نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME

ISSN: 1605-9719
DOI: 10.30506/MMEP.2022.558207.2036

طراحی و ساخت شیب سنج دو محوره با رنج ۹۰± درجه و دقت ۰/۱ درجه

مسعود تیموری*
استادیار،
دانشکده مهندسی برق،
دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

چکیده: در این مقاله یک شیب سنج دو محوره بر پایه تراشه میکروماشین معرفی شده است. هدف اصلی مقاله، ارائه یک شیب سنج سریع با رنج اندازه‌گیری وسیع و دقت بالا جهت استفاده در سیستم های تراز اتومات می باشد. این شیب سنج قادر است شیب زمین را اندازه‌گیری کرده و اطلاعات شیب هر راستا را بصورت یک عدد دیجیتال ۱۱ بیتی تولید نماید. داده دیجیتال تولیدی با استفاده از پروتکل رایج SPI به بیرون تراشه ارسال می‌گردد. تراشه مورد استفاده، قطعه به شماره SCA100T-D02 بوده که توسط یک میکروکنترلر ATMEGA32 راه اندازی شده است. کل مدار شیب سنج در داخل یک محفظه آلومینیومی قرار داده شده و توانایی نصب بر روی هر سطحی را دارد. نتایج آزمایش نشان داد که شیب سنج پیشنهادی قادر است با سرعت ۱۸ هرتز شیب زمین را در دو راستای عرضی و طولی با رنج ۹۰± درجه و دقت ۰/۱ درجه اندازه گیری نماید. رنج دمای کاری شیب سنج از ۴۰- تا ۱۲۵ درجه سانتیگراد بوده و اطلاعات شیب در یک نمایشگر ۲۰×۴ قابل مشاهده می باشد. لذا این شیب سنج می تواند در رنج وسیعی از تجهیزات صنعتی، کشاورزی و غیره قابل استفاده باشد.

واژه های راهنما: شیب سنج، تراشه، میکروکنترلر، پروتکل SPI، میکروماشین

مقاله ترویجی
دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۳۰
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۴

Design and fabrication of a dual-axis inclinometer with a range of ±90 degrees and an accuracy of 0.1 degrees

Masood Teymouri*
Assistant Professor,
Faculty of Electrical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia

Abstract: In this paper, a dual-axis inclinometer based on a micro-machine chip is introduced. The main purpose of this paper is to present a high-speed inclinometer with a wide measurement range and high accuracy for use in self-leveling systems. The inclinometer can measure the slope of the ground and generate the information of the slope in each direction as 11-bit digital data. The generated digital data is sent to the outside of the chip using the traditional SPI protocol. The part number of the chip is SCA100T-D02, which is controlled by an ATMEGA 32 microcontroller. The entire inclinometer circuit is placed inside an aluminum box and can be installed on any surface. The test results are shown that the proposed inclinometer can measure the slope of the ground with a speed of 18 Hz in both horizontal and longitudinal directions, with a range of ±90 degrees and an accuracy of 0.1 degrees. The operating temperature range of the inclinometer is from -40 to 125 degrees Celsius, and the slope information can be seen on a 4×20 display. So, this inclinometer can be used in a wide range of industrial, agricultural, etc. equipment.

Keywords: Inclinometer, Chip, Microcontroller, SPI protocol, Micro-machine

* نویسنده مسئول، m.teymouri@uut.ac.ir

۱- مقدمه

شیب‌سنج[1] وسیله‌ای است که از آن برای اندازه‌گیری زاویه عرضی و طولی نسبت به یک محور مرجع مانند سطح افق استفاده می‌شود. شیب‌سنج‌ها کاربردهای مختلفی در رباتیک، صنایع هواپیمایی، نمایشگرهای شیب، دوربین‌ها و بطور خاص در هر وسیله‌ای که کارکردش می‌تواند تحت تاثیر شیب زمین قرار بگیرد از جمله ماشین‌آلات صنعتی و کشاورزی، تجهیزات نظامی، ماشین‌آلات حفاری، سیستم‌های تراز اتومات و غیره مورد استفاده قرار گیرند [۴-۱]. به عنوان نمونه، جرثقیل‌ها قبل از بلند کردن بار باید به تراز شیب عرضی و طولی برسند تا در حین کار، دچار واژگونی نشوند. همچنین در حوزه کشاورزی می‌توان به ماشین کمباین اشاره نمود که برای بهینه‌سازی سیستم برداشت، خرمنکوبی و جداسازی دانه، باید به یک تراز مطلوب برسد. در شکل ۱ نمونه یک ماشینی که در حین کار باید به تراز برسد نشان داده شده است. این ماشین‌آلات که نیاز دارند در حین کار به تراز سطحی در یک راستا و یا دو راستا (عرضی و طولی) برسند از سیستمی به نام تراز اتومات و یا تراز هوشمند استفاده می‌کنند. نحوه کار این سیستم‌ها به این صورت است که ابتدا اندازه شیب زمین در راستای که می‌خواهند ماشین مربوطه تراز شود از شیب‌سنج دریافت کرده بعد با استفاده از سیستم کنترل ارتفاع که به ماشین متصل شده است ماشین به تراز مربوطه می‌رسد. در واقع در حین عملیات بر پایه یک الگوریتم تراز، ارتفاع گوشه‌های مختلف ماشین طوری کنترل می‌شود که در نهایت ماشین با دقت مورد نظر به تراز نهایی برسد. از آنجاییکه بعضی از ماشین‌آلات نیاز است فقط در یک راستا مثلاً عرضی تراز شوند و بعضی دیگر باید همزمان در دو راستای عرضی و طولی تراز گردند. لذا شیب‌سنج مربوطه نیز باید توانایی اندازه‌گیری شیب سطح زمین در یک راستا و یا دو راستا را داشته باشد. نتیجتاً یکی از عوامل اصلی دقت و سرعت تراز به دقت و سرعت شیب‌سنج نیز بر می‌گردد و این سنسورها قلب تپنده تمامی سیستم‌های تراز اتومات می‌باشند. هدف اصلی این مقاله معرفی انواع سنسور شیب‌سنج و در نهایت طراحی یک شیب‌سنج دو محوره برای اندازه گیری شیب زمین در دو راستا با دقت دهم درجه می‌باشد.

شیب‌سنج‌های رایج اساساً از تلفیق یک آونگ با یک زاویه‌سنج نوع مقاومتی، خازنی، حرارتی و یا نوری تشکیل می‌شود. در بین این نوع از شیب سنج ها نوع خازنی به دلیل حساسیت و رزولوشن بالا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵-۳]. همچنین شیب‌سنج‌های مبتنی بر سیال[2] که بر اساس جابجایی یک مایع در یک ظرف ساخته می‌شوند به دلیل قیمت پایین کاربردهای فراوانی در این حوزه دارند [۷-۶]. در تحقیقات اخیر که گزارش شده است بیشتر از سنسورهای میکروماشین[3] برای ساخت شیب‌سنج‌ها استفاده می‌شود که دلیل آن ساخت آسان، اندازه کوچک، وزن و توان مصرفی پایین و همچنین سرعت و دقت بالا می‌باشد [۹-۸].

در این مقاله یک شیب‌سنج دو محوره معرفی شده است که از یک سنسور میکروماشین با راه انداز میکروکنترلی تشکیل شده است که علاوه بر قیمت و توان مصرفی پایین، دقت و سرعت بالایی نیز دارد. به دلیل راه‌اندازی سنسور شیب توسط میکروکنترلر، امکان اجرای همزمان الگوریتم تراز توسط همان میکروکنترلر نیز وجود دارد. لذا می‌توان با نصب این شیب‌سنج بر روی ماشین آلات با قابلیت تراز اتومات نه تنها می‌توان شیب زمین را اندازه‌گیری نمود بلکه همزمان عملیات تراز را نیز انجام داد.

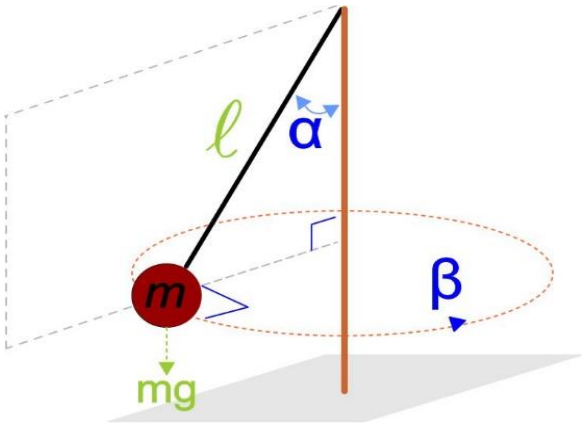
بخش‌های مختلف مقاله به این ترتیب می‌باشد که در بخش ۲ انواع روش‌های اندازه‌گیری شیب بیان شده است. در بخش ۳ شیب‌سنج ساخته شده توضیح داده شده و در ادامه در بخش ۴ و ۵ نحوه کد نویسی، نمایی واقعی و نتایج تست شیب‌سنج ساخته شده بیان گردیده است.

شکل ۱ خودرو جرثقیل با قابلیت تراز عرضی و طولی

[1] Tilt sensor or Inclinometer
[2] Fluid-based
[3] MEMS: micro-electromechanical system

۲- شیب سنج‌ها

همانطور که بیان شد شیب‌سنج‌ها وسایلی برای اندازه‌گیری زاویه مابین راستای افق زمین و راستای مورد نظر می‌باشند. ساده‌ترین روش برای اندازه‌گیری زاویه مربوطه، استفاده از یک آونگ[1] ساده (پاندول) می‌باشد. که تصویر آن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ آونگ ساده

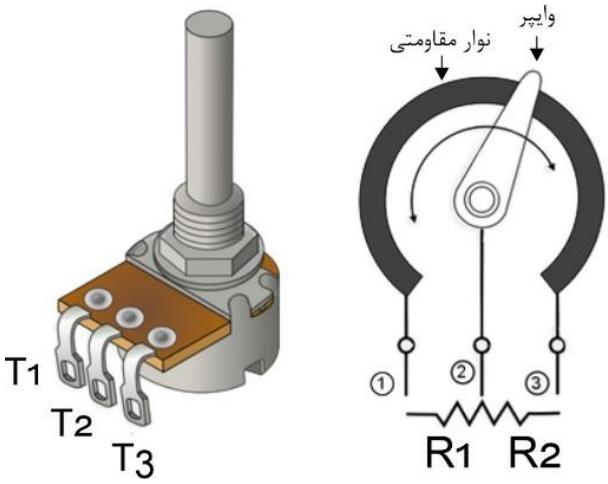
آونگ ساده از سه بخش وزنه به جرم m، طول بازوی L و پایه تشکیل شده است. در صورت اعمال نیرو به وزنه، زاویه عرضی α و طولی β با راستای پایه ایجاد می‌شود که این دو زاویه همان زوایای عرضی و طولی کفه پایه می‌باشند. به بیان ساده‌تر، با نصب این آونگ بر روی ماشین، می‌توان شیب عرضی و طولی زمینی که ماشین بر روی آن قرار دارد را از روی این دو زاویه α و β به دست آورد. روش‌های مختلفی برای تبدیل زاویه ایجاد شده توسط آونگ، به سیگنال‌های الکتریکی وجود دارد که سه روش اصلی به این شرح می‌باشد.

۲-۱- روش مقاومتی

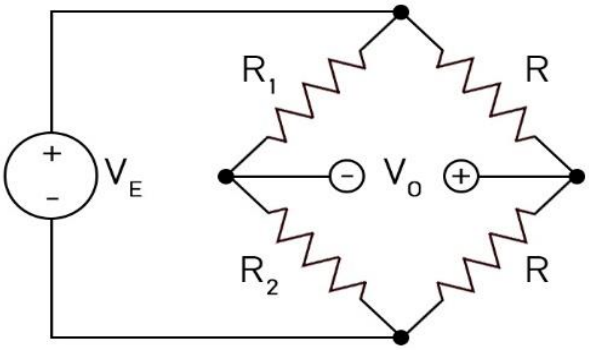
در این روش، جابجایی چرخشی توسط یک مقاومت متغیر که تصویر آن در شکل ۳ نشان داده شده است تبدیل به تغییرات اندازه مقاومت در قطعه می‌شود [۱۰]. مقاومت بین دو ترمینال T_1 و T_2 مقدار ثابتی داشته اما با حرکت وایپر[2] مقدار مقاومت بین دو ترمینال ۱ و ۲ (R_1) و همچنین دو ترمینال ۳ و ۱ (R_2) تغییر می‌یابد که اندازه مقاومت‌ها بر اساس رابطه زیر بهم ارتباط دارند.

$$R = R_1 + R_2 \qquad (۱)$$

برای این کار می‌توان از انواع مقاومت‌های متغیر استفاده نمود که دقت و حساسیت این قطعات تاثیر مستقیم روی اندازه-گیری زاویه‌ای دارد. در هر حال، برای استفاده از این مقاومت‌های متغیر باید یک مدار رابطی را استفاده نمود که پایه‌ای ترین آن، مدار پل وتستون می‌باشد که تصویر آن در شکل ۴ دیده می‌شود.



شکل ۳ ولوم مقاومتی



شکل ۴ پل وتستون

در این سنسور، رابطه ولتاژ خروجی با تغییرات زاویه بر اساس روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد [۱۰].

$$V_O = 0.5V_E - \frac{R_2}{R_1 + R_2}V_E = 0.5(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2})V_E \qquad (۲)$$

با توجه به رابطه ۱ و همچنین ارتباط خطی اندازه مقاومت با زاویه چرخشی θ خواهیم داشت.

$$R_1 = K \cdot \theta \qquad (۳)$$

[1] Pendulum
[2] Wiper

$$V_O = (\frac{R_1 - 0.5R}{R})V_E = K_1\theta + K_2 \quad (۴)$$

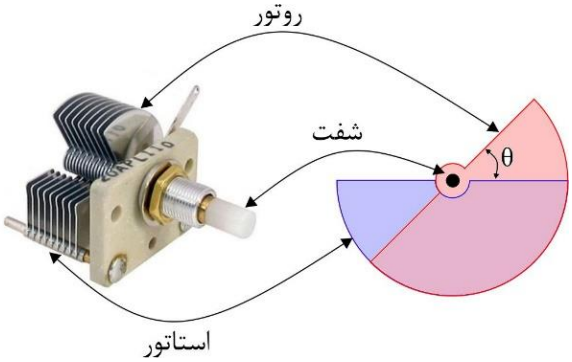
$$K_1 = \frac{K \cdot V_E}{R}$$

$$K_2 = 0.5V_E$$

در این رابطه K ضریب تبدیل زاویه به مقاومت در پتانسیومتر می‌باشد. همانطورکه از رابطه ۴ دیده می‌شود زاویه θ با ولتاژ خروجی یک رابطه خطی دارد. واضح است برای اندازه‌گیری در دو راستای α و β، دو عدد پتانسومتر و مدار پل وتستون نیاز می‌باشد.

۲-۲- روش خازنی

یکی از ایرادات اساسی سنسورهای مقاومتی، وجود اصطحکاک بین وایپر و نوار مقاومتی می‌باشد که این باعث کاهش دقت و عمر سنسور می‌گردد. سنسور جایگزین که این مشکل را ندارد سنسور خازنی می‌باشد. در این روش بجای استفاده از مقاومت متغییر، از خازن‌های متغییر که نوع چرخشی آن در شکل ۵ نشان داده شده است استفاده می‌شود.



شکل ۵ خازن متغییر

در این روش چرخش محور خازن متغییر، باعث می‌شود که صفحات خازنی در مقابل هم جابجا شده و بر اساس رابطه ۵، ظرفیت خازن C با زاویه چرخشی θ تغییر یابد [۱۰].

$$C = \frac{\varepsilon_r A(\theta)}{d} \quad (۵)$$

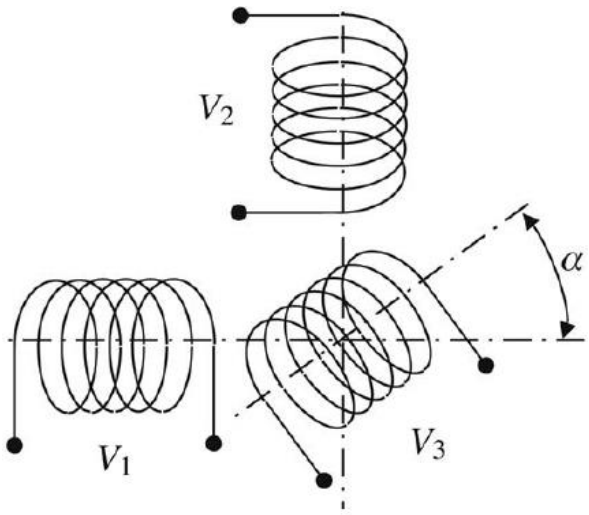
$$A(\theta) = \frac{1}{2}|\pi - \theta| r^2; 0 \le \theta \le 2\pi$$

در این رابطه ε_r ضریب دی الکتریک عایق بین صفحات، A سطح مقطع صفحات، θ زاویه بین صفحات (زاویه چرخشی شفت)، d فاصله بین صفحات و r شعاع نیم دایره می‌باشد. همانطورکه مشاهده می‌شود یک رابطه خطی بین ظرفیت خازن و زاویه چرخشی شفت وجود دارد [۱۱-۱۲].

۲-۳- روش القائی

در روش مغناطیسی، می‌توان جابجایی خطی و یا چرخشی را با استفاده از یک سیم‌پیچ به تغییرات خود القایی تبدیل نمود. در این روش با استفاده از ۳ سیم‌پیچ می‌توان زاویه را اندازه‌گیری کرد. همانطورکه در شکل ۶ نشان داده شده است سیم پیچ شماره ۱ و ۲ نسبت بهم متعامد و ثابت بوده و توسط ولتاژهای $V_1=V_m\sin wt$ و $V_2=V_m\cos wt$ تغذیه می‌شوند. با چرخش سیم پیچ سوم حول محور خود، ولتاژی (V_3) در آن القاء می‌شود که در آن زاویه θ تاثیر خطی بر اندازه ولتاژ آن دارد به این سیستم ریزالور[1] گفته می شود. محاسبات مربوط به ولتاژ القائی در سیم‌پیچ سوم بصورت زیر می باشد [۱۰].

$$V_3 = \theta V_m \cdot \cos wt \cdot \cos\theta + \theta V_m \cdot \sin wt \cdot \sin\theta = \theta V_m \cdot \cos(wt + \theta) \quad (۶)$$



شکل ۶ ریزالور

۲-۴- سنسورهای میکروماشین

امروزه مدارات الکترونیکی با استفاده از تکنولوژی CMOS[2] قابل ساخت در ابعاد بسیار کوچک (نانو) می‌باشند که این فناوری باعث افزایش چشمگیر کارایی آنها شده است. سیستمهای

[1] Resolver
[2] Complementary metal oxide semiconductor

میکرو-الکترومکانیکی نیز به ما کمک می‌کنند تا سیستم‌های مکانیکی را در ابعاد میکرو و نانو پیاده‌سازی نمود. این نوع از تکنولوژی به ما کمک می‌کند تا کارایی سنسورها را از بسیاری جهات مانند سرعت، دقت، توان مصرفی، سطح اشغالی، قیمت تمام شده و ... بهبود بخشید. به عنوان مثال، تکنولوژی میکروماشین کاربردهای بسیار فراوانی در ساخت میکرو سنسورها دارند که از آن جمله می‌توان به سنسورهای شتاب‌سنج و شیب‌سنج اشاره نمود.

۳- شیب سنج ارائه شده

همانطورکه در بخش ۲ توضیح داده شد با روش‌های مختلفی می‌توان جابجایی چرخشی (زاویه) را اندازه‌گیری نمود. با نصب هر نوع سنسور زاویه‌سنج بر روی محور آونگ (شکل ۲) می‌توان به راحتی شیب زمین را بسته به درجه آزادی آونگ، اندازه‌گیری کرد. استفاده از سنسورهای مقاومتی، خازنی و یا مغناطیسی محدودیت‌های خاصی از قبیل نیروی لازم برای چرخاندن محور سنسور، حجم سنسور، توان مصرفی ، سرعت اندازه‌گیری و غیره دارد که امروزه سنسورهای میکروماشین این محدودیت‌ها را تا حدود زیادی مرتفع کرده است. سنسوری که در سیستم طراحی شده مورد استفاده قرار گرفته است به شماره SCA100T-D02 می‌باشد که تصویر آن در شکل ۷ نشان داده شده است [۱۳-۱۴].

شکل ۷ سنسور شیب‌سنج **SCA100T-D02**

۳-۱- مشخصات سنسور SCA100T-D02

سری SCA100T، یک نوع شیب‌سنج با تکنولوژی میکروماشین می‌باشد که می‌تواند در تجهیزات ترازکن اتومات مورد استفاده قرار گیرد. محورهای حسگرها به صورت متعامد با هم قرار دارند تا در دو راستای عرضی و طولی، شیب محل نصب را اندازه‌گیری نمایند. از مشخصات فنی مهم تراشه SCA100T-D02 می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

۱- قابلیت اندازه گیری در دو راستای X و Y با رزولوشن ۰,۰۰۳۵°

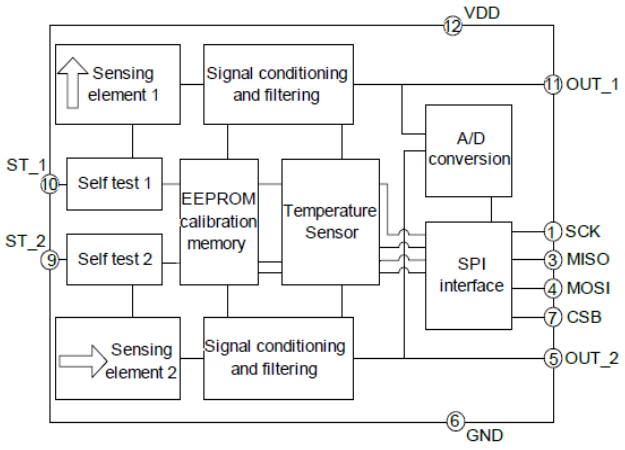
۲- رنج اندازه گیری ±۹۰°

۳- پهنای باند اندازه گیری ۱۸Hz

۴- توانایی تحمل شوک ۲۰۰۰۰g

۳-۲- بلوک دیاگرام داخلی سنسور

همانطورکه از بلوک دیاگرام سنسور در شکل ۸ دیده می‌شود. تراشه دارای دو حسگر element1 , element2 متعامد بوده که سیگنال خروجی آنها علاوه بر اینکه بصورت آنالوگ (OUT_1 , OUT_2) به بیرون تراشه ارسال می‌شود برای راحتی کاربر بعد از تنظیم و فیلتراسیون به بخش مبدل داده جهت تبدیل به کدهای دیجیتال نیز ارسال می‌گردد. تا کدهای دیجیتال با استفاده از رابط SPI که در سنسور تعبیه شده است به خارج از سنسور ارسال گردد. برای افزایش دقت اندازه-گیری واحد کالیبراسیون نیز وجود دارد که باعث تصحیح خطای کدهای دیجیتال می‌گردد. همچنین بخش اندازه‌گیری دما نیز وجود دارد تا بتواند تاثیر دما را در کدهای نهایی نیز لحاظ نماید.

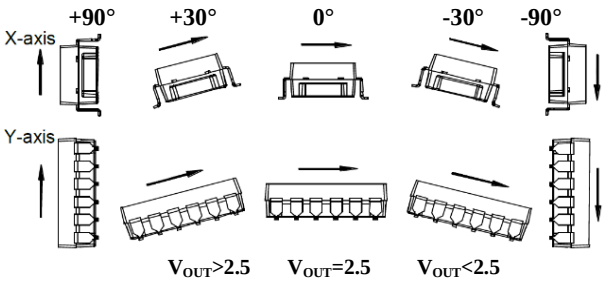


شکل ۸ بلوک دیاگرام سنسور شیب‌سنج **SCA100T**

در شکل ۹ وضعیت کلی ولتاژهای خروجی آنالوگ OUT_1 و OUT_2 در شرایط مختلف شیب نشان داده شده است. همانطورکه دیده می شود در شرایط تراز، ولتاژهای خروجی برابر

[1] Serial Peripheral Interface

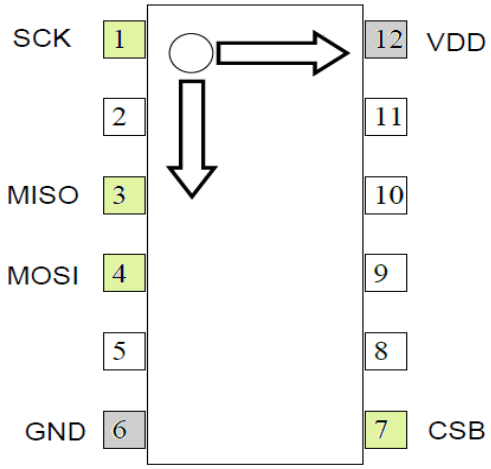
نصف ولتاژ VDD یعنی ۲/۵ ولت می‌باشد و در شرایط شیب های مختلف می‌تواند بزرگتر یا کوچکتر باشد.



شکل۹ ولتاژ خروجی در شیب های مختلف

۳-۳- راه اندازی سنسور

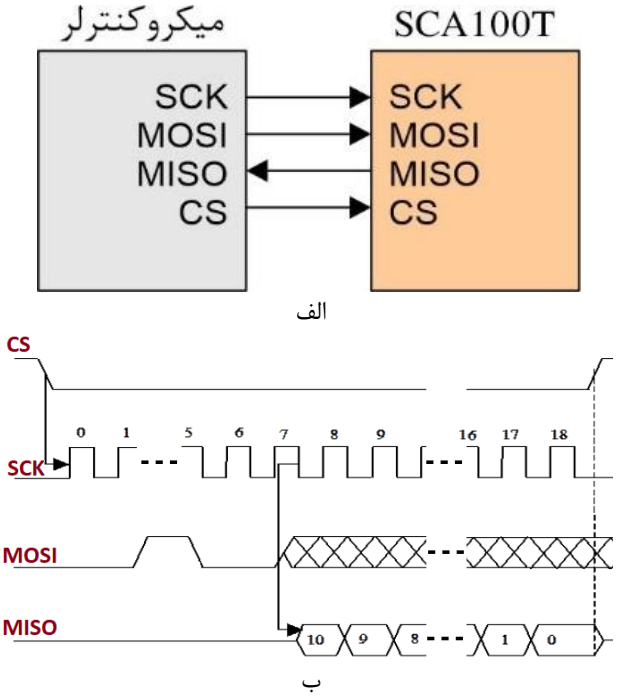
شیب‌سنج ارائه شده با استفاده از تراشه SCA100T-D02 طراحی شده است. همانطور که قبلا اشاره شد برای به دست آوردن اطلاعات شیب هم می‌توان از خروجی‌های آنالوگ آن و هم می‌توان از خروجی دیجیتال استفاده نمود. به دلیل تولید کدهای دیجیتال با دقت بالا توسط خود تراشه، از خروجی دیجیتال برای اندازه‌گیری شیب استفاده شده است. سنسور قادر است با استفاده از پایه‌های CSB , SCK , MOSI MISO بر اساس پروتکل SPI اطلاعات دیجیتال شیب را در دو راستای عرضی و طولی به بیرون تراشه ارسال نماید. برای راه‌اندازی تراشه سنسور، فقط کافیست پایه VDD به ولتاژ ۵ ولت و پایه GND به زمین مدار متصل گردد حال با استفاده از پایه‌های مربوط به اتصال SPI (شکل ۱۰) اطلاعات شیب را دریافت کرد.



شکل ۱۰ پین اوت سنسور SCA100T

۴- کد نویسی سنسور

همانطورکه که در بخش قبلی توضیح داده شد می‌توان از طریق پروتکل SPI اطلاعات مربوط به شیب را بصورت یک داده دیجیتال ۱۱ بیتی از تراشه SCA100T-D02 دریافت نمود. نحوه اتصال میکروکنترلر به تراشه و دیاگرام زمانی مربوط در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱ الف) نحوه اتصال میکرو به تراشه ب) دیاگرام زمانی **SPI**

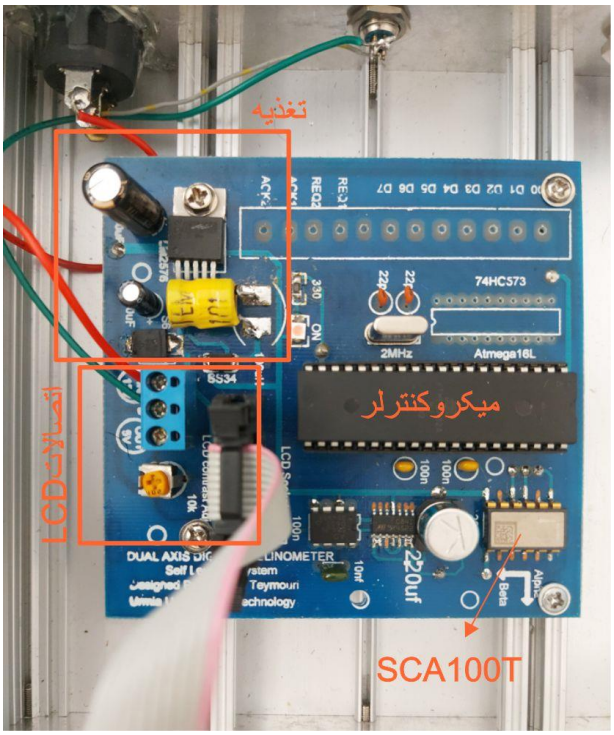
همانطورکه از دیاگرام زمانی دیده می‌شود ابتدا توسط CS=0 تراشه فعال می‌گردد. بعد با ارسال پالس ساعت[۲]SCK به تراشه ضمینه ارسال فرمان از طریق[۳]MOSI در ۸ کلاک ساعت و دریافت شیب از طریق[۴]MISO در ۱۱ کلاک ساعت بصورت سریال مهیا می‌گردد. با ارسال فرمان 00010000 تراشه شیب عرضی را ارسال می‌کند و با ارسال فرمان 00010001 شیب طولی ارسال می‌گردد.

۵- تست شیب سنج

تصویر شیب سنج ساخته شده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. میکروکنترلر مورد استفاده جهت راه اندازی تراشه، Atmega 32 بوده که توسط یک منبع سوییچنگ مبتنی بر تراشه lm2576

[1] Chip Select
[2] Serial Clock
[3] Master Out Slave In
[4] Master In Slave Out

تغذیه می‌شود. اندازه شیب عرضی و طولی (Alpha , Beta) در یک نمایشگر کاراکتری ۲۰×۴ قابل مشاهده می باشد.



شکل ۱۲ مدار شیب سنج

جهت تست شیب سنج، محفظه آلومینیومی مربوطه در شیب‌های معلوم و دقیق عرضی و طولی قرار داده شد و معلوم گردید این شیب سنج می‌تواند شیب عرضی و طولی در رنج ۹۰± درجه با دقت ۰/۱ درجه و سرعت ۱۸ هرتز اندازه‌گیری نماید.

۶- نتیجه‌گیری

شیب‌سنج‌ها قلب تپنده بسیاری از تجهیزات صنعتی و نظامی بویژه سیستم‌های تراز اتومات می‌باشند. با استفاده از شیب‌سنج‌ها می‌توان شیب زمین را در یک و یا دو راستای عرضی و طولی اندازه‌گیری نمود. دقت، سرعت و رنج اندازه‌گیری شیب‌سنج‌ها می‌تواند تاثیر فراوانی در کارکرد سیستم‌های ترازکن داشته باشد. شیب‌سنج‌ها، عموماً از تلفیق آونگ با یک سنسور زاویه‌سنج مقاومتی و یا خازنی ساخته می‌شوند. جهت جلوگیری از نوسان زیاد آونگ، معمولا از یک سیستم میراگر در آنها استفاده می‌شود که این به نوبه خود باعث کاهش سرعت شیب‌سنج می‌گردد. از طرفی به دلیل انحراف[1] در سنسورهای زاویه‌سنج مقاومتی و خازنی، شیب‌سنج‌های مربوطه از دقت بالایی نیز برخوردار نیستند. در این مقاله یک شیب سنج بر پایه سنسور میکروماشین معرفی شده است که توسط یک میکروکنترلر راه‌اندازی شده است. شیب‌سنج ساخته شده قادر است شیب زمین را در دو راستا با دقت ۰/۱ درجه و سرعت ۱۸ هرتز اندازه‌گیری نماید. این میزان از دقت و سرعت آنرا کاملا مناسب برای استفاده در انواع تجهیزات صنعتی می‌نماید. از طرفی به دلیل دریافت اطلاعات شیب زمین توسط میکروکنترلر، نصب این دستگاه بر روی انواع ماشین‌آلات، جهت تراز اتومات امکان پذیر می‌باشد. از آنجاییکه می‌توان الگوریتم تراز اتومات را توسط همان میکروکنترلر شیب‌سنج پیاده سازی نمود. لذا این سیستم می‌تواند کارکرد بسیار مناسبی در تجهیزات تراز اتوات داشته باشد. در واقع هم راه اندازی سنسور شیب و هم اجرای الگوریتم تراز بصورت همزمان توسط میکروکنترلر شیب سنج اجرا می‌شود. این کار نه تنها باعث کاهش قیمت تمام شده سیستم ترازکن می‌شود بلکه سرعت و دقت تراز را نیز افزایش می‌دهد.

۷- مراجع

[1] Djambazian, H. H., Nerguizian, C., Nerguizian, V., Saad M, 3D Inclinometer and MEMS Acceleration Sensors, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 3338-3342, doi: 10.1109/ISIE.2006.296001, (2006).

[2] Zhong, Z. W., Zhao, L. P., Lin, H. H., Development and investigation of an optical tilt sensor, *Opt. Commun.*, Vol. 261, No. 1, pp. 23–28, (2006).

[3] Lee, J. H., Lee, S. S., Electrolytic tilt sensor fabricated by using electroplating process, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 167, No. 1, pp. 1–7, (2011).

[4] Han, Q., Chen, C., Research on tilt sensor technology, *2008 IEEE International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling* Workshop, pp. 786–789, (2008).

[5] Teymouri, M., Fabrication and evaluation of a four-way automatic leveling system with the ability to adjust the lateral and longitudinal slope, *Scientific Journal of Mechanical Engineering of Iran*, Vol. 26, No. 5, pp. 75-82, (2018). (in Persian فارسی).

[6] Jung, H., Kim, C. J., Kong, S. H., An optimized MEMS-based electrolytic tilt sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 139, No. 1–2, pp. 23–30, Sep. (2007).

[1] Tolerance

[7] Yotter, R. A., Baxter, R. R., Ohno, S., Hawley, S. D., Wilson, D. M., On a micromachined fluidic inclinometer, *in TRANSDUCERS '03. 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Digest of Technical Papers*, Vol. 2, pp. 1279–1282, (2003).

[8] Zou, X., Thiruvenkatanathan, P., Seshia, A., Micro-electro-mechanical resonant tilt sensor with 250 nano-radian resolution, *in European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC)*, Joint, pp. 54–57, (2013).

[9] Yao, B., Feng, L., Wang, X. Liu, W., Jiao, H., Micro-grating tilt sensor with self-calibration and direct intensity modulation, *Opt. J. Light Electron Opt.*, Vol. 126, No. 1, pp. 144–147, (2015).

[10] Regtien, P.P.L., Sensors for Mechatronics, *Elsevier*, (2018).

[11] Hosseini, F., Mehran, M., Mohajerzadeh, S., Shoaei, O., Design, analysis, simulation, and fabrication of a novel linear MEMS capacitive inclinometer, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 18, No. 17, doi: 10.1109/JSEN.2018.2851660, (2018).

[12] Coonley, K., Sequeira, D.,Mann, B., Patterned rotary parallel-plate capacitor for frequency up-conversion and RC circuit waveform conditioning, *Eng. Res. Express*, Vol. 2, No. 2, (2020).

[13] Hoang, M. L., Pietrosanto, A., A new technique on vibration optimization of industrial inclinometer for MEMS accelerometer without sensor fusion, *in IEEE Access*, Vol. 9, pp. 20295-20304, (2021).

[14] Nastro, A., Ferrari, M., Ferrari, V., MEMS Inclinometer with tunable-sensitivity and segmented overlapping allan variance analysis, *2020 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, pp. 1-6, (2020).