

# طراحی و ساخت دستگاه Rate Table دومحوره برای آزمون حسگرهای شتابسنج میکروماشینی

استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، a.esmaili@uut.ac.ir

آرش اسماعیلی\*

استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، h.babazadeh@uut.ac.ir

حدیثه بابازاده

## چکیده

در این مقاله، طراحی و ساخت یک دستگاه Rate Table دو محوره کم‌هزینه و دقیق برای آزمون و تنظیم شتابسنج‌های خازنی میکروماشینی ارائه شده است. این دستگاه با بهره‌گیری از دو موتور پله‌ای، انکودر نوری، حلقه لغزنده و یک شتابسنج مرجع ارزان‌قیمت قادر به ایجاد حرکات زاویه‌ای کنترل‌شده در دو محور می‌باشد. نوآوری اصلی کار شامل ترکیب دقت قابل قبول با هزینه پایین، طراحی ماژولار و ساده، و استفاده از پردازش نرم‌افزاری با فیلتر میانگین متحرک است که امکان استخراج پارامترهای کلیدی حسگر مانند ضریب مقیاس، خطی بودن و شتاب بین‌محوری را فراهم می‌سازد. سیستم کنترلی بر پایه آردوینو طراحی شده و داده‌های شتابسنج تحت آزمون با داده‌های مرجع مقایسه می‌شوند. نتایج عملی نشان می‌دهند که دستگاه ساخته‌شده قادر است داده‌های دقیق و قابل اعتماد برای ارزیابی عملکرد حسگرها ارائه دهد و به عنوان یک ابزار کاربردی در آزمایشگاه‌های آموزشی و پژوهشی قابل استفاده است. **واژه‌های کلیدی:** تنظیم، شتابسنج خازنی، آزمون حسگر اینرسی، کنترل حرکت دو محوره، موتور پله‌ای، Rate Table.

## Design and Implementation of a Two-Axis Rate Table for Testing MEMS Accelerometers

**A. Esmaili**

Department of Electrical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

**H. Babazadeh**

Department of Electrical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

### Abstract

This paper presents the design and development of a low-cost and precise two-axis rate table for testing and calibrating MEMS capacitive accelerometers. The device employs two stepper motors, optical encoders, slip rings, and an inexpensive reference accelerometer, enabling controlled angular motions along two axes. The main innovation of this work lies in the combination of acceptable precision with low cost, a modular and simple design, and software processing using a moving average filter, which allows the extraction of key sensor parameters such as scale factor, linearity, and cross-axis sensitivity. The control system is based on an Arduino platform, and the data from the sensor under test are compared with the reference measurements. Experimental results demonstrate that the developed system is capable of providing accurate and reliable data for sensor performance evaluation and can serve as a practical tool in both educational and research laboratory environments.

**Keywords:** Calibration, Capacitive Accelerometer, Inertial Sensor Testing, Two-Axis Motion Control, Stepper Motor, Rate Table.

نوری دقیق و کنترل‌های میکروپروسسوری برای دستیابی به کنترل حرکتی دقیق استفاده شده است [۲].

شرکت آکترونیک نیز سری دستگاه‌هایی برای آزمون واحدهای اندازه‌گیری اینرسی (IMU) مبتنی بر فناوری میکروماشینی تولید کرده است. این دستگاه‌ها طراحی ماژولار داشته و برای استفاده در محیط‌های آزمایشگاهی ایده‌آل هستند. در طراحی بیشتر دستگاه‌های Rate Table از مکانیزم گیمبال به همراه سروموتور و انکودر دیجیتال کوادراتور بهره گرفته می‌شود تا بازخورد دقیقی از سرعت زاویه‌ای فراهم گردد [۳].

مطالعه‌ای که توسط راتو و همکاران ارائه شده، به بررسی طراحی و کنترل Rate Table برای تنظیم ژيروسکوپ‌های پهپادهای کوچک می‌پردازد و بر اهمیت تفرانس‌های مکانیکی تأکید می‌کند؛ به طوری که محور چرخش کاملاً عمود بر صفحه نصب حسگر باقی بماند. استفاده از مدل‌سازی بر پایه کامپیوتر و بکارگیری حلقه لغزنده برای چرخش پیوسته بدون پیچ‌خوردگی کابل‌ها نیز از موارد مهم در افزایش قابلیت

### ۱- مقدمه

دستگاه Rate Table ابزاری است برای شبیه‌سازی حرکات زاویه‌ای کنترل‌شده حول یک یا چند محور، که نقش حیاتی در آزمون و تنظیم تجهیزات ناوبری و حسگرهای حرکتی ایفا می‌کند. یکی از کاربردهای اصلی این دستگاه، تنظیم حسگرهای اینرسی نظیر ژيروسکوپ و شتابسنج است. با اعمال حرکات دقیق و کنترل‌شده، عملکرد این حسگرها می‌تواند با دقت ارزیابی و تنظیم گردد.

دسته‌بندی Rate Table‌ها معمولاً بر اساس تعداد محورهای متحرک انجام می‌شود: یک‌محوره، دومحوره، سه‌محوره و چندمحوره. بر اساس کاتالوگ شرکت ایده‌آل آرواسمیت برای سری P2001، این دستگاه‌ها توانایی ایجاد حرکات موقعیتی، سرعتی و شتابی با دقت و نرمی بالا در یک محور را دارند که آن‌ها را برای توسعه و آزمون حسگرها مناسب می‌سازد [۱]. سری P2002 همین شرکت نیز امکان تولید حرکت‌های مشابه در دو محور را دارد و در آن‌ها از انکودرهای

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.esmaili@uut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۴/۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش: ۰۴/۰۷/۰۷

اطمینان این سیستم‌هاست [۴].

ویژگی‌های دینامیکی مانند کنترل نرم و دقیق سرعت، اعوجاج حداقلی و موقعیت‌یابی دقیق برای شبیه‌سازی شرایط واقعی عملکرد حسگرها بسیار حائز اهمیت است. برای مثال، در دستگاه سری AC2247 از شرکت آکترونیک از موتورهای بدون جاروبک استفاده شده که موجب افزایش دقت و کاهش نویز الکتریکی می‌شود [۵]. و یا دستگاه‌های شرکت هئوس قابلیت موقعیت‌یابی، کنترل سرعت و حرکت نوسانی را با دقت بالا و کنترل کامپیوتری فراهم می‌کنند. دستگاه‌های سری ایمپالس نیز به دلیل طراحی ماژولار و انعطاف‌پذیری بالا، امکان تطبیق با نیازهای مختلف صنعتی را فراهم کرده‌اند [۶].

در مطالعاتی که توسط دانگ و همکاران صورت گرفته، نشان داده شده است که دقت تنظیم واحد اندازه‌گیری اینرسی وابسته به خطای Rate Table است و روش‌هایی برای جبران این خطاها پیشنهاد شده‌اند [۷]. همچنین، مطالعه وائو و همکاران به معرفی روشی برای افزایش دقت زاویه‌ای از طریق تخمین و جبران خطای انکودر در طول یک چرخش کامل پرداخته است [۸]. مطالعه ژنگ و همکاران نیز به عدم کفایت روش‌های خطی تنظیم برای واحد‌های اندازه‌گیری‌های ارزان‌قیمت با ضرایب مقیاس غیرخطی اشاره دارد و راه‌حلی مبتنی بر الگوهای حرکتی خاص پیشنهاد می‌دهد [۹]. مقاله لوو و همکاران نیز الگوریتم بهینه‌سازی خودکار برای تنظیم میزهای دومحوره ارائه کرده‌اند که دقت تنظیم را با پیچیدگی زیاد افزایش می‌دهد [۱۰].

روش نوآورانه‌ای برای تنظیم سریع انحراف سیستم‌های ناوبری اینرسی در شرایط غیر آزمایشگاهی توسط ژائو و همکاران ارائه شده که بر اساس چرخش دوره‌ای صحیح با استفاده از یک میز چرخان سروو تک‌محوره است. این روش با بهره‌گیری از ویژگی‌های تصویر نرخ چرخش زمین و شتاب گرانش روی محور افقی، جبران محیطی و انگرال‌گیری دوره ربعی را انجام می‌دهد ولی دقتی معادل روش سنتی ۱۲ موقعیت دارد [۱۱].

در تحقیقی که توسط سان و همکاران انجام شده به توسعه سیستم اندازه‌گیری وضعیت مبتنی بر سامانه‌های میکروماشینی اینرسی می‌پردازد که با استفاده از چرخش چند موقعیتی، خطاهای مهم حسگر مانند انحراف، ضریب مقیاس و کج‌راستایی را کالیبره و جبران می‌کند. با این حال محدودیت‌هایی مثل وابستگی عملکرد سیستم به دقت چرخش دارد که ممکن است در برخی کاربردها دچار خطا شود [۱۲].

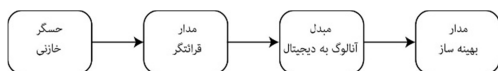
در این مقاله، فرآیند طراحی، ساخت و آزمون یک دستگاه Rate Table دو محوره با هدف ارزیابی عملکرد شتاب‌سنج‌های خازنی میکروماشینی ارائه شده است. ایده‌ی اصلی، توسعه‌ی سیستمی مقرون‌به‌صرفه بدون کاهش دقت عملکرد است. به‌منظور بهبود دقت اندازه‌گیری، کاهش خطاها به‌صورت نرم‌افزاری و با بهره‌گیری از فیلتر میانگین‌گیری متحرک (Moving Average) انجام شده است.

در ابتدا، اصول عملکرد و ساختار شتاب‌سنج‌های خازنی معرفی شده و انواع مختلف این حسگرها شامل نوع تک‌انتهایی، دیفرانسیلی و تمام‌دیفرانسیلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. عملکرد حسگرهای دیفرانسیلی با تمرکز بر تغییر فاصله بین صفحات خازن و تبدیل آن به سیگنال الکتریکی تشریح شده است. سپس، اهمیت پارامترهایی نظیر ضریب مقیاس، خطی بودن پاسخ، رنج دینامیکی و شتاب متقاطع در

تحلیل عملکرد حسگر بیان گردیده و نقش کلیدی دستگاه Rate Table در اعمال شتاب‌های دقیق و کنترل‌شده به حسگر و اندازه‌گیری این پارامترها تبیین شده است. در ادامه، طراحی و پیاده‌سازی دستگاه آزمون با قابلیت چرخش در دو محور تشریح می‌شود. این سامانه شامل بخش سخت‌افزاری (قاب چرخان، موتور پله ای، بردهای آردوینو و حسگر مرجع) و بخش نرم‌افزاری (برنامه‌نویسی جهت کنترل موتور، جمع‌آوری داده‌ها و نمایش گرافیکی نتایج) است. در پایان، نتایج آزمایش عملی بر روی یک نمونه شتاب‌سنج خازنی ارائه شده و عملکرد دستگاه از نظر دقت و صحت با مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده با اطلاعات برگه مشخصات فنی حسگر ارزیابی گردیده است.

## ۲- حسگر خازنی

در ابتدا، ساختار پایه‌ی یک حسگر خازنی الکترونیکی، مطابق با شکل ۱، معرفی می‌شود. این سامانه شامل یک حسگر خازنی، مدار قرائت‌گر و مدارات واسط مربوطه است. تغییرات ظرفیت خازنی ناشی از تغییر کمیت فیزیکی مورد اندازه‌گیری (مانند فشار، شتاب، رطوبت و غیره) بوده و مدار قرائت‌گر این تغییرات را به یک پارامتر الکتریکی نظیر ولتاژ یا جریان تبدیل می‌کند. در برخی ساختارها، یک مبدل آنالوگ به دیجیتال نیز برای تبدیل سیگنال‌های آنالوگ به مقادیر دیجیتال معادل به‌کار گرفته می‌شود. استفاده از این تبدیل دیجیتال، امکان تحلیل‌های عددی پیشرفته مانند بهبود خطیّت پاسخ یا افزایش رنج دینامیکی را فراهم می‌سازد.



شکل ۱- بلوک دیاگرام کلی یک حسگر خازنی

حسگرهای خازنی را می‌توان بر اساس نحوه‌ی سیگنال‌دهی به سه دسته‌ی اصلی تقسیم نمود: تک‌انتهایی، دیفرانسیلی، و تمام‌دیفرانسیلی [۱۳]. در نوع تک‌انتهایی، معمولاً یک صفحه‌ی ثابت وجود دارد که یک صفحه‌ی متحرک نسبت به آن جابه‌جا می‌شود و این جابه‌جایی منجر به تغییر ظرفیت خازن می‌گردد. در ساختار دیفرانسیلی، یک صفحه‌ی متحرک میان دو صفحه‌ی ثابت حرکت می‌کند و سبب تغییر همزمان ظرفیت در دو طرف می‌شود. در حسگرهای تمام‌دیفرانسیلی، چهار خازن به‌صورت دو به دو به‌صورت دیفرانسیلی عمل می‌کنند که در نتیجه، پاسخ خطی‌تری نسبت به دو ساختار پیشین فراهم می‌سازند. برای تحلیل عملکرد این نوع حسگرها، می‌توان از مدل خازن با صفحات موازی استفاده کرد ( $C = \epsilon A/d$ )، که بر این اساس، دسته‌بندی دیگری از حسگرهای خازنی به‌شرح زیر قابل ارائه است: حسگرهای مبتنی بر تغییر فاصله بین صفحات، حسگرهای مبتنی بر تغییر مساحت صفحات، حسگرهای مبتنی بر تغییر ثابت گذردهی الکتریکی محیط. حسگرهای مورد استفاده در شتاب‌سنج‌های خازنی عمدتاً از نوع اول یا دوم هستند، در حالی‌که حسگرهای مبتنی بر تغییر ثابت گذردهی اغلب در کاربردهای شیمیایی به‌کار می‌روند؛ جایی که تغییر خواص ماده‌ی دی‌الکتریک بین صفحات خازن، ظرفیت آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

متفاوت، قابل مشاهده است. از این رو، به منظور ارزیابی خطی بودن عملکرد یک شتاب‌سنج، نیاز به سامانه‌ای وجود دارد که بتواند مقادیر شتاب دقیقی را در بازه عملکرد حسگر ایجاد نماید و امکان اندازه‌گیری دقیق این پارامتر را فراهم سازد. این وظیفه توسط دستگاهی تحت عنوان Rate Table انجام می‌شود که در ادامه مقاله، نحوه طراحی، پیاده‌سازی و عملکرد آن به تفصیل تشریح خواهد شد.

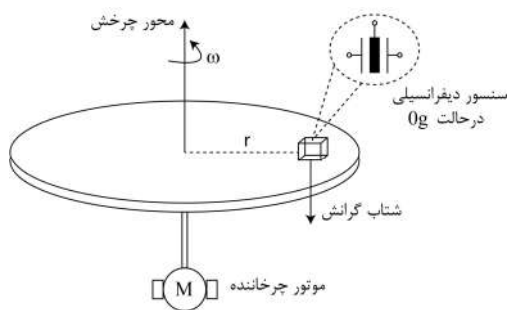
### ۳- دستگاه اندازه‌گیری کارایی شتاب‌سنج خازنی

به منظور ارزیابی عملکرد یک حسگر شتاب‌سنج، پارامترهای متعددی از جمله بازه اندازه‌گیری، ضریب مقیاس، شتاب بین‌محوری، حساسیت نسبت به دما و ... مورد توجه قرار می‌گیرند. هر یک از این پارامترها مستلزم طراحی و اجرای آزمون‌هایی با پیکربندی مناسب هستند. در این میان، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های یک حسگر خازنی، ضریب مقیاس (Scale Factor) آن است که به‌عنوان شاخصی از میزان پاسخ حسگر به ورودی مکانیکی تعریف می‌شود. این ضریب به‌طور کلی در دو سطح زیر تعریف می‌گردد: حساسیت مکانیکی که رابطه بین شتاب اعمالی و جابجایی ایجادشده در الکتروود متحرک را توصیف می‌کند؛ و حساسیت الکتریکی که رابطه بین جابجایی مکانیکی و تغییرات کمیت الکتریکی (مانند ولتاژ خروجی) را نشان می‌دهد:

$$S_{mech} \triangleq \frac{\Delta C}{\Delta a} F/g \quad (4)$$

$$S_{elec} \triangleq \frac{\Delta V}{\Delta a} V/g \quad (5)$$

برای اندازه‌گیری پارامترهای حساسیت مکانیکی و الکتریکی، لازم است شتاب مشخصی به حسگر وارد شده و سپس تغییرات مربوط به ظرفیت خازنی یا ولتاژ خروجی آن ثبت گردد. به‌منظور اعمال شتاب‌های کنترل‌شده، عموماً از نیروی جانب مرکز بهره گرفته می‌شود.



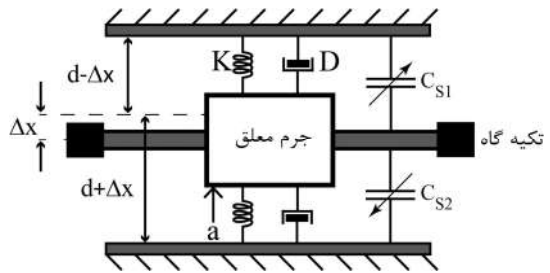
شکل ۳- نحوه عملکرد یک دستگاه rate table با استفاده از شتاب جانب مرکز

شکل ۳ نمای کلی یک سامانه Rate Table را نمایش می‌دهد. در صورتی که صفحه گردان این دستگاه به‌طور کامل افقی تنظیم گردد، نیروی گرانش زمین به‌صورت دائم ولی خارج از محور حسگر وارد می‌شود. از آن‌جا که این نیرو در راستای عمود بر صفحات خازن عمل می‌کند، بر عملکرد حسگر تأثیرگذار نخواهد بود. بنابراین، تراز دقیق صفحه گردان نسبت به سطح افق از اهمیت بالایی برخوردار است. با تنظیم سرعت چرخش صفحه گردان، می‌توان شتاب شعاعی مؤثر بر

این ویژگی نیز خود، طبقه‌بندی دیگری از حسگرهای خازنی را ایجاد می‌کند.

شتاب‌سنج، ژيروسکوپ، حسگر فشار و میکروفون از جمله حسگرهایی هستند که معمولاً بر مبنای تغییر فاصله‌ی بین صفحات خازن عمل می‌کنند و غالباً با استفاده از فناوری‌های میکروماشینی در ابعاد میکرونی ساخته می‌شوند.

برای طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری، ساختار حسگر خازنی دیفرانسیلی به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شده است. این انتخاب از آن جهت انجام شده که با زمین کردن یکی از الکتروودها، امکان آزمون حسگرهای تک‌انتخابی نیز فراهم می‌شود. همچنین، با انجام دو مرحله اندازه‌گیری مستقل، می‌توان عملکرد حسگرهای تمام‌دیفرانسیلی را نیز مورد ارزیابی قرار داد. بدین ترتیب، استفاده از ساختار دیفرانسیلی، پوشش وسیع‌تری از انواع متداول حسگرهای خازنی را امکان‌پذیر می‌سازد.



شکل ۲- طرحواره یک حسگر شتاب‌سنج خازنی دیفرانسیلی

شکل ۲ نمای کلی یک شتاب‌سنج خازنی دیفرانسیلی مبتنی بر تغییر فاصله را نشان می‌دهد. در این ساختار، شتاب اعمال شده (a) موجب جابه‌جایی Δx در الکتروود متحرک (فک متغیر) واقع در میان دو الکتروود ثابت بالا و پایین می‌گردد. این جابه‌جایی سبب ایجاد تغییرات متفاوت در ظرفیت خازنی دو طرف می‌شود. مقدار این تغییر ظرفیت خازنی در هر سمت را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

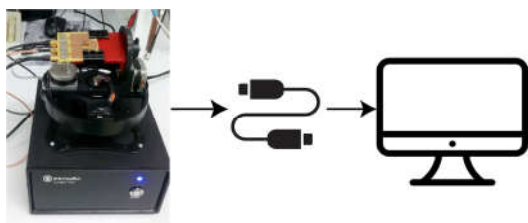
$$\Delta C_1 = C_{S1} - C_0 = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta x}{d}} - C_0 = C_0 \times \frac{\frac{\Delta x}{d}}{1 - \left(\frac{\Delta x}{d}\right)} \quad (1)$$

$$\Delta C_2 = C_{S2} - C_0 = \frac{C_0}{1 + \frac{\Delta x}{d}} - C_0 = C_0 \times \frac{-\frac{\Delta x}{d}}{1 + \left(\frac{\Delta x}{d}\right)} \quad (2)$$

اگر  $\Delta x/d \ll 1$  باشد، می‌توان تغییرات کلی خازن را به صورت زیر تقریب زد:

$$\Delta C = \Delta C_1 - \Delta C_2 = 2C_0 \times \frac{\frac{\Delta x}{d}}{1 - \left(\frac{\Delta x}{d}\right)^2} \approx 2C_0 \times \frac{\Delta x}{d} \quad (3)$$

سپس، تغییرات ظرفیت خازنی حاصل از جابه‌جایی الکتروود متحرک توسط مدار قرائت‌گر، که معمولاً یک تقویت‌کننده ترامقاومتی است، به یک کمیت الکتریکی (ولتاژ) قابل اندازه‌گیری تبدیل می‌شود. همانطور که در معادله (۳) نشان داده شده است، تغییرات ظرفیت خازنی به‌صورت تابعی غیرخطی از Δx ظاهر می‌شود. محاسبات ارائه‌شده تاکنون برای حالتی با الکتروود شناور انجام شده‌اند، اما این رفتار غیرخطی در سایر ساختارهای حسگرها نیز، هرچند با مکانیسم‌های

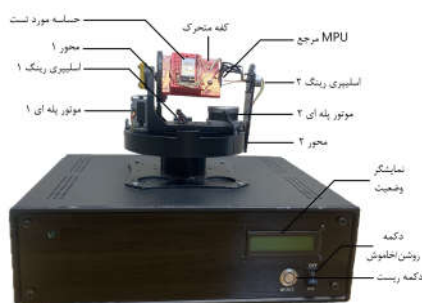


شکل ۵- ساختار کلی دستگاه ساخته شده و نحوه ارتباط سخت افزار و نرم افزار

در این پژوهش، یک دستگاه آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد شتابسنج در بازه  $\pm 1g$  طراحی و پیاده‌سازی شده است. این دستگاه، با دریافت دستور از نرم‌افزار کنترلی، فرآیند چرخش را آغاز کرده و داده‌های حاصل از حسگر را جهت تحلیل و پردازش به رایانه ارسال می‌نماید. ساختار کلی سامانه شامل دو بخش اصلی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری است. همان‌طور که در شکل ۵ نمایش داده شده، بخش سخت‌افزاری پس از دریافت فرمان از نرم‌افزار، عملیات حرکتی را آغاز می‌کند و امکان چرخش حول دو محور مجزا را داراست. در حین دوران، داده‌های مورد نیاز از حسگر استخراج شده و به‌صورت بلادرنگ به نرم‌افزار منتقل می‌شود. پس از انجام تحلیل‌های لازم بر روی داده‌های دریافتی، نتایج به دو صورت گرافیکی و داده خام قابل ذخیره‌سازی ارائه می‌گردد تا امکان بررسی و تحلیل دقیق‌تر در نرم‌افزارهای جانبی نیز فراهم باشد.

### ۳-۱- سخت افزار دستگاه

سخت‌افزار طراحی شده به همراه اجزای مختلف آن در شکل ۶ نمایش داده شده است. به‌منظور کاهش نویز ناشی از نوسانات برق شهر، در بخش تغذیه از یک باتری ۶ ولتی استفاده شده است. این باتری از طریق آداپتور به برق شهر متصل بوده و در زمان استفاده از دستگاه، انرژی لازم را بدون وابستگی مستقیم به شبکه تأمین می‌نماید. بدین ترتیب، منابع تغذیه حساس نظیر مدارهای اندازه‌گیری و پردازشی از نویزهای فرکانس پایین و اعوجاج‌های معمول در برق شهری مصون مانده و پایداری عملکرد سیستم افزایش می‌یابد.



شکل ۶- دستگاه Rate Table ساخته شده

### الف) قاب چرخان دو محوره

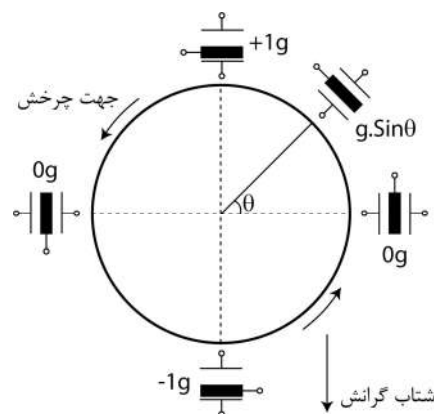
به‌منظور ارزیابی عملکرد شتابسنج در برابر شتاب‌های خارج از محور، لازم است علاوه بر امکان چرخش در راستای موازی با بردار

حسگر را کنترل و تغییر داد. این شتاب با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$a = r\omega^2 \quad (6)$$

که در آن  $r$  فاصله حسگر از مرکز صفحه گردان (شفت موتور) و  $\omega$  سرعت چرخش زاویه ای است.

بنابراین، با ثابت نگاه داشتن شعاع و تنظیم سرعت چرخش موتور، می‌توان بازه‌ای از شتاب‌های مورد نیاز برای آزمون حسگر را به‌صورت کنترل شده ایجاد کرده و تغییرات ظرفیت خازنی متناظر را ثبت نمود. با استفاده از داده‌های حاصل از این آزمایش، پارامترهای عملکردی حسگر از جمله ضریب مقیاس، میزان غیرخطیت، رنج دینامیکی و شتاب بین‌محوری قابل استخراج خواهند بود. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، به‌منظور افزایش دقت اندازه‌گیری، ملاحظاتی همچون حذف ارتعاشات ناخواسته و حفظ تراز کامل دستگاه در حین عملکرد باید در طراحی و ساخت دستگاه لحاظ گردد. بر این اساس، دستگاه ساخته شده معمولاً از ساختاری نسبتاً سنگین با پایه‌های قابل تنظیم برای دستیابی به تراز دقیق برخوردار است.



شکل ۴- نمای کلی یک rate table برای آزمایش  $\pm 1g$

برای اندازه‌گیری پارامترهای عملکردی شتابسنج در بازه محدود  $\pm 1g$  ، نیازی به ایجاد شتاب مصنوعی از طریق چرخش صفحه گردان نیست و می‌توان از شتاب گرانشی زمین به‌عنوان مرجع استفاده نمود. شکل ۴ نحوه عملکرد این روش را نمایش می‌دهد. زمانی که حسگر در وضعیت افقی ( $\theta = 0^\circ$ ) قرار دارد، مؤلفه گرانشی در راستای محور حساسه صفر بوده و در نتیجه جابه‌جایی  $\Delta x$  نیز صفر است. با چرخش تدریجی دستگاه و تغییر زاویه  $\theta$ ، مؤلفه‌ای از شتاب گرانشی به‌صورت  $g \cdot \sin(\theta)$  به حسگر اعمال می‌شود. در موقعیت عمودی ( $\theta = 90^\circ$ )، این مؤلفه به حداکثر مقدار خود، یعنی  $1g$ ، می‌رسد. در نتیجه، با انجام یک چرخش کامل  $360^\circ$  درجه، اگر پاسخ حسگر به شتاب خطی باشد، خروجی آن باید تغییراتی سینوسی مشابه تابع  $\sin(\theta)$  نشان دهد. با تحلیل این خروجی از طریق تبدیل فوریه (FFT)، می‌توان پارامترهایی نظیر خطی بودن حساسه، رنج دینامیکی، شتاب بین‌محوری و ضریب مقیاس را در بازه  $\pm 1g$  با دقت بالا استخراج نمود.

همان‌طور که می‌دانیم، برای انجام آزمایش‌های شتاب‌سنج، به یک شتاب‌سنج مرجع نیاز است. این شتاب‌سنج مرجع، علاوه بر کمک به آفست‌گیری و تراز کردن دستگاه، در هر لحظه و در حین چرخش حول هر دو محور، سرعت و شتاب را در سه محور فضایی اندازه‌گیری می‌کند. داده‌های استخراج شده از شتاب‌سنج تحت آزمایش، با داده‌های این شتاب‌سنج مرجع مقایسه و ارزیابی می‌شود. برای پیاده‌سازی شتاب‌سنج مرجع، از ماژول MPU6050 که یک شتاب‌سنج سه‌محوره و ژيروسکوپ داخلی است، به همراه برد آردوینو نانو استفاده گردیده است. شکل ۸، طرحواره مدار ساخته شده و نحوه اتصالات را نمایش می‌دهد. ارتباط بین MPU6050 و برد آردوینو به صورت سریال بوده و با استفاده از برنامه‌نویسی مناسب، داده‌های مربوط به موقعیت، سرعت زاویه‌ای و شتاب از شتاب‌سنج مرجع خوانده شده و به صورت بلادرنگ در محیط نرم‌افزاری قابل دسترسی خواهد بود. این داده‌ها سپس به محیط گرافیکی طراحی شده در نرم‌افزار متن‌باز Processing ارسال می‌شوند تا علاوه بر نمایش آن‌ها بر روی صفحه، نمودار و شمای گرافیکی کفه گردان نیز در اختیار کاربر قرار گیرد. کدهای نوشته شده برای استخراج مختصات، به دلیل ساختار تراشه، از کواترنیون‌ها برای محاسبه موقعیت استفاده می‌کنند که در کد منبع این تراشه قابل مشاهده است.

کدهای نوشته شده برای استخراج مختصات، متناسب با ساختار تراشه مورد استفاده، از کواترنیون‌ها برای محاسبه موقعیت بهره می‌برند که این موضوع در کد منبع تراشه مرجع نیز مشهود است. البته تراشه‌های دیگری با دقت بالاتر نیز موجود است که از جمله می‌توان به خانواده ADXL شرکت Analog Devices اشاره کرد. با این حال، به دلیل محدود بودن رنج اندازه‌گیری ( $\pm 1g$ )، تفاوت قابل توجهی بین این تراشه‌ها مشاهده نمی‌شود. از این رو و با توجه به هدف مقرون به صرفه بودن، دستگاه ساخته شده مبتنی بر MPU6050 انتخاب گردیده است. برای کنترل موتورهای پله ای، از برد افزونه CNC مخصوص آردوینو به همراه برد توسعه آردوینو اونو استفاده شده است. شکل ۹ نحوه اتصال این برد به آردوینو و اجزای مختلف سیستم را نمایش می‌دهد. برد افزونه CNC قابلیت راه اندازی همزمان چهار موتور را دارد؛ اما در این پروژه تنها از دو موتور استفاده شده است. ماژول راه اندازی موتورهای پله ای، ماژول ۱۲ ولتی DRV8825 می‌باشد. برنامه کنترلی مربوط به هدایت موتورها به صورت مجزا و برای این برد نوشته شده است که در آن، نحوه و جهت چرخش در هر دو محور و همچنین شیوه ارتباط برد با نرم‌افزار کنترل، کدنویسی شده است.

برد سوم جهت کنترل کلی دستگاه در نظر گرفته شده است و وظیفه نمایش هشدارها و اعلان‌های دستگاه را بر روی یک نمایشگر LCD بر عهده دارد. علاوه بر این، عملیات ریست دستگاه نیز از طریق این برد انجام می‌شود. به عبارت دیگر، این برد وضعیت کلی دستگاه را نظارت می‌کند و در صورت بروز هر گونه خطا یا مشکل، هشدارهای لازم را به کاربر ارائه می‌دهد. این برد نیز از نوع آردوینو اونو بوده و به صورت ارتباط سریال با رایانه در تعامل است.

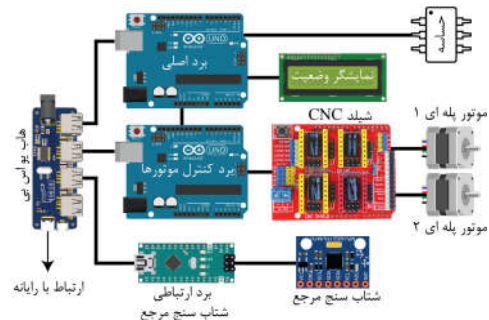
تمامی بردهای مورد استفاده برای ارتباط با رایانه و نرم‌افزار مربوطه از پورت USB بهره می‌برند. به منظور جلوگیری از اشغال تمامی پورت‌های رایانه، درون دستگاه از یک هاب USB استفاده شده است که وظیفه مدیریت و اختصاص پورت‌ها به هر یک از بردها را بر

شتاب جاذبه، قابلیت دوران حول محور عمود بر آن نیز فراهم باشد تا تأثیر تغییر موقعیت فضایی حسگر به‌دقت مورد بررسی قرار گیرد. از این‌رو، فریم چرخان با استفاده از نرم‌افزار Solidworks طراحی گردیده است. به‌گونه‌ای که با بهره‌گیری از دو موتور پله ای، امکان چرخش در دو محور متعامد را فراهم نماید (شکل ۶). برای مدیریت ارتباط الکتریکی بین بخش‌های ثابت و متحرک دستگاه، از دو حلقه لغزنده با تعداد رشته‌های ۱۰ و ۱۶ استفاده شده است؛ یکی برای انتقال سیگنال‌های کنترلی مربوط به موتورها و دیگری برای انتقال داده‌های شتاب‌سنج مرجع و حسگر مورد آزمون. در مرکز محور چرخش، یک سینی نصب شده است که محل قرارگیری شتاب‌سنج مرجع و شتاب‌سنج تحت آزمون می‌باشد. اجزای مختلف سامانه در شکل ۷ نمایش داده شده‌اند.

نیروی تولید شده توسط شفت موتورهای پله ای از طریق تسمه و چرخ‌دنده به مرکز دوران هر دو محور منتقل می‌شود، به گونه‌ای که برای هر محور، با ۲۰۰۰ پله حرکت موتور پله ای، یک گردش کامل (۳۶۰ درجه) حاصل می‌شود. این موضوع معادل دقت زاویه‌ای حدود ۰/۱۸ درجه در هر محور است. طبیعتاً افزایش دقت چرخش، منجر به افزایش دقت اندازه‌گیری می‌گردد. با توجه به وزن کم کفه تعبیه شده برای نصب حسگر تحت آزمون و خود حسگر، حتی با استفاده از چرخ‌دنده‌هایی با قطر بزرگتر که باعث کاهش گشتاور منتقل شده به محور می‌شود، نیروی قابل توجهی از طرف موتورها مورد نیاز نیست. بنابراین در انتخاب موتورهای پله ای، تعداد پله‌ها نسبت به گشتاور تولیدی از اهمیت بیشتری برخوردار است. اگرچه موتورهای پله ای امکان کنترل دقیق زاویه را برای کاربر فراهم می‌آورند، اما لرزش‌های قابل توجهی در حین چرخش تولید می‌کنند که لازم است به گونه‌ای این لرزش‌ها کاهش یابند. در بخش مکانیکی، افزایش جرم بدنه تا حدی از شدت لرزش‌ها کاسته است؛ با این حال، برای کاهش خطای ناشی از این لرزش‌ها در اندازه‌گیری، از فیلتر میانگین متحرک در بخش نرم‌افزاری استفاده شده است که توانست به میزان قابل توجهی خطا را کاهش دهد. جزئیات این روش در بخش‌های بعدی به تفصیل ارائه خواهد شد.

### ب) بردهای استفاده شده

در بخش سخت‌افزاری، علاوه بر فریم چرخان، از سه برد الکترونیکی آردوینو استفاده شده است که در ادامه به عملکرد هر یک پرداخته خواهد شد.



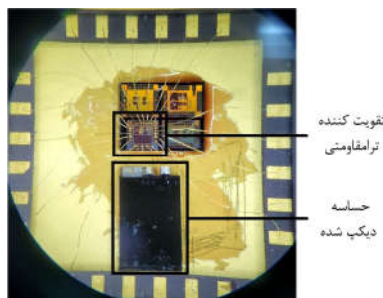
شکل ۷- ساختار الکترونیکی دستگاه و نحوه ارتباط اجزای مختلف

عهده دارد.

MPU، وضعیت کفه را به صورت بلادرنگ و به شکل گرافیکی همراه با اطلاعات مربوط به مختصات، سرعت و شتاب در هر سه محور نمایش می‌دهد. همچنین، با دریافت داده‌های خام از حسگر تحت آزمایش و اعمال فیلتر مناسب جهت کاهش اثرات لرزش‌های ناشی از موتورهای پله ای، داده‌های پردازش‌شده را برای تحلیل‌های بیشتر در نرم‌افزارهای تخصصی مانند متلب در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

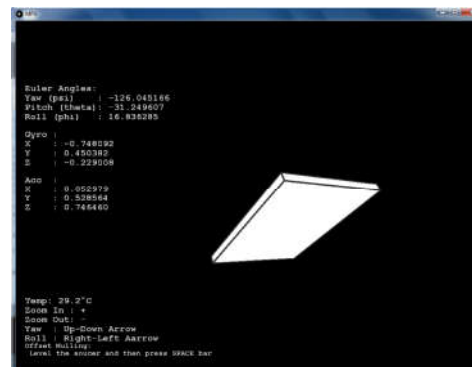
#### ۴- نتایج عملی

برای ارزیابی عملکرد دستگاه، یک حسگر MS9010 از شرکت کولبریس به صورت تفکیک شده (باز شدن تراشه و جداسازی قطعات داخلی) مورد آزمایش قرار گرفت تا کارایی دستگاه با استفاده از یک مرجع معتبر سنجیده شود. پس از جداسازی حسگر از تراشه، آن را بر روی یک برد مدار چاپی با استفاده از دستگاه اتصال نصب نمودیم. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، سه اتصال ایجاد شده به اتصالات مربوطه در دستگاه متصل گردید. این برد شامل یک تقویت‌کننده ترامقاومتی است که تغییرات خازنی حسگر را به ولتاژ معادل تبدیل می‌کند و ولتاژهای خروجی به‌عنوان نتایج اندازه‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۹- میکروگراف حساسه به‌مراه تقویت‌کننده ترامقاومتی

شکل ۹ نمایی از حسگر مورد آزمون را نشان می‌دهد که به مدار تقویت‌کننده ترامقاومتی متصل شده است. این حسگر با استفاده از دستگاه باندینگ در یک بسته‌بندی ۲۲ پین DIP مونتاژ شده و بر روی کفه متحرک (مطابق با شکل ۶) نصب گردید. بر اساس اطلاعات ارائه شده در برگه مشخصات فنی تراشه، ضریب مقیاس این حسگر برابر با  $200 \text{ mV/g}$  است. ظرفیت خازنی آن در حالت بدون اعمال شتاب، حدود  $37 \text{ pF}$  میکوفاراد است و در هر جهت می‌تواند تا حدود  $2 \text{ pF}$  میکوفاراد تغییر یابد. همچنین میزان خطی بودن عملکرد حسگر برابر با یک درصد گزارش شده است.



شکل ۸- محیط کاربری گرافیکی دستگاه rate table ساخته شده

#### ۳-۲- نرم افزار دستگاه

کدهای نوشته شده عمدتاً شامل وظایف روتین هستند که دو عملکرد اصلی را بر عهده دارند: نخست برقراری ارتباط میان سخت‌افزار ساخته شده و نرم‌افزار کنترل‌کننده، و دوم جمع‌آوری داده‌های مربوط به حسگر تحت آزمایش. برای کنترل هر یک از سه برد سخت‌افزاری ذکر شده، کدهای مربوطه در محیط Arduino IDE توسعه یافته‌اند که ساختار کلی آنها به شرح زیر است:

- کد مربوط به برد آردوینو اوونو بر پایه محاسبات کوانتونیوم نوشته شده است. این کد در هر لحظه، داده‌های مربوط به موقعیت (زوایای غلت، گام، انحراف) سرعت، شتاب در سه محور و همچنین دمای محیط را از مازول مرجع MPU دریافت کرده و به صورت داده‌های سریال به کاربر ارسال می‌کند.

- کد مربوط به برد افزونه CNC وظیفه کنترل چرخش‌های ساعتگرد و پادساعتگرد در هر دو محور را به صورت پله‌به‌پله یا پیوسته بر عهده دارد. این کد امکان دریافت دستورات کاربر از طریق محیط گرافیکی را دارد و می‌تواند چرخش کفه را در جهت و الگوی دلخواه کنترل نماید. در آزمایش‌های استاتیکی که پارامترهایی مانند ضریب مقیاس اهمیت دارند، چرخش به صورت گام‌به‌گام انجام می‌شود؛ اما در آزمایش‌های دینامیکی، مانند بررسی رابطه خطی بودن حساسه با فرکانس تغییرات چرخش، چرخش پیوسته لازم است. همچنین برای آزمون‌های خاص مانند اندازه‌گیری شتاب خارج از محور، قابلیت اجرای الگوهای سفارشی فراهم شده است. تمامی این قابلیت‌ها در کد مربوطه پیاده‌سازی شده و کاربر کنترل کامل و دقیقی بر نحوه دوران در دو محور خواهد داشت.

- کد مربوط به برد اصلی، همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، مسئول پایش مستمر وضعیت دستگاه بوده و در صورت بروز هرگونه خطا یا شرایط خاص، هشدارها و اعلان‌های لازم را از طریق نمایشگر LCD دی تعبیه‌شده روی دستگاه به کاربر اعلام می‌کند.

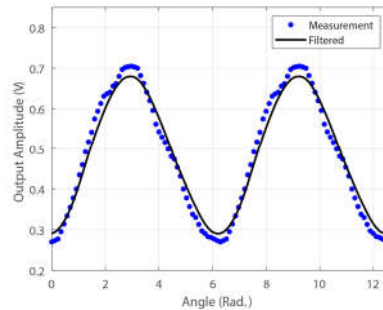
بخش نرم‌افزاری شامل یک رابط کاربری گرافیکی است که با استفاده از نرم‌افزار Processing، یک نرم‌افزار رایگان و متن‌باز، توسعه یافته است. شکل ۸ نمای کلی این محیط کاربری ساده را نشان می‌دهد. این نرم‌افزار با دریافت داده‌های موقعیت از شتاب‌سنج مرجع

درصد بوده و با مقدار اعلام شده در دیتاشیت حسگر مطابقت دارد. همان گونه که در تحلیل طیفی مشهود است، نویز پس زمینه با اعمال فیلتر میانگین متحرک به طور قابل توجهی کاهش یافته است. بررسی دقیق طیف نشان می دهد که اعوجاج غالب مربوط به هارمونیک دوم سیگنال است، که احتمالاً ناشی از عدم تقارن یا عدم تطابق دقیق در ساختار خازن دیفرانسیلی حسگر می باشد. این رفتار تأییدی بر صحت عملکرد دستگاه اندازه گیری و دقت تحلیل نرم افزاری آن در استخراج ویژگی های کلیدی حسگر است.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، طراحی و ساخت یک دستگاه Rate Table دو محوره با هدف آزمون و تنظیم شتابسنج های خازنی با دقت بالا و هزینه مقرون به صرفه مورد بررسی قرار گرفت. با بهره گیری از موتور پله ای دقیق، انکودرهای دیجیتال، و مکانیزم دو محوره چرخش، امکان ایجاد حرکات زاویه ای کنترل شده فراهم شد که برای ارزیابی عملکرد پارامترهایی مانند ضریب مقیاس، خطیت، رنج دینامیکی و شتاب بین محوری شتابسنج ها ضروری است. همچنین، استفاده از شتابسنج مرجع و پیاده سازی فیلتر میانگین گیری متحرک در بخش نرم افزاری توانست به طور مؤثری خطاهای ناشی از لرزش موتور را کاهش دهد و دقت اندازه گیری را افزایش دهد.

نتایج حاصل از آزمون عملی نشان داد که دستگاه ساخته شده قادر است داده های دقیق و قابل اعتمادی برای تحلیل عملکرد شتابسنج ها فراهم کند و با مقایسه داده های ثبت شده با مشخصات دیتاشیت، کارایی آن مورد تأیید قرار گرفت. بنابراین، دستگاه پیشنهادی می تواند به عنوان یک ابزار کاربردی در آزمایشگاه های تحقیقاتی و صنعتی جهت ارزیابی و تنظیم حسگرهای اینرسی، به ویژه شتابسنج های خازنی، مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، انعطاف پذیری طراحی، هزینه پایین ساخت، و امکان توسعه سیستم نرم افزاری، این دستگاه را به گزینه ای مناسب برای کاربردهای آموزشی و پژوهشی تبدیل کرده است.



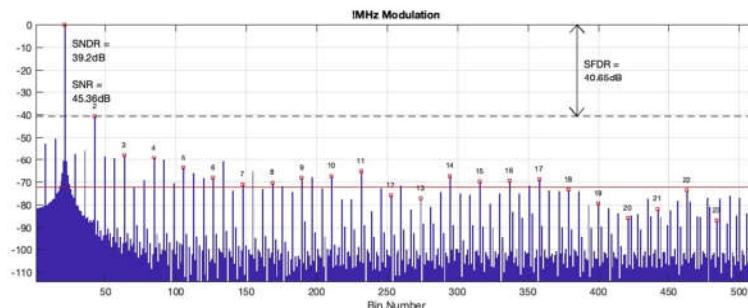
شکل ۱۰- خروجی واقعی و فیلتر شده

پیش از نصب حسگر بر روی کفه گردان، ابتدا دستگاه به دقت روی میزکار تراز شد. به منظور کاهش ارتعاشات ناشی از عملکرد موتورهای پله ای، بدنه دستگاه به طور محکم به سطح میزکار متصل گردید. پس از انجام این تنظیمات، با چرخش پله به پله حسگر و ثبت داده های خروجی، ضریب مقیاس آن برابر با  $20.0 \text{ mV/g}$  به دست آمد. این مقدار با مشخصات ارائه شده در دیتاشیت سازنده حسگر تطابق کامل دارد (شکل ۱۰).

برای ارزیابی میزان خطیت حسگر، کفه دستگاه به صورت پیوسته به مدت ۱۷ دور چرخانده شد و داده های خروجی ثبت گردید. همان طور که مشاهده می شود، سیگنال خام دارای نویز قابل توجهی است که عمدتاً ناشی از لرزش های مکانیکی موتورهای پله ای می باشد. به منظور حذف مؤلفه های نویز، یک فیلتر میانگین متحرک مرتبه ۱۰ بر داده ها اعمال شد که منجر به بهبود چشمگیر کیفیت سیگنال گردید.

با توجه به اینکه اغتشاش های ناشی از موتور دارای مؤلفه های فرکانسی بالاتری نسبت به پهنای باند حسگر هستند، می توان صحت داده های فیلتر شده را در محدوده قابل قبولی معتبر دانست. به منظور استخراج میزان خطیت، داده های فیلتر شده وارد نرم افزار متلب شده و تحلیل تبدیل سریع فوریه بر روی آن ها انجام گرفت. طیف فرکانسی حاصل در شکل ۱۱ ارائه شده است.

نسبت سیگنال به نویز و اعوجاج (SNDR) اندازه گیری شده برابر با  $39.2$  دسی بل به دست آمد که معادل با میزان خطیتی در حدود یک



شکل ۱۱- طیف داده خروجی با استفاده از تبدیل سریع فوریه ۱۰۲۴ نقطه ای

- [1] Single-Axis Precision Positioning and Rate Table System, 2001P Series, IDEAL AERPSMITH, Datasheet.
- [2] Precision Two-Axis Positioning and Rate Table System, 2002P/2002PG Series, IDEAL AERPSMITH, Datasheet.
- [3] Single-Axis Rate Table BD125, Acutronic, Datasheet.
- [4] Rao MS, Ananda CD, Manohar LR. Design of single-axis rate table for calibration of gyro sensor used in micro aerial vehicles (MAV). International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics (IJETCSE). 2015;14(2):765-9.
- [5] Two-Axis Motion Simulator Model AC2247, Acutronic, Datasheet.
- [6] iMPULSE™ Series of Rate Table Products, Acutronics, Datasheet.
- [7] Dong CM, Ren SQ, Chen XJ, Wang ZH. A separated calibration method for inertial measurement units mounted on three-axis turntables. Sensors. 2018 Aug 28;18(9):2846.
- [8] Vau B, Bussutil M, Honthaas J, Stevens C., A Testbench with Increased Accuracy for the Calibration of Inertial Navigation Systems and Inertial Sensors. InProceedings of the 2021 International Technical Meeting of the Institute of Navigation 2021 Jan 28 (pp. 753-765).
- [9] Zhang X, Zhou C, Chao F, Lin CM, Yang L, Shang C, Shen Q. Low-cost inertial measurement unit calibration with nonlinear scale factors. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021 May 4;18(2):1028-38.
- [10] Lu GY, Wang YS, Li B, Yu J. Structure about the Dual-Axis Speed Turntable and its' Stability Analysis. Applied Mechanics and Materials. 2012 Dec 24; 235:186-91.
- [11] Zhou Z, Pan X, Pang Y, Huang C, Yang Y, Guo W. An innovative method for rapid bias calibration of inertial navigation systems for nonlaboratory conditions. IEEE Sensors Journal. 2023 Aug 28;23(19):22630-8.
- [12] Sun W, Huang H, Sun P, Ding W. MEMS strapdown inertial attitude measurement system using rotational modulation technology. Plos one. 2024 Feb 13;19(2):e0298168.
- [13] Sinha S, Shakya S, Mukhiya R, Gopal R, Pant BD. Design and simulation of MEMS differential capacitive accelerometer. InProceeding of ISSS international conference on smart materials, structures and systems 2014 Jul 8.