندازه‌گیری مؤلفه بار i-ام پیش‌بینی شده است.

اگر از ماتریس انطباق نرمال‌شده رابطه (6) در بسط رابطه (9) استفاده شود، آن‌گاه رابطه (10) نشان می‌دهد که بازهم این خطای تداخل تعمیم یافته معتبر است.

$$(CC)_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_{ii}} = \frac{N_\varepsilon^{-1}{}_{(ii)} \times N_{f_{(jj)}} \times \hat{C}_{ij}}{N_\varepsilon^{-1}{}_{(ii)} \times N_{f_{(ii)}} \times \hat{C}_{ii}} = \frac{N_{f_{(jj)}} \times \hat{C}_{ij}}{N_{f_{(ii)}} \times \hat{C}_{ii}} \tag{10}$$

وجود پدیده اختلال سبب مخدوش شدن صحت اندازه‌گیری این حسگرها شده که استفاده از آن‌ها را در کاربردهای بسیار دقیق محدود می‌کند. به همین دلیل باید تا حد امکان کرنش‌های ناخواسته کاهش یابند. تاکنون برای رفع این مشکل در حسگرهای دارای کرنش‌سنج راه‌حل‌های مختلفی ارائه شده که می‌توان آن‌ها را به سه دسته کلی زیر تقسیم نمود: اصلاح و توسعه هندسه‌های پیشنهاد داده شده در مطالعات پیشین [39,38,25,20]، معرفی یک هندسه جدید [28-26,13] یا استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برای هندسه‌های کلاسیک [32,31,23,19,16].

کانگ و همکاران [32] نشان دادند که در هندسه تیرهای متقاطع نسبت‌های $(CC)_{15}$ و $(CC)_{24}$ در مقایسه با نسبت‌های دیگر $(CC)_{ij}$ بزرگ‌تر است. از این‌رو خطاهای تداخل اصلی این هندسه را به‌گونه رابطه (11) معرفی کردند.

$$(CC)_{15}(\%) = \frac{C_{15}}{C_{11}} \times 100 = \frac{M_y^{\max}\hat{C}_{15}}{F_x^{\max}\hat{C}_{11}} \times 100\,,$$
$$(CC)_{24}(\%) = \frac{C_{24}}{C_{22}} \times 100 = \frac{M_x^{\max}\hat{C}_{24}}{F_y^{\max}\hat{C}_{22}} \times 100 \tag{11}$$

جایی که برای عبارت اول $i = 1$ و $j = 5$ و برای عبارت دوم $i = 2$ و $j = 4$ است.

3-2- معرفی شاخصی برای مقایسه صحیح‌تر خطای تداخل در حسگرها

بایو و استابل [18] تأکید کردند که ظرفیت بارگذاری مجاز یا درایه‌های قطر اصلی ماتریس N_f یک حسگر باید ابتدا مطابق با کاربرد آن انتخاب شده و

[1] Strain stiffness matrix
[2] Calibration matrix
[3] Normalized compliance matrix
[4] Dimensionless compliance matrix
[5] Wheatstone bridge

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.16.4]

سپس مراحل طراحی آغاز شود. آن‌گاه در پایان طراحی مشخصات و معیارهای کیفی حسگر گزارش شود. این حقیقت وجود دارد که می‌توان از ابتدا ظرفیت‌های بارگذاری را طوری انتخاب کرد که در نهایت معیارهای کیفی حسگر نظیر عدد شرطی یا خطای تداخل ظاهراً کاهش یابد. کانگ [32] این موضوع را با یک مثال نشان داده است. در این مقاله سعی شده برای روشن‌تر شدن موضوع مورد بحث این مثال به شکل دقیق‌تری تشریح شود. ابتدا نسبت Γ_{ij} به صورت رابطه (12) معرفی می‌شود.

$$\Gamma_{ij} = \frac{N_{f_{(jj)}}}{N_{f_{(ii)}}} \tag{12}$$

دیمانسیون کسر Γ_{ij} در رابطه (12) با توجه به مقدار i و j می‌تواند نیرو بر نیرو، نیرو بر گشتاور، گشتاور بر نیرو یا گشتاور بر گشتاور باشد.

فرض می‌شود یک حسگر نیرو/ گشتاور شش محوره قرار است برای یک مکانیزم روباتیک مانند شکل 1 طراحی و ساخته شود و بیشینه بارهای وارد بر روبات برابر با رابطه (13) باشد.

$$\hat{f} = [100\text{N}, 100\text{N}, 200\text{N}, 10\text{Nm}, 10\text{Nm}, 10\text{Nm}] \tag{13}$$

پس با انتخاب یک ضریب ایمنی مناسب مثلاً 4 باید ظرفیت مجاز این حسگر برای شروع طراحی به صورت رابطه (14) در نظر گرفته شود که در این حالت نسبت Γ_{15} طبق رابطه (15) برابر با 0.1Nm/N است.

$$N_f = \text{diag}\{400\text{N}, 400\text{N}, 800\text{N}, 40\text{Nm}, 40\text{Nm}, 40\text{Nm}\} \tag{14}$$

$$\Gamma_{15} = N_{f_{(55)}}/N_{f_{(11)}} = \frac{40\text{Nm}}{400\text{N}} = 0.1\text{Nm/N} \tag{15}$$

همچنین فرض می‌شود مدار مخصوص نیروی F_x، کرنشی معادل با 1000μSt را تحت بار $F_x^{\max}$ اندازه‌گیری کند (سیگنال اصلی یا مطلوب). از طرفی همین مدار کرنشی معادل با 20μSt را تحت بار $M_y^{\max}$ تشخیص می‌دهد (سیگنال ناخواسته یا مزاحم). در این صورت طبق رابطه (11)، خطای تداخل اصلی این حسگر مطابق رابطه (16) برابر 2% است.

$$(CC)_{15}(\%) = \frac{C_{15}}{C_{11}} \times 100 = \frac{20\mu\text{St}}{1000\mu\text{St}} \times 100 = 2\% \tag{16}$$

اکنون تصور کنید که برای دستیابی به خطای تداخل کمتر از ابتدا اندازه مؤلفه $M_y^{\max}$ حسگر با ضریب ایمنی 2 انتخاب شود. پس ظرفیت بارگذاری مجاز در شروع طراحی به صورت رابطه (17) تغییر می‌کند که در این حالت نسبت Γ_{15} طبق رابطه (18) برابر با 0.05Nm/N است.

$$N_f = \text{diag}\{400\text{N}, 400\text{N}, 800\text{N}, 40\text{Nm}, 20\text{Nm}, 40\text{Nm}\} \tag{17}$$

$$\Gamma_{15} = N_{f_{(55)}}/N_{f_{(11)}} = \frac{20\text{Nm}}{400\text{N}} = 0.05\text{Nm/N} \tag{18}$$

به این ترتیب مدار مخصوص نیروی F_x همان کرنش 1000μSt را تحت بار $F_x^{\max}$ اندازه‌گیری خواهد کرد (سیگنال اصلی یا مطلوب)، اما چون گشتاور $M_y^{\max}$ نصف شده است پس این مدار نصف کرنش پیشین یعنی 10μSt را تحت بار $M_y^{\max} = 20\text{Nm}$ تشخیص خواهد داد (سیگنال ناخواسته یا مزاحم). در این صورت طبق رابطه (11) خطای تداخل اصلی مطابق رابطه (19) برابر 1% است.

$$(CC)_{15}(\%) = \frac{C_{15}}{C_{11}} \times 100 = \frac{10\mu\text{St}}{1000\mu\text{St}} \times 100 = 1\% \tag{19}$$

با این توضیحات پرسشی که مطرح می‌شود این است که آیا می‌توان ادعا کرد که خطای تداخل حسگر دومی نسبت به اولی نصف شده است؟ پاسخ خیر است، زیرا هر دو حسگر یکی است، ولی در مورد دوم از ابتدا گشتاور $M_y^{\max}$ کمتری به عنوان گشتاور مجاز طراحی انتخاب شده است. بایو و استابل [18] در مطالعات خود اشاره می‌کنند که برای مقایسه عادلانه و صحیح حسگرها علاوه‌بر معیارهای کیفی باید نسبت $\Gamma = M_{\max}/F_{\max}$ هم جداگانه گزارش شود. همان‌طور که کانگ و همکاران [32] اشاره کردند، اگرچه در برخی از مطالعات حسگرهایی با اثرات تداخل پایین گزارش شده است (کمتر یا مساوی 2%)، اما آن‌ها در حقیقت از ابتدا به طور ناخواسته نسبت Γ_{ij} کوچکی را انتخاب کرده‌اند که منجر به خطای تداخل پایینی شده است و از نظر مقایسه اگر نسبت Γ_{ij} را افزایش دهند، طبیعتاً حسگرهای آن‌ها تداخل‌های مهم و بزرگی را نشان خواهد داد؛ بنابراین برای قضاوت صحیح‌تر در خصوص کیفیت حسگرهای مختلف باید شاخص Γ_{ij} نیز حتماً لحاظ گردد. با این حال در مطالعات [32,18] معیاری در این خصوص ارائه نشده است. در این مقاله شاخصی برای مقایسه کیفی حسگرهای نیرو/ گشتاور شش محوره به شرح زیر پیشنهاد می‌شود. ابتدا با رابطه (20) می‌توان نشان داد که خطای تداخل در رابطه (9) بی‌بعد است.

$$(CC)_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_{ii}} = \frac{N_{f_{(jj)}}\hat{C}_{ij}}{N_{f_{(ii)}}\hat{C}_{ii}} = \frac{(\text{N یا Nm}) \times \left(\frac{\mu\text{St}}{\text{N یا Nm}}\right)}{(\text{N یا Nm}) \times \left(\frac{\mu\text{St}}{\text{N یا Nm}}\right)} \tag{20}$$

برای محاسبه خطای تداخل با استفاده از رابطه (9)، نکته‌ای که وجود دارد این است که خطای تداخل در صورت و مخرج کسر $(CC)_{ij}$، حاصل‌ضرب دو پارامتر است که اولی درایه‌های ماتریس انطباق کرنش $\hat{C}$ و دومی ظرفیت‌های بار مجاز N_f است. اولی وابسته به سازه حسگر بوده و تنها با اتخاذ تدابیری در مرحله طراحی (برای نمونه انتخاب $(CC)_{ij}$ به عنوان تابع هدف در فرآیند بهینه‌سازی [32]) می‌تواند کاهش یابد و پس از تکمیل طرح، درایه‌های $\hat{C}_{ij}$ ثابت و غیرقابل تغییر خواهند بود. دومی به راحتی می‌تواند در شروع طراحی با انتخاب یک مقدار بار مجاز کوچک‌تر در صورت یا بار مجاز بزرگ‌تر در مخرج کاهش یابد (مانند نمونه یادشده در همین بخش). پس در ظرف مقایسه اساساً باید شاخصی موجود باشد که به مشخصات سازه‌ای حسگرها یعنی ماتریس ثابت $\hat{C}$ وابسته باشد؛ نه این‌که با انتخاب ظرفیت بار مجاز کمتر مدعی ارائه حسگرهای باکیفیت‌تری شد. از این‌رو با استفاده از روابط (9) و (12) شاخص مقایسه‌کننده η به صورت رابطه (21) پیشنهاد می‌شود که ضریب α در آن توسط رابطه (22) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{ij} = \frac{(CC)_{ij}}{\alpha_{i,j,p,q} \times \Gamma_{ij}} \tag{21}$$

جایی که $i,j = 1,\dots,6$ و $i \neq j$ است و کران‌های بالا و پایین p در نماد سیگما وابسته به i و کران‌های q وابسته به j است.

$$\alpha_{i,j,p,q} = \sqrt{\frac{\left(\sum_p \left(N_{f_{(pp)}}\right)^2\right) - \left(N_{f_{(ii)}}\right)^2}{\left(\sum_q \left(N_{f_{(qq)}}\right)^2\right) - \left(N_{f_{(jj)}}\right)^2}}$$

$$\begin{cases} \text{اگر } i,j = 1,2 \text{ یا } 3 \ \rightarrow p,q = 1 \text{ تا } 3 \\ \text{اگر } i,j = 4,5 \text{ یا } 6 \ \rightarrow p,q = 4 \text{ تا } 6 \end{cases} \tag{22}$$

از رابطه (21) وقتی استفاده می‌شود که ماتریس انطباق نرمال‌شده از روابط (6) یا (7) در دسترس است. در غیر این صورت با استفاده از ماتریس انطباق کرنش در رابطه (1) و با ساده‌سازی رابطه (21) می‌توان از رابطه (23) استفاده کرد.

$$\eta_{ij} = \frac{\frac{N_{f_{(jj)}} \times \hat{C}_{ij}}{N_{f_{(ii)}} \times \hat{C}_{ii}}}{\alpha_{i,j,p,q} \times \frac{N_{f_{(jj)}}}{N_{f_{(ii)}}}} = \left(\alpha_{i,j,p,q}\right)^{-1} \frac{\hat{C}_{ij}}{\hat{C}_{ii}} \tag{23}$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.16.4]

از رابطه‌های (21) و (23) مشخص است که وقتی خطای تداخل توسط رابطه (9) محاسبه می‌شود، آن‌گاه برای حذف نسبت نیروها و گشتاورها باید Γ_{ij} در مخرج کسر η_{ij} قرار گیرد. در این حالت برای انتخاب ضریب α ذکر چند نکته ضروری است: نخست این‌که برای بی‌بعد کردن η_{ij}، واحد ضریب α باید معکوس واحد Γ_{ij} باشد. دوم این‌که نیروها و گشتاورها باید براساس ظرفیت بار مجاز تعریف شده برای حسگرها یعنی از ماتریس N_f انتخاب شوند؛ چرا که رفتار حسگر را در بالاترین آستانه نشان می‌دهد. افزون بر این ظرفیت بار مجاز نشان‌دهنده یک نقطه معین است که می‌تواند برای مقایسه حسگرهای نیرو/ گشتاور مختلف استفاده شود. سوم تغییر در هریک از مؤلفه‌های بار Γ_{ij} که نباید دوباره تأثیری روی ضریب α بگذارد (مثلاً α افزایش داده شود تا η کمتری به‌دست آید).

اکنون شاخص η_{ij} را برای مثال یاد شده برآورد می‌کنیم. شاخص η_{15} برای حسگری با مشخصات بار رابطه (14) از رابطه (24) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{15}=\frac{(CC)_{15}}{\alpha_{1,5,p,q}\times\Gamma_{15}}=\frac{2\%}{\sqrt{\frac{\left(\sum_{p=1}^{3}\left(N_{f_{(pp)}}\right)^2\right)-\left(N_{f_{(11)}}\right)^2}{\left(\sum_{q=4}^{6}\left(N_{f_{(qq)}}\right)^2\right)-\left(N_{f_{(55)}}\right)^2}}\times\frac{N_{f_{(55)}}}{N_{f_{(11)}}}}=$$
$$=\frac{2\%}{\sqrt{\frac{400^2+400^2+800^2-400^2}{40^2+40^2+40^2-40^2}}\times\frac{40}{400}}=1.26\% \qquad (24)$$

و شاخص η_{15} برای حسگری با مشخصات بار رابطه (17) از رابطه (25) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{15}=\frac{(CC)_{15}}{\alpha_{1,5,p,q}\times\Gamma_{15}}=\frac{1\%}{\sqrt{\frac{\left(\sum_{p=1}^{3}\left(N_{f_{(pp)}}\right)^2\right)-\left(N_{f_{(11)}}\right)^2}{\left(\sum_{q=4}^{6}\left(N_{f_{(qq)}}\right)^2\right)-\left(N_{f_{(55)}}\right)^2}}\times\frac{N_{f_{(55)}}}{N_{f_{(11)}}}}$$
$$=\frac{1\%}{\sqrt{\frac{400^2+400^2+800^2-400^2}{40^2+20^2+40^2-20^2}}\times\frac{20}{400}}=1.26\% \qquad (25)$$

بنابراین نتیجه می‌گیریم این دو حسگر تفاوت کیفی از لحاظ معیار تداخل اصلی $(CC)_{15}$ ندارند.

حسگرهای ارائه شده در بعضی مقالات اساساً از نوع متداخل است [22-18,16,13,12] یا خطای تداخل را گزارش نداده‌اند [31]، یا این خطا را از طریق رابطه متداول (9) محاسبه نکرده‌اند [24-30]؛ بنابراین نمی‌توان آن‌ها را از طریق شاخص η_{ij} مقایسه کرد. با این حال خطای تداخل چند مقاله مختلف که از رابطه (9) استفاده نموده‌اند توسط شاخص η_{ij} محاسبه شده و در جدول 1 درج شده است.

از جدول (1) ملاحظه می‌شود که با استفاده از شاخص η_{ij} برخی بیشینه خطاهای تداخل $(CC)_{ij}^{\max}$ گزارش شده در مطالعات پیشین ثابت [38]، کوچک‌تر [32] یا بزرگ‌تر شده است [23,14].

3- هندسه سازه الاستیک حسگر و مکان‌های اندازه‌گیری کرنش

3-1- هندسه سازه (فنر بستر الاستیک)

از آن‌جا که یکی از اهداف این مطالعه اصلاح شرایط بهینه‌سازی اتخاذ شده توسط کانگ و همکاران [32] و سپس مقایسه نتایج حاصله است؛ بنابراین در این مقاله نیز مانند ایشان از هندسه تیرهای متقاطع اصلاح شده استفاده شده است. مطابق شکل 2 تیرهای متقاطع 1 تا 4 از یک سر به بلوک مرکزی 5 و از سوی دیگر به حلقه 6 متصل‌اند. صفحه زیرین حلقه توسط اتصالاتی به سیستم مورد نظر (مثلاً دست روباتیک) کاملاً مقید می‌شود. از طرفی بارها توسط مکانیزم‌های واسطه از مجری نهایی به بلوک 5 انتقال می‌یابد. محل

جدول 1 خطای تداخل بر اساس شاخص مقایسه‌کننده η_{ij}

Table 1 Cross-coupling error by comparison index η_{ij}

شماره مرجع	خطای تداخل (%) $(CC)_{ij}$	نسبت بارها (Γ_{ij})	شاخص مقایسه‌کننده (%) η_{ij}
[14]	6.42	$\Gamma_{35}=M_y/F_z={}^{20}/_{1000}$	12.68
[23]	2.13	$\Gamma_{61}=F_X/M_z={}^{800}/_{45}$	3.20
[32]	3.2	$\Gamma_{15}=M_y/F_x={}^{40}/_{400}$	2.02
[38]	0.89	$\Gamma_{51}=F_x/M_y={}^{200}/_{0.8}$	0.89

اتصال تیرهای 1-4 به حلقه 6 نازک‌تر طراحی شده و با عنوان صفحه‌های فنری موازی 7 شناخته می‌شوند. این صفحه‌ها سبب افزایش تغییر شکل و حساسیت بیشتر در اثر اعمال نیروهای F_x و F_y می‌شوند [35,23,19].

3-2- تعیین مکان‌های مناسب برای اندازه‌گیری کرنش

بارهای اعمال شده به بلوک 5 بزرگ‌ترین کرنش‌های الاستیک را روی سطوح تیرهای 1 تا 4 ایجاد می‌کند که نمی‌توان آن‌ها را مستقیم به‌دست آورد و باید توسط مبدل‌هایی اندازه‌گیری شوند. یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها استفاده از کرنش‌سنج‌هاست. رابطه بین تغییر شکل الاستیک اعمال شده به یک کرنش‌سنج و تغییر مقاومت ایجاد شده در آن با فاکتور GF به صورت رابطه (26) بیان می‌شود [14].

$$\mathrm{GF}=\frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}=\frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \qquad (26)$$

جایی که R، L و ε به ترتیب مقاومت نامی، طول اصلی و کرنش اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج است. بدین ترتیب کرنش‌سنج‌ها باید در مکان‌های خاصی روی سطوح تیرها متصل شوند تا مطابق شکل 3 به کمک مداری به نام پل وتستون بتوان کرنش‌های نرمال کششی یا فشاری را به ترتیب به سیگنال الکتریکی مثبت یا منفی قابل اندازه‌گیری تبدیل کرد.

پل وتستون در شرایط نرمال متعادل بوده و به ازای ولتاژ ورودی V_i هیچ‌گونه ولتاژ خروجی V_o صادر نمی‌کند. در صورت ایجاد هرگونه کرنش و تغییر در بازوها، آن‌گاه پل نامتعادل شده و ولتاژی معادل با این تغییرات خارج خواهد کرد. برای حذف تغییرات ایجاد شده در اثر انقباض و انبساط ناشی از گرادیان دمای محیط حداقل باید دو بازو فعال (مجهز به کرنش‌سنج)

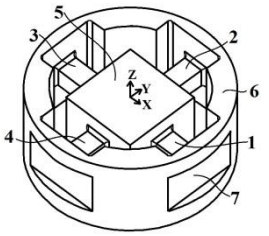


Fig. 2 Elastic structure of the six-axis F/T sensor

شکل 2 سازه الاستیک حسگر نیرو/ گشتاور شش محوره

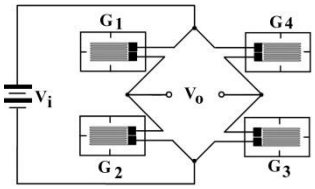


Fig. 3 A full Wheatstone bridge

شکل 3 پل وتستون کامل

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.16.4]

باشد. همچنین برای افزایش اندازه ولتاژ خروجی و حساسیت چهار بازو را فعال و پل را کامل طراحی می‌کنند. رابطه بین برآیند کرنش‌های ایجاد شده و ولتاژ خروجی از پل وتستون کامل برابر با رابطه (27) است.

$$\varepsilon = \frac{V_o}{\mathrm{GF} \times V_i} \tag{27}$$

در این مقاله چون حسگرهای نوع مکانیکی نامتداخل مورد نظر بوده است؛ بنابراین شش مدار پل وتستون برای اندازه‌گیری شش مؤلفه بردار $\hat{f}$ به همراه 24 عدد کرنش‌سنج انتخاب شده است. شکل 4 موقعیت کرنش‌سنج‌ها روی تیرهای 1 تا 4 را نشان می‌دهد. این مکان‌ها به ترتیبی انتخاب شده‌اند که در حالت ایده‌آل هر پل تنها به یک مؤلفه نیرو یا گشتار حساسیت نشان دهد. شماره درون پرانتزها نشان‌دهنده شماره کرنش‌سنج‌ها روی سطح مقابل است. به دلیل پرهیز از آثار تمرکز تنش و دوری از ناحیه‌های توزیع کرنش غیرخطی همه مکان‌های اندازه‌گیری کرنش به طول 4 یا 7 میلی‌متر دورتر از سطوح جانبی بلوک مرکزی قرار دارند.

با توجه به پل‌های وتستون طراحی شده برآیند کرنش‌های به وجود آمده در اثر مؤلفه بار وارده برابر رابطه (28) است.

$$\begin{cases} \varepsilon_{F_x} = \dfrac{\varepsilon_{G_1} - \varepsilon_{G_2} + \varepsilon_{G_3} - \varepsilon_{G_4}}{4} \\ \varepsilon_{F_y} = \dfrac{\varepsilon_{G_5} - \varepsilon_{G_6} + \varepsilon_{G_7} - \varepsilon_{G_8}}{4} \\ \varepsilon_{F_z} = \dfrac{\varepsilon_{G_9} - \varepsilon_{G_{10}} + \varepsilon_{G_{11}} - \varepsilon_{G_{12}}}{4} \\ \varepsilon_{M_x} = \dfrac{\varepsilon_{G_{13}} - \varepsilon_{G_{14}} + \varepsilon_{G_{15}} - \varepsilon_{G_{16}}}{4} \\ \varepsilon_{M_y} = \dfrac{\varepsilon_{G_{17}} - \varepsilon_{G_{18}} + \varepsilon_{G_{19}} - \varepsilon_{G_{20}}}{4} \\ \varepsilon_{M_z} = \dfrac{\varepsilon_{G_{21}} - \varepsilon_{G_{22}} + \varepsilon_{G_{23}} - \varepsilon_{G_{24}}}{4} \end{cases} \tag{28}$$

جایی که $(\varepsilon_{G_1}, \dots, \varepsilon_{G_{24}})$، کرنش‌های اعمال شده بر کرنش‌سنج‌ها و $(\varepsilon_{F_x}, \dots, \varepsilon_{M_z})$ برآیند کرنش ایجاد شده در هریک از شش پل وتستون به ازای مؤلفه‌های بردار بار $\hat{f}$ است که سیگنال‌های معادل با این کرنش‌ها توسط رابطه (16) اندازه‌گیری می‌شود.

4- بهینه‌سازی سازه حسگر

4-1- فرمول‌بندی مسأله (انتخاب توابع هدف و قیدها)

کانگ و همکاران [32] در مطالعات خود توجه کافی به عملکرد ایمن حسگر نیرو/ گشتاور خود نداشته و از فرمول‌بندی قید حداکثر تنش اعمالی یا ایمنی در مسأله بهینه‌سازی صرف نظر کردند، اما در این‌جا قید حداکثر تنش اعمالی به عنوان یکی از قیدهای مهم طراحی مستقیماً فرمول‌بندی شده است؛ زیرا همان‌طور که از مطالعات دیگر مراجع مشخص است [19-22]، بدون در نظر گرفتن این موضوع عملاً هر نتیجه‌ای که حاصل شود چون شرایط واقعی را در نظر نگرفته است؛ بنابراین نتایج کمّی آن کاربردی و قابل استفاده نخواهد بود.

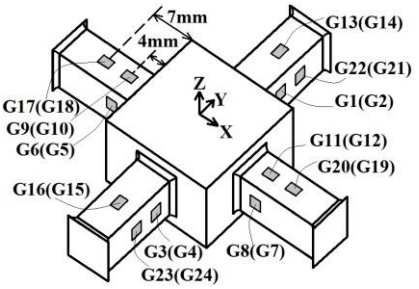


Fig. 4 Positions of all strain gauges on the beams

شکل 4 موقعیت همه کرنش‌سنج‌ها روی تیرها

همچنین در این مطالعه برای کاهش اثرات تمرکز تنش علاوه‌بر لبه‌های کناری، محل اتصال لبه‌های بالا و پایین تیرهای 1 تا 4 به بلوک وسط 5 و نیز به دیواره‌های فنری 7 گرد شده است. جنس سازه از آلیاژ آلومینیوم (7075-T6) است. ابعاد اولیه و چهار متغیر مستقل طراحی در شکل 5 نشان داده شده‌اند. متغیرهای b و h بیانگر عرض و ارتفاع تیرهای 1 تا 4 و متغیرهای t و H_m به ترتیب ضخامت و ارتفاع صفحه‌های فنری 7 هستند. ظرفیت بارگذاری طراحی حسگر مطابق رابطه (14) است. جایی که بارها در مبدأ دستگاه مختصات حسگر اعمال شده و صفحه زیرین حلقه 6 کاملاً مقید است.

پس مسأله بهینه‌سازی به این صورت فرمول‌بندی می‌شود که بردار X در رابطه (29) باید آن گونه یافت شود که بتواند تابع هدف $J(X)$ یعنی خطای تداخل اصلی در رابطه (30) را کمینه کند؛ با این شرط که قیدهای رفتار مکانیکی و مشخصات هندسی رابطه (31) برآورده شوند (همه ابعاد هندسی برحسب میلی‌متر است).

$$X = [X_1,\ X_2,\ X_3,\ X_4] = [b, h, t, H_m] \tag{29}$$

$$J(X)(\%) = \frac{|(CC)_{15}| + |(CC)_{24}|}{2} \times 100 \tag{30}$$

$$\begin{aligned} &350\mu\mathrm{m/m} \le \left(\varepsilon_{F_x}, \dots, \varepsilon_{M_z}\right) \le 860\mu\mathrm{m/m} \quad (i = 1, \dots, 6) \\ &\sigma_{\text{Von Mises}}^{\max} \le \sigma_Y/\mathrm{FS} \\ &4 \le b \le 14;\ 4 \le h \le 14; \\ &0.7 \le t \le 4;\ 12 \le H_m \le 22; \end{aligned} \tag{31}$$

جایی که $\sigma_{\text{Von Mises}}^{\max}$، σ_Y و FS به ترتیب بیشینه تنش فون‌میزس، تنش تسلیم و فاکتور ایمنی است. اندازه تنش تسلیم برای جنس انتخاب شده 503MPa است و فاکتور ایمنی عدد 2.5 انتخاب شد. بیشینه تنش فون‌میزس ایجاد شده در سازه حسگر در بحرانی‌ترین شرایط محاسبه می‌شود؛ یعنی زمانی که همه مؤلفه‌های بار N_f به آن اعمال شده است.

4-2- بهینه‌سازی با استفاده از روش اجزای محدود

در این مقاله به دلایل زیر از روش‌های تحلیلی برای شناخت رفتار مکانیکی سازه الاستیک حسگر استفاده نشده است: نخست سازه به نسبت پیچیده تیرهای متقاطع اصلاح شده که محل اتصال تیرهای 1 تا 4 در آن گرد شده است را نمی‌توان به راحتی براساس نظریه‌های الاستیسیته تحلیل کرد. دوم حتی اگر از فرضیات ساده‌کننده هم بدین منظور استفاده شود [31,24,21]، باز هم نتایج به‌دست‌آمده در بعضی ناحیه‌ها از پاسخ‌های واقعی دور بوده و به همین دلیل استفاده از آن توصیه نشده است [16]. سوم با وجود قید حداکثر تنش اعمالی، یافتن مکانی که بیشترین تنش فون‌میزس در آن‌جا ایجاد شده باشد و البته محاسبه صحیح مقدار آن در هندسه‌های پیچیده معمولاً غیرممکن یا دور از دسترس است. در این شرایط روش عددی اجزای محدود به عنوان یک راه‌حل توصیه شده [32,26,23,20-18,16] استفاده گردید. پس در نتیجه نمی‌توان مانند مرجع [31] از جعبه‌ابزار بهینه‌سازی متلب

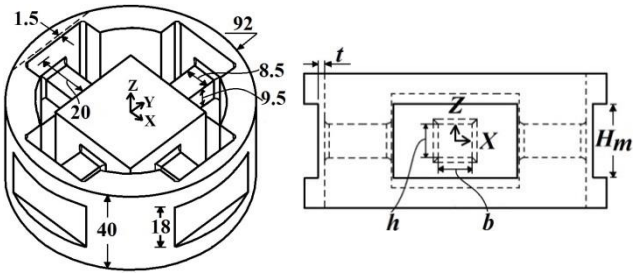


Fig. 5 Initial dimensions & design variables of the sensor in millimeters

شکل 5 ابعاد اولیه و متغیرهای طراحی حسگر بر حسب میلی‌متر

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.16.4]

استفاده کرد، بلکه یک الگوریتم مناسب ابتدا باید در متلب کد شده و با ایجاد ارتباط بین نرم‌افزارهای متلب و انسیس، بهینه‌سازی را اجرا کرد. شکل 6 چارچوب بهینه‌سازی عددی هندسه حسگر را نشان می‌دهد.

برای اجرای بهینه‌سازی الگوریتم برنامه‌نویسی درجه دوم متوالی (SQP) که برپایه گرادیان بنا نهاده شده انتخاب گردید. این روش یکی از کارآمدترین الگوریتم‌های کلاسیک برای حل مسأله‌های بهینه‌سازی غیرخطی مقید شناخته شده [41,40] که دارای قدرت و سرعت بالایی برای همگرای است [32,31]، همچنین دارای بهره‌وری مناسب از لحاظ تعداد محاسبات است [40]. مطابق با نمودار جریان فرآیند در شکل 6 پس از این‌که مسأله در گام‌های 1 و 2 فرمول‌بندی شد و متغیرهای اولیه بردار X حدس زده شدند، باید مقدار توابع هدف و قید در گام 3 محاسبه شوند. بدین منظور زیرتابع اجرای انسیس برای یافتن کرنش‌های مورد نظر و بیشینه تنش فون‌میزس در گام 4 فراخوانی می‌گردد. به دنبال آن در گام 5 فرآیند تحلیل اجزای محدود توسط دستور داس[1] در متلب اجرا شده تا این‌که داده‌های دلخواه به زیرتابع بازگشت داده شوند. گرادیان توابع هدف و قیدها یا به عبارت دیگر اطلاعات مرتبه اول از توابع به کمک روش تفاضل محدود [42] باید در گام 6 محاسبه شوند.

با این توضیح که هرگاه نیاز به محاسبه اندازه توابع و قید وجود داشته باشد، بی‌درنگ زیرتابع اجرای انسیس فراخوانی خواهد شد. در گام 7 ماتریس هسیان[2] (H) یا به عبارت دیگر اطلاعات مرتبه دوم از توابع مسأله تقریب زده می‌شود که کاربرد آن برای یافتن بردار جهت جستجو[3] (d) در گام 8 است که با حل زیر مسأله برنامه‌نویسی درجه دوم (QP) تحقق می‌یابد. برای تقریب H می‌توان از روش شبه نیوتنی[4] معروف به BFGS[5] استفاده کرد [41,40]. اما برای این‌که زیر مسأله (QP) یک پاسخ یکتا بدهد، باید اکیداً محدب[6] باشد که در این صورت مثبت و معین[7] نگه‌داشتن فرم ماتریس H اهمیت دارد

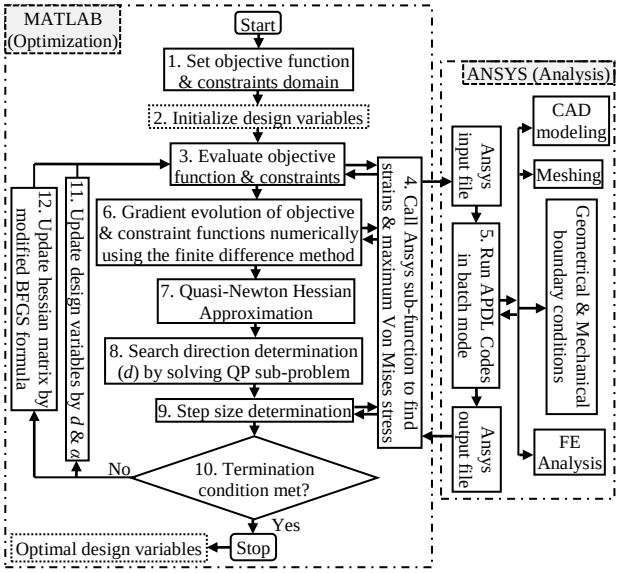


Fig. 6 Flow chart of numerical optimization of the sensor body with MATLAB and ANSYS

شکل 6 نمودار جریان بهینه‌سازی عددی هندسه حسگر با متلب و انسیس

[1] Dos
[2] Hessian
[3] Search direction vector
[4] Quasi-Newton
[5] Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)
[6] Strictly convex
[7] Positive definite

[40]. احتمال منفرد یا نامعین بودن ماتریس هسیانی که به روش BFGS برآورد می‌شود همواره وجود دارد [40] که برای غلبه بر این مشکل پائول [43] اصلاحاتی را برای روش استاندارد BFGS پیشنهاد داد. در این مقاله برای این‌که حتماً فرم ماتریس H مثبت و معین باشد روش اصلاح‌شده پائول به کار گرفته شده است. در مرحله 9 طول گام مناسب در جهت بردار d یعنی ضریب α تعیین می‌شود. بدین منظور از روش‌های جستجوی خط دقیق (درون‌یابی چندجمله‌ای[8]) استفاده شده است [41,40]. با هر تکرار در گام 10 چهار گزاره بررسی شده که پایان فرآیند بهینه‌سازی مشروط به برآورده شدن هم‌زمان همه آن‌هاست؛ وگرنه در گام‌های 11 و 12 متغیرهای طراحی و ماتریس هسیان به‌روز شده و به مرحله 3 بازگردانده می‌شوند. این چهار گزاره عبارت از تعداد چرخه‌های تکرار شده، میزان تخطی از قیدها[9]، اندازه بردار d و اندازه اختلاف بین بردارهای X^k و X^{k+1} که k شماره تکرارهاست. حد تحمل برای گزاره اول عدد 100، دو گزاره دوم و سوم $1e^{-5}$ و برای مورد چهارم $1e^{-2}$ تنظیم شده است.

برای افزایش صحت نتایج به‌دست‌آمده در تحلیل‌های اجزای محدود در گام 5 تدابیری اتخاذ شده است که شکل المان انتخاب شده[10] در سرتاسر مدل از نوع شش وجهی هشت گره‌ای[11] باشد (شکل 7). در مرحله مش‌زدن دو موضوع زیر اهمیت دارد: نخست این‌که برای کاهش زمان محاسبات در گام 5 از شکل 6، مش‌ها فقط در ناحیه‌های برخوردار از اهمیت بالاتر پالایش یابد. دوم این‌که مش‌بندی خودکار باید به ترتیبی باشد که پس از تغییر ابعاد هندسی سازه در هر تکرار کیفیت مش‌ها کاهش نیابد. همان‌طور که در شکل 7 نشان داده شده در خصوص موضوع اول، تیرهای 1 تا 4 و محل اتصالشان اهمیت بیشتری دارد؛ پس تعداد تقسیمات آن‌ها در مکان نصب کرنش‌سنج‌ها و لبه‌های گرد شده افزایش یافته و در هر بار فراخوانی انسیس میانگین کرنش‌های 10 عدد گره در بازه یک میلی‌متری گزارش می‌شود. برای موضوع دوم هر بخشی از سازه جداگانه مش‌بندی شده به طوری که انطباق صحیح بین مش‌ها در مرز بین نواحی مختلف امکان‌پذیر باشد. تعداد تقسیمات مش‌ها در هر بخش وابسته به طول ابعاد هندسی آن ناحیه خواهد بود.

5- نتایج بهینه‌سازی

نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از خطای تداخل اصلی به عنوان تابع هدف و اضافه نمودن قید حداکثر تنش اعمالی با فاکتور ایمنی $FS = 2.5$ در رابطه (31)، استحکام سازه بالا رفته و حساسیت کاهش می‌یابد؛ بنابراین پاسخ الگوریتم یعنی بردار X به بیرون از فضای قیدها انتقال می‌یابد. این موضوع از

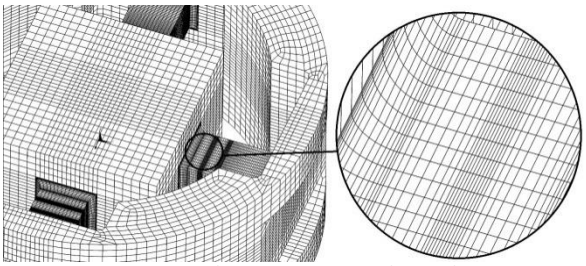


Fig. 7 FE mesh model of sensor & a picture from refined mesh in beams

شکل 7 حسگر مش‌بندی‌شده و تصویری از مش پالایش یافته در تیرها

[8] Polynomial Interpolation, Exact line search
[9] Constraint violation
[10] SOLID185
[11] Hexahedral (8-node brick)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.16.4]

جنبه فیزیکی می‌تواند هندسه مسأله را بی‌معنی کند (مثلاً ضخامت صفحه‌های فنری 7 منفی می‌شوند) و سبب توقف فرآیند بهینه‌سازی در مرحله (5) شود، همچنین با وجود قید حداکثر تنش اعمالی، کران‌های اولیه که برای محدوده ابعاد هندسی درنظر گرفته شده‌اند اجازه کاهش بیشتر خطای تداخل را نمی‌دهند. برای غلبه بر این موارد بازدارنده کران پایین قید حساسیت کرنش‌سنج‌ها و کران بالای قید ابعاد هندسی سازه به صورت رابطه (32) اصلاح و گسترده‌تر شده است.

$$\begin{aligned}&50\mu\text{m/m} \le \left(\varepsilon_{F_x},\dots,\varepsilon_{M_z}\right) \le 860\mu\text{m/m} \quad (i=1,\dots,6)\\&\sigma_{\text{Von Mises}}^{\max} \le \sigma_Y/\text{FS}\\&4 \le b \le 24;\ 4 \le h \le 24;\\&0.7 \le t \le 4;\ 12 \le H_m \le 32;\end{aligned} \tag{32}$$

در فرآیند بهینه‌سازی حسگر نیرو/ گشتاور شش محوره در این مقاله اگرچه از روش BFGS اصلاح شده پائول استفاده شده است [43]، اما باید از غیرمحلی یا سراسری[1] بودن پاسخ‌های بهینه اطمینان کافی حاصل شود. بدین منظور متغیرهای طراحی اولیه متفاوتی مطابق با جدول 2 انتخاب شد، همچنین در ابتدا تحلیل‌ها با اندازه مش درشت‌تری انجام گرفته تا فرآیند با اتلاف زمان بسیار کمتری به پاسخ بهینه نزدیک شود و از تکرار هشتم به بعد مش ظریف‌تر شده تا پاسخ دقیق‌تر حاصل شود.

برای حالت‌های مختلف جدول 2 مقدار تابع هدف و طول چهار متغیر طراحی پس از هر تکرار به ترتیب در شکل‌های 8-12 نشان داده شده است. همه نتایج بیانگر همگرایی عالی به یک پاسخ یکتاست که در جدول 3 گزارش شده‌اند.

نتایج شکل 8 نشان می‌دهد که ماکزیمم خطای تداخل اصلی حسگر نیرو/ گشتاور شش محوره به زیر 1.49% کاهش یافته است که با وجود انتخاب ضریب ایمنی 2.5 باز هم از نتایج کانگ و همکاران [32] کمتر است. همان‌طور که از شکل‌های 9 و 10 مشخص است، در همه حالت‌ها متغیرهای طراحی b و h به ترتیب به 15.89 و 15.74 همگرا شده‌اند. در شکل‌های 11 و 12 ضخامت صفحه‌های فنری t و ارتفاع آن‌ها H_m به ترتیب در همه حالت‌ها به 0.71 و 32.00 همگرا شده‌اند که این طول‌ها در واقع بسیار نزدیک به کران پایین t و کران بالای H_m است. این موضوع با نتیجه‌گیری مرجع [32] هم‌خوانی داشته و نشان می‌دهد هر چقدر این صفحات فنری انعطاف‌پذیری بیشتری داشته باشند، در عوض خطای تداخل نیز کمتر خواهد شد.

نتایج اجزای محدود برای طرح بهینه حسگر نیرو/ گشتاور شش محوره تحت بیشینه بارهای مجاز F_x، F_z، M_x و M_z به صورت بارگذاری جداگانه و هم‌زمان در شکل 13 نشان داده شده است. افزون بر این درایه‌های ماتریس انطباق بی‌بعد شده C و خطای تداخل محاسبه شده از رابطه (9) به ازای مؤلفه‌های بار مجاز اعمالی به حسگر بهینه در جدول 4 درج شده است.

بیشترین مقدار خطای تداخل اصلی برابر $(CC)_{15}$=1.49% است، همچنین شاخص η برای این حسگر برابر $\eta_{15} = 0.94\%$ است که در مقایسه با سایر مراجع اشاره شده در جدول 1 خطای تداخل پایینی را نشان می‌دهد. در نتیجه می‌توان گفت با اجرای فرآیند بهینه‌سازی صحت اندازه‌گیری این نوع حسگر با توجه به ظرفیت بارگذاریش افزایش یافته است.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله شاخصی جدید (η) برای مقایسه صحیح‌تر کیفیت حسگرهای نیرو/ گشتاور شش محوره پیشنهاد شده و سنجشی بین چند حسگر از نظر

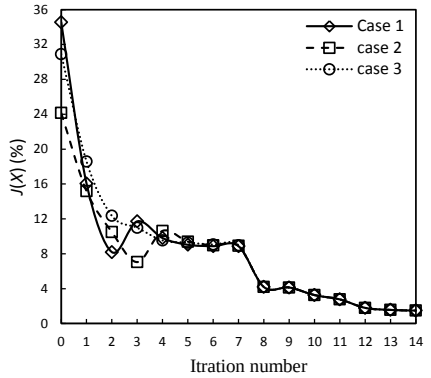


Fig. 8 Iteration history of objective function $J(X)$

شکل 8 مقدار تابع هدف $J(X)$ پس از هر تکرار

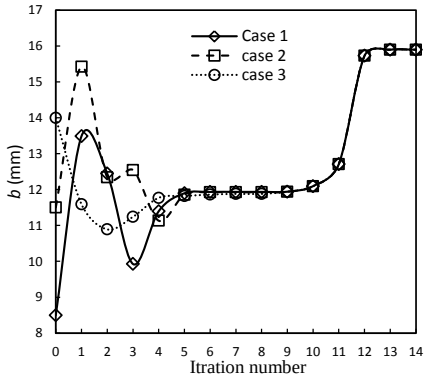


Fig. 9 Iteration history of design variable b

شکل 9 مقدار متغیر طراحی b پس از هر تکرار

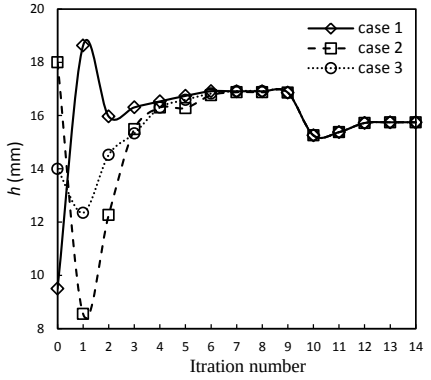


Fig. 10 Iteration history of design variable h

شکل 10 مقدار متغیر طراحی h پس از هر تکرار

جدول 2 سه حالت متفاوت برای متغیرهای طراحی اولیه

Table 2 Three different cases of initial design variables

H_m (mm)	t (mm)	h (mm)	b (mm)	حالت‌ها
18	1.5	9.5	8.5	1
24.5	0.7	18	11.5	2
28	3	14	14	3

جدول 3 متغیرهای طراحی بهینه شده

Table 3 Optimized design variables

$J(X)$	H_m (mm)	t (mm)	h (mm)	b (mm)	حالت‌ها
1.4868	32.0008	0.7194	15.7479	15.8961	1
1.4861	32.0007	0.7170	15.7480	15.8963	2
1.4855	32.0006	0.7183	15.7478	15.8960	3

[1] Global

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.16.4]

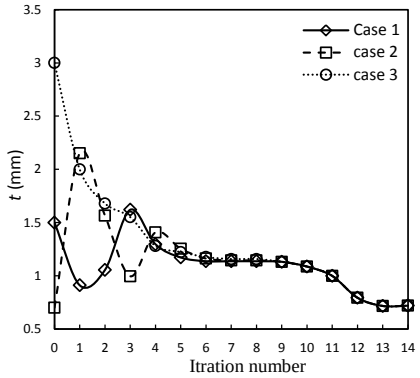


Fig. 11 Iteration history of design variable t

شکل 11 مقدار متغیر طراحی t پس از هر تکرار

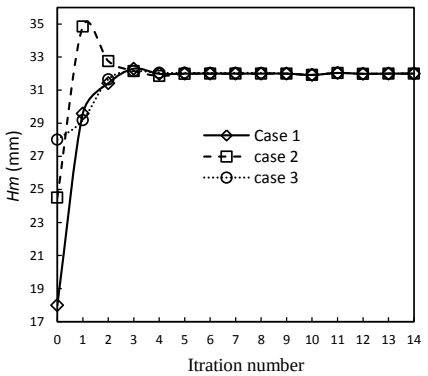
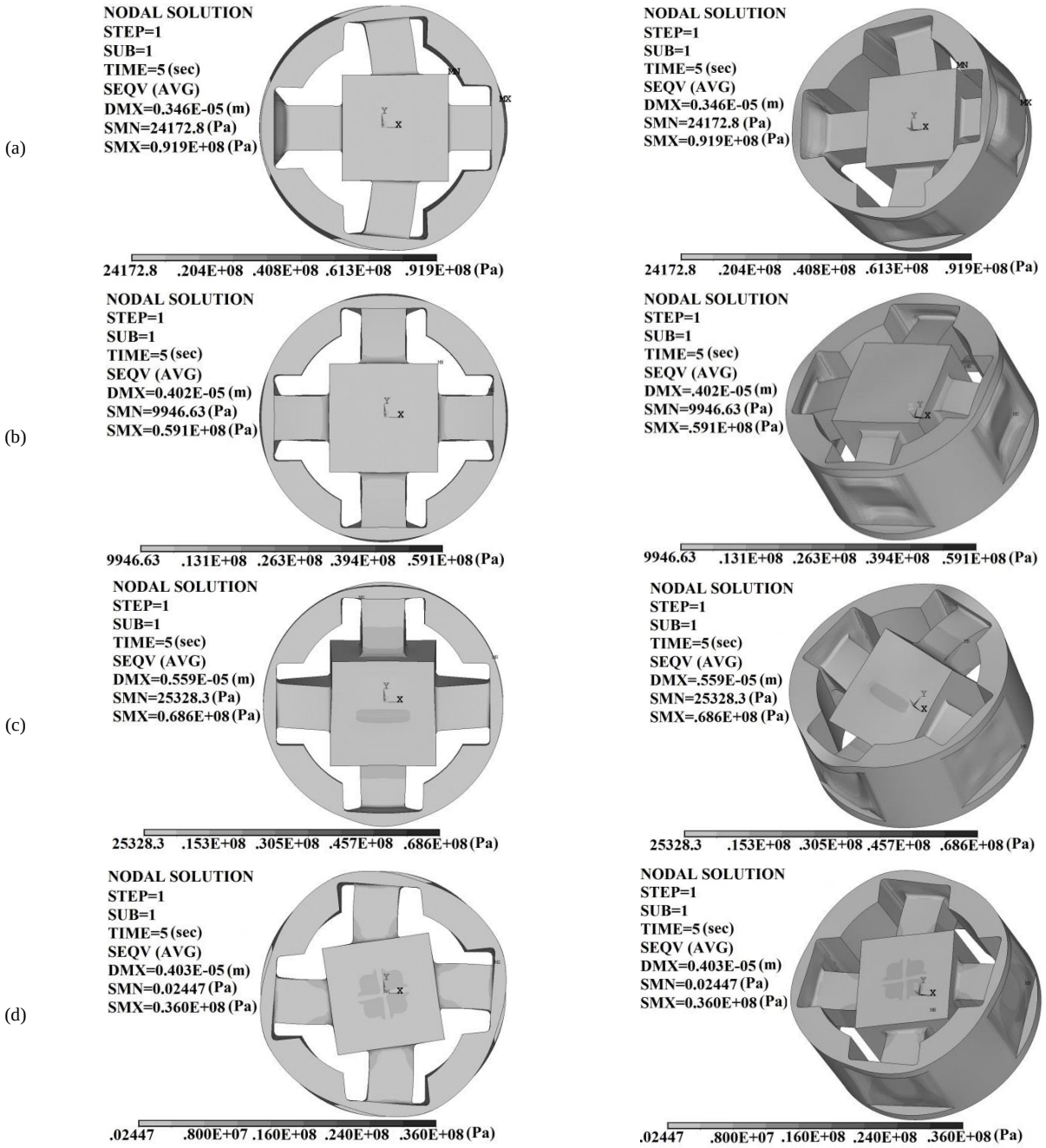


Fig. 12 Iteration history of design variable H_m

شکل 12 مقدار متغیر طراحی H_m پس از هر تکرار



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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.16.4]

(e)

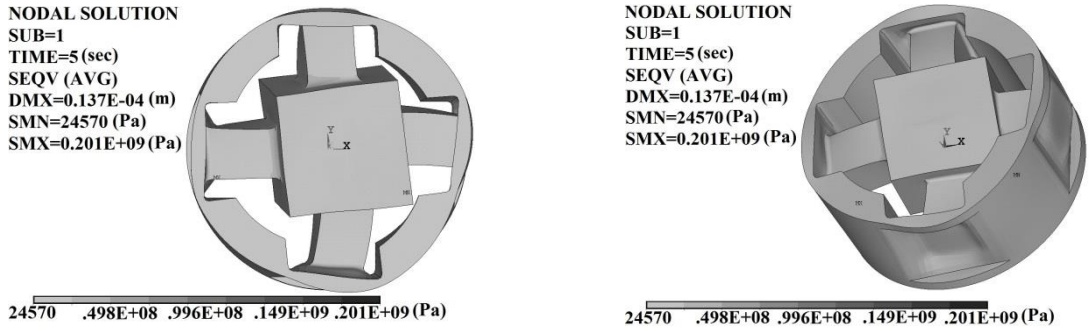


Fig. 13 FEM results of the optimally designed six-axis F/T sensor under each individual force and torque by scale factor 1000: (a) F_x = 400 N, (b) F_z = 800 N, (c) M_x = 40 Nm, (d) M_z = 40 Nm and (e) All allowable forces & torques simultaneously

شکل 13 نتایج تحلیل اجزای محدود حسگر نیرو/ گشتاور شش محوره بهینه‌شده تحت بارگذاری مستقل هر یک از نیروها و گشتاورهای مجاز با فاکتور مقیاس 1000 برای بارهای: (a) F_x = 400 N، (b) F_z = 800 N، (c) M_x = 40 Nm، (d) M_z = 40 Nm و (e) تحت بارگذاری هم‌زمان همه نیروها و گشتاورهای مجاز

جدول 4 درایه‌های ماتریس انطباق بی‌بعد شده C و خطای تداخل حسگر بهینه‌شده محاسبه شده با FEM

Table 4 Elements of dimensionless compliance matrix C and cross coupling error of optimum design calculated by FEM

M_z = 40Nm		M_y = 40Nm		M_x = 40Nm		F_z = 800N		F_y = 400N		F_x = 400N		شماره سطرها
$(CC)_{i6}$ (%)	C_{i6} (μm/m)	$(CC)_{i5}$ (%)	C_{i5} (μm/m)	$(CC)_{i4}$ (%)	C_{i4} (μm/m)	$(CC)_{i3}$ (%)	C_{i3} (μm/m)	$(CC)_{i2}$ (%)	C_{i2} (μm/m)	$(CC)_{i1}$ (**) (%)	C_{i1} (*) (μm/m)	(i)
-0.00	-0.0000	-1.49	-0.742	0.0009	0.0004	0	0	0.0053	0.0027	—	49.9418	1
-0.00	-0.0000	0.0009	0.0004	1.4868	0.7425	0	0	—	49.9418	-0.0053	-0.0027	2
0.000	0.0004	0.0000	0.0000	-0.000	-0.000	—	62.043	0	0	0	0	3
0	0	0.0000	0.0001	—	123.49	0	0	-0.281	-0.3464	-0.0000	-0.0000	4
0	0	—	123.49	-0.000	-0.000	0	0	-0.000	-0.0000	0.2805	0.3464	5
—	69.622	0	0	0	0	-0.00	-0.000	0	0	0	0	6

(*) درایه‌های اولین ستون از ماتریس انطباق بی‌بعدشده C در رابطه (7) که از منظر فیزیکی معادل با کرنش‌های مطلوب و مزاحم هستند که تحت نیروی F_x = 400N ایجاد می‌شوند.

(**) خطای تداخل ایجاد شده در هر یک از حسگرهای 2 تا 6 که مخصوص اندازه‌گیری نیروها و گشتاورهای F_y تا M_z است.

بیشینه خطای تداخل انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از این شاخص بیشینه خطای تداخل گزارش شده در مطالعات پیشین ممکن است بدون تغییر کوچک‌تر یا حتی بزرگ‌تر شود، همچنین در این مطالعه فرآیندی سیستماتیک به‌کار گرفته شده که می‌تواند روشی مؤثر برای بهینه‌سازی طراحی حسگرها فراهم کند. این شیوه بر مبنای الگوریتم برنامه‌نویسی درجه دوم متوالی (SQP) کد شده در متلب و استفاده از روش عددی اجزای محدود (FEM) در انسیس است. براین اساس، محقق می‌تواند توابع هدف و قید دلخواه و ساختارهای هندسی متفاوتی را انتخاب و به راحتی در فرآیند بهینه‌سازی آزمایش کند. با فرمول‌بندی خطای تداخل اصلی به عنوان تابع هدف، اعمال قید حداکثر تنش اعمالی با فاکتور ایمنی 2.5 و گسترش محدوده قیدهای مسأله فرآیند بهینه‌سازی عددی برای یک حسگر با هندسه تیرهای متقاطع اصلاح‌یافته اجرا شده است. نتایج نشان‌دهنده کاهش خطای تداخل اصلی زیر 1.49% است که می‌تواند صحت اندازه‌گیری این حسگرها را در کاربردهای دقیق‌تر افزایش دهد. برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی باید حسگر بهینه شده در این مقاله ساخته شود و تحت آزمایش‌های تجربی قرار گیرد که این موضوع از اهداف آینده این پژوهش است.

7- مراجع

[1] V. D. Scheinman, *Design of a Computer Controlled Manipulator*, PhD Thesis, University of Stanford, California, USA, 1969.

[2] B. Shimano, B. Roth, On force sensing information and its use in controlling manipulators, *Proceedings of the international symposium on Information-Control Problems in Manufacturing Technology*, Tokyo, Japan: IFAC, pp. 119-126, 1977.

[3] U. Kim, D. Lee, W. Yoon, B. Hannaford, H. Choi, Force sensor integrated surgical forceps for minimally invasive robotic surgery, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 31, No. 5, pp. 1214–1224, 2015.

[4] D. H. Lee, U. Kim, T. Gulrez, W. J. Yoon, B. Hannaford, H. R. Choi, A laparoscopic grasping tool with force sensing capability, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 21, No. 2, pp. 130-141, 2016.

[5] F. Becker, R. Jäger, F. Schmidt, B. Lapatki, O. Paul, Miniaturized Six-Degree of freedom force/moment transducers for instrumented teeth, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 17, No. 12, pp. 3644–3655, 2017.

[6] H. Ishidou, H. Takahashi, A. Nakai, T. Takahata, K. Matsumoto, I. Shimoyama, 6-Axis force/torque sensor for spike pins of sports shoes, *Proceedings of The 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Estoril, Portugal: IEEE Xplore, pp. 257-260, 2015.

[7] K. Yang, S. Ma, T. Wang, Y. Zhu, Design of a decoupled Six-axis force sensor for powered lower limb exoskeleton, *Proceedings of The International Conference on Computer Engineering, Information Science & Application Technology*, Guilin, China: CPCI, pp. 356-359, 2016.

[8] E. Moreira, L. F. Rocha, A. M. Pinto, A. P. Moreira, G. Veiga, Assessment of robotic picking operations using a 6 axis force/torque sensor, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 1, No. 2, pp. 768-775, 2016.

[9] C. Ren, Y. Gong, F. Jia, X. Wang, Theoretical analysis of a six-axis force/torque sensor with overload protection for polishing robot, *Proceedings of The 23rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, Nanjing, China, Nov 28-30, 2016.

[10] 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, No. 5, pp. 135–148, 2015.

[11] ATI Industrial Automation, *Multi-Axis Force/Torque Sensor*, Accessed 2017, http://www.ati-ia.com/products/ft/ft_literature.aspx.

[12] Q. Liang, D. Zhang, Q. Song, Y. Ge, H. Cao, Y. Ge, Design and fabrication of a six-dimensional wrist force/ torque sensor based on E-type membranes compared to cross beams, *Measurement*, Vol. 43, No. 10, pp. 1702-1719, 2010.

[13] Y. Sun, Y. Liu, M. Jin, H. Liu, Design of a novel Six-axis force/torque sensor based on strain gauges by finite element method, *Proceedings of The 11th World Congress on Intelligent Control and Automation Shenyang*, Shenyang, China, 29 Jun-04 Jul, 2014.

[14] 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, No 10, pp. 110–122, 2015.

[15] M. Uchiyama, Y. Nakamura, K. Hakomori, Evaluation of the robot force sensor structure using singular value decomposition, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 5, No. 1, pp. 4-10, 1987. (In Japanese); an English translation appeared: *Advanced Robotics*, *the Robotics Society of Japan*, Vol.

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.16.4]

muscular strength of human, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Bari, Italy: IEEE Xplore, pp. 428- 433, 2010.

[29] H. M. Kim, J. W. Yoon, G. S. Kim, Development of a six-axis force/moment sensor for a spherical-type finger force measuring system, *IET Science, Measurement and Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 96-104, 2012.

[30] H. S. Kim, G. S. Kim, Design of force sensors for the ankle rehabilitation robot of severe stroke patients, *Sensor Science and Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 148-154, 2016.

[31] 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.

[32] M. K. Kang, S. Lee, J. H. Kim, Shape optimization of a mechanically decoupled six-axis force/torque sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 209, No. 1, pp. 41-51, 2014.

[33] V. D. Scheinman, *A preliminary work on implementing a manipulator force sensing wrist*, AI Laboratory Report, Stanford University, California, USA, 1971.

[34] A. K. Bejczy, Smart sensors for smart hands, *Proceedings of AIAA-NASA Conference on Smart Remote Sensors*, Hampton, Virginia, USA, Nov 14-16, 1978.

[35] D. Gorinevsky, A. Formalsky, A. Schneider, *Force Control of Robotics Systems*, pp. 38-98, CRC press, Boca Raton, New York, 1997.

[36] M. Uchiyama, K. Kitagaki, Dynamic force sensing for high-speed robot manipulation using Kalman filtering techniques, *Proceedings of The 28th Conference on Decision and Control*, Tampa, FL, USA, Dec 13-15 ,1989.

[37] C. G. Kang, Maximum structural error propagation of multi-axis force sensors, *JSME International Journal Series C*, Vol. 44, No. 3, pp. 676-681, 2001.

[38] B. Wu, P. Cai, Decoupling analysis of a sliding structure six-axis force/torque sensor, *Measurement Science Review*, Vol. 13, No. 4, pp. 187-193, 2013.

[39] J. W. Joo, K. S. Na, D. I. Kang, Design and evaluation of a six-component load cell, *Measurement*, Vol. 32, No. 2, pp. 125-133, 2002.

[40] J. Arora, *Introduction to Optimum Design*, Fourth Edittion, pp. 511-600, Academic Press, 2017.

[41]J. Nocedal, S. Wright, *Numerical Optimization*, Second Edittion, pp. 529-561, Springer Press, London, 2006.

[42] G. Evans, J. Blackledge, P. Yardley, *Numerical Methods for Partial Differential Equation*, First Edition, pp. 29-59, Springer-Verlag, 2000.

[43] M. J. Powell, *A Fast Algorithm for Nonlinearly Constrained Optimization Calculations*, lecture Notes in Mathematics, Springer-Verlag, berlin, pp. 144-157, 1978.

5, No. 1, pp. 39-52, 1991.

[16] M. Uchiyama, E. Bayo, E. Palma-Villalon, A systematic design procedure to minimize a performance index for robot force sensors, *Dynamic Syste*, Vol. 113, No. 9, pp. 388-394, 1991.

[17] M. Svinin, M. Uchiyama, Optimal geometric structures of force/torque sensors, *Robotics Research*, Vol. 14, No. 6, pp. 560–573, 1995.

[18] E. Bayo, J. R. Stubbe, Six Axis force sensor evaluation and a new type of optimal frame/truss design for robotics applications, *Robotic Systems*, Vol. 6, No. 2, pp. 191-208, 1989.

[19] L. P. Chao, K. T. Chen, Shape optimal design and force sensitivity evaluation of six-axis force sensors, *Sensors & Actuators: A. Physical*, Vol. 63, No. 2, pp. 105–112, 1997.

[20] S. A. Liu, H. L. Tzo, A novel six-component force sensor of good measurement isotropy and sensitivities, *Sensors & Actuators: A. Physical*, Vol. 100, No. 2-3, pp. 223-230, 2002.

[21] G. R. Vossoughi, A. Selk Ghaffari, P. Rostami Yeganeh, Design, optimization and fabrication of a 6-DOF force sensor Part I: modeling, analysis of material strength and dimensions optimization, *Proceedings of The 13th Annual International Conference on Mechanical Engineering*, Isfahan, Iran, May 15-17, 2005. (in persian فارسی)

[22] G. R. Vossoughi, A. Selk Ghaffari, P. Rostami Yeganeh, Design, optimization and fabrication of a 6-DOF force sensor Part II: optimization by FEM, manufacturing and calibration, *Proceedings of the The 13th Annual International Conference on Mechanical Engineering*, Isfahan, Iran, May 15-17, 2005. (in persian فارسی)

[23] B. Wu, J. Luo, F. Shen, Y. Ren, Z. Wu, Optimum design method of multi-axis force sensor integrated in humanoid robot foot system, *Measurement*, Vol. 44, No. 9, pp. 1651-1660, 2011.

[24] G. S. Kim, D. L. Kang, S. H. Rhee, Design and fabrication of a six-component force/moment sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 77, No. 3, pp. 209-220, 1999.

[25] J. J. Park, G. S. Kim, Development of the 6-axis force/moment sensor for an intelligent robot's gripper, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 118, No. 1, pp. 127-134, 2005.

[26] G. S. Kim, Design of a six-axis wrist force/moment sensor using FEM and its fabrication for an intelligent robot, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 133, No. 1, pp. 27-34, 2007.

[27] G. S. Kim, H. J. Shin, J. W. Yoon, Development of 6-axis force/moment sensor for a humanoid robot's intelligent foot, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 141, No. 2, pp. 276-281, 2008.

[28] G. S. Kim, H. M. Kim, H. I. Kim, M. G. Pio, H. S. Shin, J. Yoon, Development of 6-axis force/moment sensor for measuring the fingers'

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.16.4]