



Compensation of Thermal Bias for Micro-Electro-Mechanical Rate Gyroscope by Using Extended Kalman Filter in Accelerated Motions

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mirzaei M.^{*1} PhD,
Hosseini I.² MSc

How to cite this article

Mirzaei M, Hosseini I. Compensation of Thermal Bias for Micro-Electro-Mechanical Rate Gyroscope by Using Extended Kalman Filter in Accelerated Motions. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(7):1851-1859.

¹“Hydro-Aeronautical Research Center” and “School of Mechanical Engineering”, Shiraz University, Shiraz, Iran

²School of Electrical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

*Correspondence

Address: School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Mollasadra Street, Shiraz, Iran. Postal Code: 7145674371.

Phone: +98 (71) 36133375

Fax: +98 (71) 36133375

mmirzaei@shirazu.ac.ir

Article History

Received: July 20, 2019

Accepted: April 08, 2020

ePublished: July 20, 2020

ABSTRACT

Initial bias is a random parameter in micro-electro-mechanical rate gyroscopes that changes with each turn on and turn off. The bias can be estimated by averaging in static condition or by extended Kalman filter in other conditions. In addition, this parameter is affected by temperature or linear acceleration. Curve fitting on the bias variation of micro-electro-mechanical rate gyroscopes due to thermal effects is a usual method for thermal compensation of these sensors. However, these approximate curves cannot completely compensate the effect of the thermal bias in long-time applications. In this study, it is tried to improve the calculating accuracy by a combination of extended Kalman filter and the results of these curves and using advantages of both methods. Also bias estimation is improved using the switching algorithm in accelerated motions by avoiding improper data in the estimation process. Experimental tests show the effectiveness of this method especially in long-time accelerated motions.

Keywords Micro-Electro-Mechanical Rate Gyroscope; Thermal Bias; Extended Kalman Filter; Accelerated Motion

CITATION LINKS

[1] Bias contributions in a MEMS tuning fork gyroscope [2] Deformation modes and lip fracture during hole-flanging of circular plates of anisotropic materials MEMS thermal gyroscope with self-compensation of the linear acceleration effect [3] An innovation based random weighting estimation mechanism for denoising fiber optic gyro drift signal [4] Robust ellipsoid fitting method based on optimization of a novel nonlinear cost function in navigation systems [5] Effective bias warm-up time reduction for MEMS gyroscopes based on active suppression of the coupling stiffness [6] MEMS gyroscope temperature compensation based on drive mode vibration characteristic control [7] Microgyroscope temperature effects and compensation-control methods [8] A MEMS gyroscope readout circuit with temperature compensation [9] A CMOS-MEMS gyroscope interface circuit design with high gain and low temperature dependence [10] A TIA-based readout circuit with temperature compensation for MEMS capacitive gyroscope [11] Compensation of drifts in high-Q MEMS gyroscopes using temperature self-sensing [12] Active thermal compensation of MEMS based gyroscope [13] Compensation of temperature drift of MEMS gyroscope using BP neural network [14] Calibration of a novel MEMS inertial reference unit [15] Research on temperature compensation technology of micro-electro-mechanical systems gyroscope in strap-down inertial measurement unit [16] Simple and efficient thermal calibration for MEMS gyroscopes [17] An innovative wavelet threshold denoising method for environmental drift of fiber optic gyro [18] Research on fiber optic gyro signal de-noising based on wavelet packet soft-threshold [19] Fiber optic gyro noise reduction based on hybrid CEEMDAN-LWT method [20] Noise characteristics of MEMS gyro's null drift and temperature compensation [21] MEMS gyros temperature calibration through artificial neural networks [22] An innovative strategy for accurate thermal compensation of Gyro Bias in inertial units by exploiting a novel Augmented Kalman Filter [23] Robust extended Kalman filter based state estimation for nonlinear dynamic processes with measurements corrupted by gross errors [24] Strapdown inertial navigation technology

جبران بایاس متغیر با دما در ژایروسکوپ‌های نرخی میکروالکترومکانیکی با استفاده از فیلتر کالمن گسترش‌یافته در حرکات شتاب‌دار

مجتبی میرزائی* PhD

"پژوهشکده علوم و فنون هوادریا" و "دانشکده مهندسی مکانیک"، دانشگاه
شیراز، شیراز، ایران

ایمان حسینی MSc

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

بایاس اولیه در ژایروهای نرخی میکروالکترومکانیکی متغیری تصادفی است که با هر بار روشن و خاموش شدن تغییر می‌کند. می‌توان به کمک میانگین‌گیری خطا در حالت سکون یا با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقدار بایاس اولیه را تخمین زد و اثرات آن را کاهش داد. به علاوه، این بایاس با دما و شتاب خطی نیز تغییر می‌کند. معمولاً برای جبران‌سازی دما از منحنی‌های استخراج‌شده از آزمایش‌های بررسی اثر تغییر دما بر روی بایاس استفاده می‌شود. این منحنی‌ها تقریبی بوده و با گذشت زمان اثر خطای آنها در زاویه محاسبه‌شده از ژایروی نرخی، بر هم انباشته شده و دقت نتایج کاهش می‌یابد. در این مطالعه سعی شده است تا با تلفیق نتایج فیلتر کالمن توسعه‌یافته با نتایج این منحنی‌ها و بهره‌گیری از مزایای هر دو روش دقت محاسبات بهبود یابد. همچنین در مواردی که حرکت، شتاب‌دار است با کمک الگوریتم سویچ‌کننده از ورود داده‌های اشتباه به تخمین جلوگیری شده تا بایاس به‌صورت اشتباه تخمین زده نشود. در این حالت جبران‌سازی دمایی وظیفه اصلاح بایاس در اثر تغییر دما را از انتهای مرحله استفاده از فیلتر کالمن به عهده دارد. نتایج آزمون‌های تجربی بر روی حسگر مورد مطالعه نشان‌دهنده موثر بودن روش پیشنهادی در کاهش بایاس آن در حرکات شتاب‌دار طولانی‌مدت است.

کلیدواژه‌ها: ژایروسکوپ نرخی میکروالکترومکانیک، بایاس متغیر با دما، فیلتر کالمن توسعه‌یافته، حرکت شتاب‌دار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۰

*نویسنده مسئول: mmirzaei@shirazu.ac.ir

مقدمه

در ژایروهای میکروالکترومکانیکی منابع خطا را می‌توان به دو دسته اصلی ساختاری و محیطی تقسیم کرد. خطاهای ساختاری می‌توانند ناشی از خطاهای مکانیکی و یا اثرات میرایی و یا خرابی باشند [1]. خطاهای محیطی معمولاً ناشی از تغییر در دما، فشار، شتاب خطی، ارتعاش و یا دیگر محرک‌ها هستند. دو عامل محیطی که بیشتر روی خروجی ژایرو تأثیر می‌گذارند دما و شتاب خطی هستند [2]. عوامل دیگری نیز مانند فشار و ارتعاش تأثیرگذار هستند که در اینجا به آنها پرداخته نشده است. دمای داخلی ژایروی میکروالکترومکانیکی به دلیل تغییرات محیطی و یا عبور جریان در مدارهای الکتریکی حسگر (Sensor) تغییر می‌کند. به علاوه، شتاب خطی نیز می‌تواند بر خروجی ژایرو تأثیر بگذارد.

نویزهای تصادفی دیگری نیز در ژایرو به دلیل وجود مولفه‌های فرکانسی بالا وجود دارد که می‌توان آنها را به دو دسته تصادفی و یقینی تقسیم‌بندی کرد [3]. نویزهای یقینی طوری با سیستم در ارتباط هستند که رفتار آنها در هر لحظه توسط کالیبراسیون و یا اطلاعات داده‌شده توسط سازنده شناخته نشده است [4]. آفست بایاس و ضریب مقیاس دو دسته مهم از زیردسته‌های این نوع نویز به‌شمار می‌آیند. آفست بایاس اختلاف بین مقدار مورد انتظار خروجی و مقدار واقعی خروجی از حسگر است. آفست بایاس خطای درونی یک ژایروی میکروالکترومکانیکی است که به دلیل نقص در ساخت، عدم تراز بودن مکانیکی و یا نقص در طراحی به‌وجود می‌آید. همچنین، برای تبدیل ولتاژ آنالوگ حسگر به دیجیتال از ضریب مقیاس استفاده می‌شود. این عامل باعث ایجاد خطا به دلیل کوانتیزه کردن مقادیر ولتاژ آنالوگ می‌شود.

در مقایسه با نویزهای یقینی، نویزهای تصادفی را نمی‌توان هنگام جمع‌آوری داده‌ها از حسگر از قبل پیش‌بینی نمود. مشکل اصلی محققان مدل‌کردن نویز تصادفی به‌گونه‌ای است که بتوان داده‌ها را از میان آنها بیرون کشید. هدف اصلی جبران‌سازی، شناخت این نویز و حذف آن از داده‌های حسگر است. اما در این میان، بدون شک می‌توان گفت مهم‌ترین عاملی که خروجی ژایروی میکروالکترومکانیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد تغییر دما است. اهمیت این پارامتر با مشاهده تغییر خروجی تمامی ژایروهای میکروالکترومکانیکی و اضافه‌شدن خطا به آن تحت تأثیر دما روشن می‌شود. بررسی تأثیر دما بر تخریب عملکرد ژایروی میکروالکترومکانیکی بسیار مهم است. تغییر دما باعث تغییر در ویژگی‌های میکروالکترومکانیکی مواد سازنده ساختار ژایروی میکروالکترومکانیکی می‌شود. برخی از فاکتورهایی که تحت تأثیر دما تغییر می‌کنند شامل فرکانس رزونانس، فاکتور (Quality Q Factor)، خروجی ژایرو و انبساط مواد است.

برای جبران اثرات خطاهای ناشی از تغییر دما روش‌های متفاوتی وجود دارد. جبران‌سازی دمایی را می‌توان توسط طراحی مدارهای سخت‌افزاری [5, 6] و یا تحلیل داده‌ها پس از خواندن مقادیر حسگر انجام داد. جبران‌سازی سخت‌افزاری سریع‌تر از پردازش داده است و بنابراین به‌عنوان اولین روش می‌توان از آن استفاده نمود. طراح یک ژایروی میکروالکترومکانیکی می‌تواند اصلاحاتی را در مدار برای جبران‌سازی اثرات دما انجام دهد. در این روش جبران‌سازی توسط ساخت یک دستگاه کنترل دما انجام می‌شود. این دستگاه دمای حسگر را در نقطه بهینه عملکردی نگه می‌دارد. یک دستگاه ترمو-الکترونیک برای گرم‌کردن و خنک‌کردن حسگر می‌تواند استفاده شود. از بازخورد دمایی به‌عنوان ورودی خنک‌کننده استفاده می‌شود تا دما را در نقطه مورد نیاز نگه دارد. مزیت این روش این است که طراحی حسگر و طراحی مدار کنترل دما می‌تواند به‌صورت مستقل انجام شود. بنابراین انعطاف‌پذیری در طراحی بیشتر می‌شود [7].

پژوهش زیبا و همکاران [7]، ناپایداری بایاس از ۱۲ به ۶/۷ درجه بر ثانیه با استفاده از این روش کاهش داده شد.

نمودارهای خطی را می‌توان از برازش منحنی‌های چندجمله‌ای به‌دست آورد. نمودارهای چندجمله‌ای می‌توانند از مرتبه بالاتر باشند و باعث ایجاد یک سیستم غیرخطی می‌شوند که در برخی از موارد مناسب نیست. پیچیدگی چندجمله‌ای‌ها را می‌توان با تقسیم بازه دمایی به قسمت‌های مختلف به‌گونه‌ای که به‌جای چندجمله‌ای مرتبه بالا تعدادی یک‌جمله‌ای به‌دست بیاید، کاهش داد. بنابراین پیچیدگی سیستم بسیار کاهش پیدا می‌کند و یک سیستم خطی به‌دست می‌آید [7]. همچنین، میانگین‌گیری بیشتر برای فیلترکردن نویزهای فرکانس بالا در داده‌ها و نه برای جبران‌سازی دمایی استفاده می‌شود. از این روش نمی‌توان مستقیماً برای جبران‌سازی دمایی استفاده نمود. از آنجایی که داده‌های خام حس‌گر معمولاً با نویز زیادی همراه است و نمی‌توان روند تغییرات دمایی را به‌خوبی در آنها مشاهده کرد، از این فیلتر برای حذف نویز استفاده می‌شود تا این روند به‌خوبی مشاهده شود.

روش تجزیه ویولت براساس استخراج اطلاعات از بین داده‌های نویزی و یا فرکانس بالا استفاده می‌شود [17, 18]. روند تغییرات دمایی در حضور نویزهای فرکانس بالا به‌خوبی مشخص نیست. روش تجزیه ویولت، یک روش قوی برای به‌دست‌آوردن اطلاعاتی در مورد الگوی فرکانس پایین داده‌ها است. داتگ و همکاران [19]، از تجزیه ویولت برای استخراج روند دریافت استفاده کردند و از آن اطلاعات برای تشکیل مدلی برای دریافت بهره‌برده‌اند. روش شبکه عصبی با انتشار به عقب یکی دیگر از روش‌های مرسوم برای جبران‌سازی دمایی است [7, 13, 20, 21]. شیائو و همکاران [20]، نشان دادند که شبکه عصبی می‌تواند برای جبران‌سازی دمایی به‌کار رود و نتایج جبران‌سازی با نتایج به‌دست‌آمده از روش برازش منحنی قابل مقایسه است. بنابراین شبکه عصبی می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای جبران‌سازی دمایی به‌کار رود. در مطالعه زیبا و همکاران [7]، شبکه عصبی به‌عنوان روشی جایگزین استفاده شد و نشان داده شد که این روش برای حذف وابستگی دمایی در ژاپروهای میکروالکترومکانیکی موثر است. این روش در مقایسه با دیگر تکنیک‌ها خیلی سریع نیست و هنگام پیاده‌سازی به‌صورت زمان حقیقی باید مصالحه‌ای انجام شود. بیشتر کارهایی که تاکنون با شبکه عصبی با انتشار به عقب انجام شده است به‌صورت شبیه‌سازی است [7, 13] و تنها یک مقاله، مقادیر آزمایشگاهی را گزارش کرده است [20]. در مقاله‌های زیادی از فیلتر کالمن برای جبران دریافت در ژاپرو به‌صورت زمان حقیقی و تخمین استفاده شده است [3, 19, 22, 23].

روشی که در این مقاله پیشنهاد شده است در واقع یک روش دومرحله‌ای است که در ابتدا فیلتر کالمن برای بایاس اولیه استفاده می‌شود و سپس از جبران‌سازی دمایی توسط منحنی چندجمله‌ای استفاده می‌شود. رفتار دمایی بایاس ژاپرو با انجام آزمایش‌های دمایی ثبت شده و مدل تغییرات آن به‌دست آمده

روش دیگر کنترل اثرات دمایی، استفاده از مدارهای است و ویژگی‌های آن مستقل از تغییرات دمایی است. در مطالعه ژانگ و همکاران [8]، از مدارهای روی خود برد الکتریکی استفاده شده است که از جریان متناسب با دمای مطلق (Proportional to Absolute Temperature; PTAT) برای جبران‌سازی دریافت دمایی استفاده شده است. جریان PTAT نوسان‌گرها را کنترل می‌کند و در فرکانس نوسان‌گرها برای جبران افزایش دما تاخیر می‌اندازد و برای بازه گسترده‌ای از دما قابل استفاده است. این روش صراحتاً بیان می‌کند که هر ویژگی از مدار که با دما تغییر می‌کند، می‌تواند به‌عنوان بازخورد مدار حس‌گر استفاده شود.

از جریان (Complementary to Absolute Temperature; CTAT) نیز برای جبران‌سازی دمایی دریافت در ژاپروهای میکروالکترومکانیکی خازنی می‌توان استفاده نمود. یک رابطه خطی بین جریان CTAT و تغییرات دمایی در ژاپروسکوپ می‌توان پیدا نمود و از آن برای کالیبراسیون دمایی استفاده کرد. فنچ و همکاران [2]، از یک ژاپروسکوپ (Gyroscope) میکروالکترومکانیکی خازنی برای جبران‌سازی دریافت دمایی با ایجاد تغییراتی در طراحی و استفاده از CTAT بهره‌بردند. به‌جای استفاده از جریان‌های CTAT و PTAT، قطعات خاصی را می‌توان به مدار یک ژاپروی میکروالکترومکانیکی اضافه نمود تا وابستگی دمایی حس‌گر را کاهش داد. این جبران‌سازی را می‌توان با اضافه‌نمودن قطعاتی جهت جبران‌سازی در مدار دراپو حس‌گر به‌دست آورد. در پژوهش‌های سان و همکاران [9] و بین و همکاران [10]، یک تقویت‌کننده اختلاف دیفرانسیل (Difference Differential Amplifier; DDA) در ورودی دراپو برای جبران‌سازی اثرات دمایی یک حس‌گر استفاده نموده‌اند.

فرکانس رزونانس با تغییرات دمایی نوسانگر تغییر می‌کند. اختلاف بین فرکانس رزونانس دو نوسانگر، که ضریب نوسانی متفاوتی دارند می‌تواند برای جبران‌سازی دما استفاده شود [7, 11]. در مطالعه چیو و همکاران [12]، از این ویژگی برای خواندن دمای اصلی ژاپروی میکروالکترومکانیکی بهره‌برده‌اند. جبران‌سازی دمایی در این روش، با استفاده از ترکیب‌کننده فرکانسی مبتنی بر (Field Programmable Gate Arrays) که پارامترهای کالیبراسون را تعیین می‌کند انجام می‌شود.

اما جبران‌سازی سخت‌افزاری همیشه امکان‌پذیر نیست زیرا بسیاری از طراحی‌ها نیازمند حس‌گر بدون مدارات جانبی هستند و مشخصات دمایی آنها شناخته‌شده نیست. جبران‌سازی دمایی در این حالات، تنها براساس پردازش داده‌های به‌دست‌آمده از حس‌گر امکان‌پذیر است. برازش منحنی چندجمله‌ای رایج‌ترین تکنیک برای جبران‌سازی دمایی است [7, 13-16]. بکنتر [14] بهبود قابل توجه (۱۶ برابر) در ناپایداری بایاس را با استفاده از این روش برای جبران‌سازی دمایی نشان داد. در مطالعه ژانگ و همکاران [13]، مقایسه‌ای بین این روش و دیگر روش‌ها انجام داده شده است و ادعا شده است که روش شبکه عصبی بهتر از این روش است. در

تغییر می‌کند و حتی با وجود جبران‌سازی دمایی این عامل باعث خطا می‌شود. بنابراین، در این روش، بسته به اینکه چقدر زمان در اختیار است تعدادی از داده‌های اولیه در تخمین فیلتر کالمن استفاده نمی‌شود و از داده‌هایی استفاده می‌شود که تغییرات اولیه در آن وجود نداشته باشد و قابلیت اطمینان بیشتری داشته باشند. پس از به‌دست‌آوردن بایاس اولیه می‌توان از منحنی تغییرات دمایی برای در نظر گرفتن اثرات دما روی بایاس استفاده کرد و به محض اینکه امکان استفاده از داده‌های شتاب‌سنج وجود داشته باشد بایاس‌گیری تکرار شده و اثر منحنی دمایی کنار گذاشته شود.

روابط مربوط به فیلتر کالمن گسترش‌یافته گسسته را می‌توان در معادلات ۱ تا ۱۹ مشاهده نمود. فرض کنید سیستم دارای مدلی به صورت زیر باشد:

$$x_k = f_{k-1}(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1})$$

$$y_k = h_k(x_k, v_k)$$

در این روابط x بردار حالت‌های حقیقی سیستم و y بردار اندازه‌گیری بوده و k شمارنده در فضای گسسته است. توجه شود که در این روابط

$$x_k \in \mathcal{R}^n, f_k(x_k): \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^n$$

$$v_k \in \mathcal{R}^r$$

$$w_k \in \mathcal{R}^n$$

و $\{v_k\}$ و $\{w_k\}$ نویز گوسی مستقل با میانگین صفر به ترتیب برای متغیرهای اندازه‌گیری و دینامیک سیستم هستند و ماتریس کوارینانس آنها Q و R هستند که در آن:

$$E[v_k v_k^T] = R_k, E[w_k w_k^T] = Q_k$$

همچنین n در این روابط تعداد متغیر حالت و r تعداد متغیرهای اندازه‌گیری است. با استفاده از بسط سری تیلور حول نقطه x_{k-1} رابطه زیر به‌دست می‌آید:

(۳)

که در آن F ما و \tilde{u} و \tilde{w} از رابطه ۴-۶ محاسبه می‌شود.

$$F_{k-1} = \frac{\partial f_{k-1}}{\partial x} \Big|_{\hat{x}(k-1|k-1)} \quad (۴)$$

$$\tilde{u}_{k-1} = f_k(\hat{x}(k|k), u_k, 0) - F_k \hat{x}(k|k) \quad (۵)$$

$$\tilde{w}_{k-1} \sim (0, L_k Q_k L_k^T) \quad (۶)$$

و همچنین ماتریس L در رابطه ۶ از معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$L_{k-1} = \frac{\partial f_{k-1}}{\partial w} \Big|_{\hat{x}(k-1|k-1)} \quad (۷)$$

سپس معادله اندازه‌گیری را حول نقطه $x_k = x(k|k-1)$ و $v_k = 1$ خطی‌سازی می‌کنیم:

$$y_k = H_k x_k + z_k + \tilde{v}_{k-1} \quad (۸)$$

$$H_k = \frac{\partial h_k}{\partial x} \Big|_{\hat{x}(k|k-1)} \quad (۹)$$

$$z_k = h_k(\hat{x}(k|k-1), 0) - H_k \hat{x}(k|k-1) \quad (۱۰)$$

$$\tilde{v}_k \sim (0, M R_k M_k^T) \quad (۱۱)$$

حال معادلات دینامیک سیستم و اندازه‌گیری، خطی شده و می‌توانیم از فیلتر کالمن استاندارد برای تخمین حالات استفاده کنیم. در ادامه معادلات بروزرسانی حالات و کوارینانس خطای تخمین P را اعمال می‌کنیم.

است. از این مدل در جبران‌سازی دمایی استفاده می‌شود. همچنین از آنجایی که بایاس تخمین‌زده‌شده از فیلتر کالمن تنها در مواردی قابل قبول است که شتاب خطی در محدوده قابل قبول باشد، سعی شده است تا به ارایه روشی بر پایه سویچینگ در مواردی که شتاب در محدوده مجاز است از فیلتر کالمن استفاده شده و در مواردی که شتاب بالاتر از محدوده مجاز است از منحنی چندجمله‌ای استفاده می‌شود. در این حالت هر بار بایاس تخمین‌زده‌شده بروزرسانی شده و مانند روش‌های خاموش قبلی خطاها بر روی هم انباشته نمی‌شوند. به‌علاوه، استفاده از منحنی چندجمله‌ای تصحیح دما دقیقاً از انتهای مرحله استفاده از فیلتر کالمن شروع می‌شود تا نتایج بهبود یابد.

تخمین بایاس با استفاده از فیلتر کالمن گسترش‌یافته

بایاس اولیه در ژایروهای میکروالکترومکانیکی با هر بار روشن و خاموش شدن حس‌گر تغییر می‌کند این موضوع باعث می‌شود تا حتی اگر اثرات تغییرات دمایی در نظر گرفته شده باشد زاویه انتگرال‌گیری‌شده از ژایروی نرخی، از نقطه اشتباه شروع شده و در نتیجه در هر لحظه مقدار بایاس اشتباه به‌دست می‌آید و به‌جای اینکه خروجی‌ها بهبود یابند بیشتر خراب می‌شوند. راه‌حل این مشکل اندازه‌گیری بایاس با هر بار روشن و خاموش شدن ژایرو است. در بسیاری از مقالات از ساده‌ترین روش برای اندازه‌گیری بایاس اولیه استفاده شده است. در این روش با اندازه‌گیری خروجی سرعت زاویه‌ای ژایرو و میانگین‌گیری از آنها بایاس اولیه به‌دست می‌آید. این روش یک اشکال عمده دارد و آن این است که در بسیاری از کاربردهای عملی نمی‌توان شرایطی را برای ژایرو فراهم کرد که کاملاً ساکن و بدون حرکت باشد. هر گونه حرکتی اندازه‌گیری شده و در میانگین‌گیری تاثیر می‌گذارد و بنابراین بایاس اولیه اشتباه به‌دست می‌آید. روش پیشنهادی استفاده از فیلتر کالمن گسترش‌یافته برای به‌دست‌آوردن بایاس اولیه است. مزیت این روش این است که حتی اگر حرکاتی با شتاب کم وجود داشته باشد با استفاده از فیلتر کالمن گسترش‌یافته می‌توان مقادیر نرخ را با دقت مناسبی به‌درستی تخمین زد و نهایتاً برای بهبود نتایج مقدار میانگین تخمین را به‌عنوان بایاس اولیه معرفی کرد. مزیت دیگر این روش این است که حتی می‌توان در حین عملکرد نیز در صورت نیاز بایاس‌گیری را انجام داد. این باعث می‌شود تا خطاهای مربوط به تغییرات منحنی با دما کمتر شود. برای استفاده از این روش از اطلاعات شتاب‌سنج نیز استفاده می‌شود. بدین ترتیب که با تحلیل داده‌های شتاب‌سنج می‌توان تشخیص داد که حرکت وسیله آرام یا شدید است. اگر حرکت آرام باشد و دارای تغییرات شدید نباشد فیلتر کالمن فعال شده و با تکرار روند تخمین، بایاس را مجدداً به‌دست می‌آورد. نکته دیگری که در این روش مد نظر قرار داده شده است استفاده از داده‌ها با قابلیت اطمینان بالاتر است. با مشاهده داده‌های عملی دیده می‌شود که مقدار بایاس در لحظات اولیه شروع به کار به‌سرعت

در الگوریتم سویچینگ دو باند داخلی و بیرونی در نظر گرفته شده است. تعیین این دو باند براساس رفتار دینامیکی وسیله مورد آزمایش انجام می‌شود. هنگامی که اندازه شتاب در باند درونی قرار بگیرد می‌توان فرض کرد وسیله تقریباً در حالت شبه سکون قرار دارد و با استفاده از فیلتر کالمن و همچنین نمودار برازش شده دمایی اثرات تغییر دما بر روی بایاس را جبران نمود. هنگامی که اندازه شتاب بین باند داخلی و بیرونی قرار گیرد از ترکیب وزن‌دار داده‌های شتاب‌سنج و ژایرو استفاده می‌شود و در خارج از باند بیرونی فقط از اطلاعات ژایرو و نمودار برازش دمایی برای برورسانی بایاس استفاده می‌شود.

در باند داخلی فرض می‌شود که: $1/015 \times$ مقدار شتاب اولیه < مقدار شتاب اندازه‌گیری شده < $1/985 \times$ مقدار شتاب اولیه باشد. و در باند بیرونی: $1/2 \times$ مقدار شتاب اولیه < مقدار شتاب اندازه‌گیری شده < $0/8 \times$ مقدار شتاب اولیه است.

در الگوریتم سویچینگ علاوه بر معیار اندازه، تغییرات شتاب هم مد نظر قرار داده می‌شود. اگر تغییرات شتاب زیاد باشد یعنی وسیله دارای حرکات شتاب‌دار است و نمی‌توان از تلفیق استفاده نمود. برای معیار تغییرات شتاب ضریب ۲۰٪ در نظر گرفته شد تا اگر شیب تغییرات شتاب بیشتر از ۲۰٪ مقدار میانگین آن باشد حرکت شتاب‌دار در نظر گرفته می‌شود.

نتایج تجربی

برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی از یک واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) ساخت شرکت Analog Device استفاده شده است. این حس‌گر از سه ژایروسکوپ، سه شتاب‌سنج و سه مغناطیس‌سنج و همچنین دماسنج و برخی حس‌گرهای دیگر تشکیل شده است. ساختار این حس‌گر بر پایه تکنولوژی سیستم‌های میکروالکترومکانیک است. این حس‌گر به همراه برد و رابط تبدیل پروتکل CAN به RS232 در شکل ۱ نشان داده شده است.

برای نشان‌دادن اثر دما بر روی اندازه‌گیری‌های این حس‌گر از یک محفظه دمایی استفاده شده است. روش انجام آزمایش در محفظه بدین صورت بوده است که ابتدا حس‌گر خاموش بوده و دمای محفظه تنظیم می‌شود. سپس به مدت ۳۰ دقیقه صبر کرده تا حس‌گر به دمای محیط برسد. سپس آن را روشن نموده و باز به مدت ۳۰ دقیقه صبر نموده تا حس‌گر به دمای کار برسد. پس از رسیدن به حالت پایدار، داده‌ها را ذخیره نموده و همین روند را در دماهای دیگر نیز تکرار شده است. سپس نتایج با استفاده از نرم‌افزار متلب تحلیل شده و نموداری بر داده‌ها در دماهای مختلف برازش گشته است تا در دماهای میانی نیز بتوان روند تغییرات بایاس را به‌دست آورد. نمودارهای ۱ و ۲ به ترتیب روند تغییرات بایاس با دما و همچنین انحراف زوایا در اثر بایاس در دمای محیط ۵ درجه در سه کانال رول، پیچ و یاو را نشان می‌دهد.

$$P_{(k|k-1)} = F_{k-1}P_{(k-1|k-1)}F_{k-1}^T + L_{k-1}Q_{k-1}L_{k-1}^T \quad (12)$$

$$\hat{x}_{(k|k-1)} = f_{k-1}(\hat{x}_{(k|k-1)}, u_{k-1}, 0) \quad (13)$$

و در نهایت برورسانی اندازه‌گیری را اعمال می‌کنیم و ماتریس گین فیلتر کالمن K را به‌دست می‌آوریم:

$$K_k = P_{(k|k-1)}H_k^T (H_kP_{(k|k-1)}H_k^T + M_kR_kM_k^T)^{-1} \quad (14)$$

$$\hat{x}_{(k|k)} = \hat{x}_{(k|k-1)} + K_k[y_k - h_k(\hat{x}_{(k|k-1)}, 0)] \quad (15)$$

$$P_{(k|k)} = [I - K_kH_k] * P_{(k|k-1)} \quad (16)$$

در این مقاله مقادیر اندازه‌گیری شده زوایای رول (ϕ) پیچ (θ) و یاو (ψ) به‌دست‌آمده از شتاب‌سنج و مغناطیس‌سنج و بردار ورودی فیلتر کالمن نرخ‌های به‌دست‌آمده از ژایرو (p, q, r) هستند. بردار حالت نیز شامل زوایا و بایاس در سه کانال است. یعنی:

$$x = [\phi \ \theta \ \psi \ b_p \ b_q \ b_r] \quad (17)$$

معادلات فضای حالت را می‌توان این گونه بیان نمود:

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= (bp - p + \cos(\phi)) \tan(\theta) (br - r) + \sin(\phi) \tan(\theta) (bq - q) \\ \dot{\theta} &= (\cos(\phi)(bq - q) - \sin(\phi)(br - r)); \\ \dot{\psi} &= (\sin(\phi)(bq - q) / \cos(\theta) + (\cos(\phi)(br - r) / \cos(\theta)) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\dot{b}_p = 0$$

$$\dot{b}_q = 0$$

$$\dot{b}_r = 0$$

که در آن bp ، bq و br بایاس ژایرو در سه کانال است. در نوشتن روابط فوق از معادلات حاکم بر جسم صلب استفاده شده است [24] و با فرض اینکه به دنبال بایاس ثابت هستیم مشتقات آنها صفر در نظر گرفته شده است.

معادله بالا در واقع معادله مربوط به f در معادله ۱ است و ماتریس اندازه‌گیری نیز با توجه به اینکه مقادیر اندازه‌گیری شده زوایای رول (ϕ) پیچ (θ) و یاو (ψ) هستند، این گونه نوشته می‌شود:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \text{zeros}(3,6) \end{bmatrix} \quad (19)$$

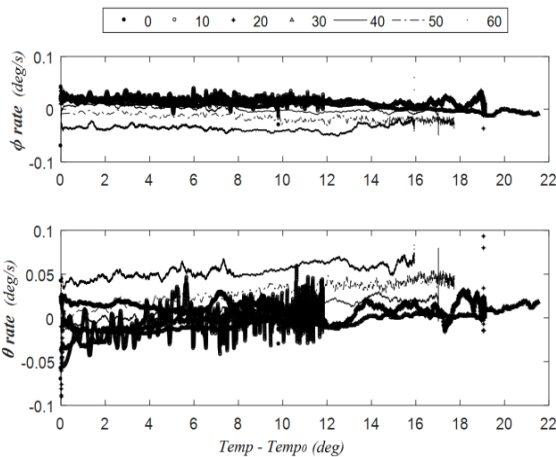
الگوریتم سویچینگ در حرکات شتاب‌دار

با توجه به اینکه مقدار شتاب جاذبه در مناطق مختلف اندکی متفاوت است، برای رسیدن به دقت مناسب، مقدار شتاب در هر بار روشن شدن حس‌گر اندازه‌گیری شده و این مقدار مبنای محاسبات قرار می‌گیرد. در حالت کم شتاب، اندازه شتاب کلی سیستم باید در بازه قابل قبولی قرار داشته باشد. بنابراین اگر وسیله در این بازه قرار داشته باشد می‌توان آن را تقریباً در حالت سکون فرض کرد و از فیلتر کالمن برای برورسانی مقدار بایاس استفاده نمود.

تغییرات بایاس در دماهای مختلف که برای مشاهده روند تغییرات از یک نقطه رسم شده‌اند در نمودار ۳ دیده می‌شود که با وجود بایاس اولیه مختلف در دماهای متفاوت روند تغییرات بایاس تقریباً یکسان است و با دانستن نقطه شروع می‌توان با یک معادله دمایی که از برازش به دست می‌آید بایاس متغیر با دما را در حالت خارج از بازه قابل قبول به دست آورد.

معادله نمودارهای برازش شده برای جبران اثرات تغییر دمایی به صورت زیر قابل مشاهده است. برای به دست آوردن معادلات زیر، قسمتی از داده‌های ابتدایی به دلیل حالت گذرای سریع و زیاد در برازش منحنی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند تا دقت نمودارهای به دست آمده بیشتر شود. ضرایب مربوط به برازش منحنی دمایی در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

$$W = p_1(T - T_0) + p_2 \quad (20)$$



نمودار (۳) بایاس در دماهای محیطی مختلف و رسم شده از یک نقطه

جدول (۱) ضرایب مربوط به برازش منحنی دمایی

زاویا	P_1	P_2
رول (Roll)	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۲
پیچ (Pitch)	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۴۴
یاء (Yaw)	۰/۰۰۱۲	۰/۰۱۹۲

در ادامه استفاده از فیلتر کالمن گسترش یافته نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که فیلتر کالمن گسترش یافته می‌تواند در حرکات شتاب‌دار با زمان کم مقدار مرجع را با دقت تقریباً مناسبی دنبال کند. اما با طولانی شدن مدت زمان حرکات شتاب‌دار، دیگر قادر به دنبال کردن مقدار مرجع نیست. همچنین در این بازه زمانی ژایرو به دلیل خطای دریافت و تغییرات ناشی از اثرات دمایی از مقدار اصلی فاصله گرفته است. نمودار ۴ نشان می‌دهد که حرکات شتاب‌دار بوده است و در بازه‌ای از زمان این حرکات زیاد است. اندازه شتاب کلی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \sqrt{acc_x^2 + acc_y^2 + acc_z^2} \quad (21)$$

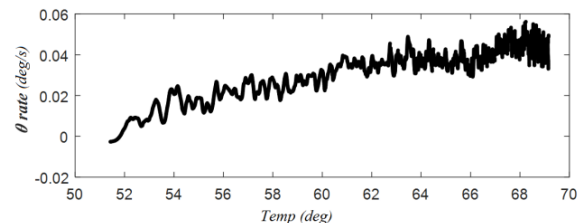
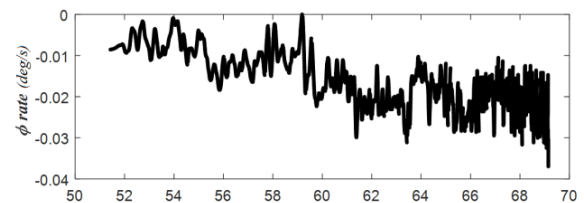


(الف)

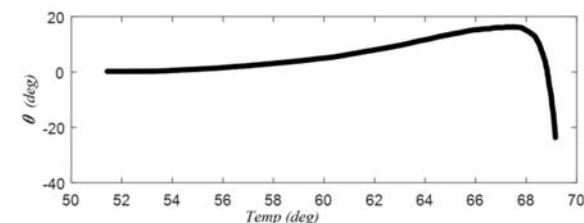
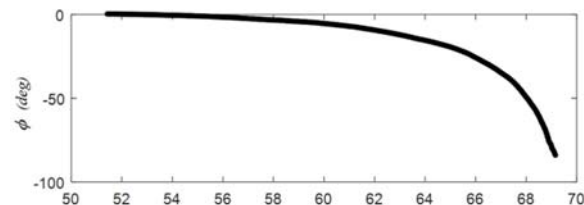


(ب)

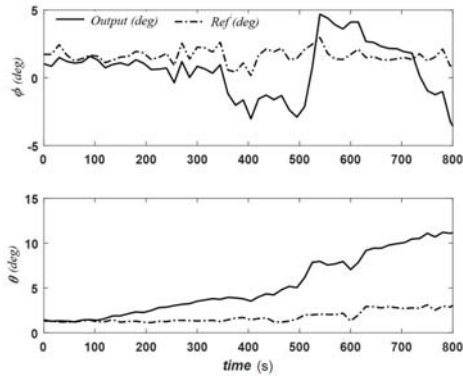
شکل (۱) الف) حس گر محصول شرکت Analog Device استفاده شده در آزمایش تجربی، ب) محفظه مورد استفاده جهت آنالیز دمایی



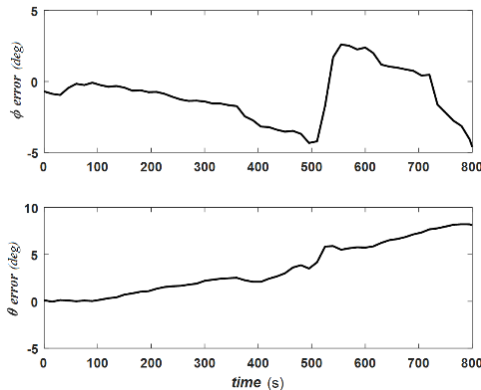
نمودار (۱) تغییرات بایاس با دما در دمای محیطی ۵۰ درجه



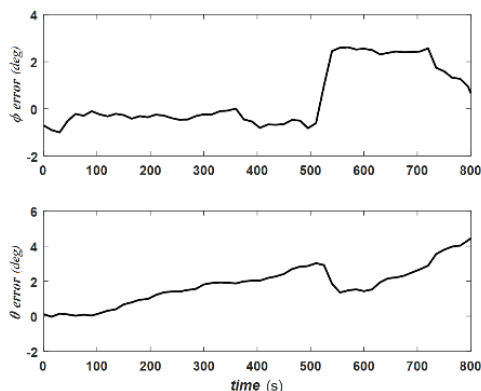
نمودار (۲) تغییرات زوایا در اثر بایاس متغیر با دما



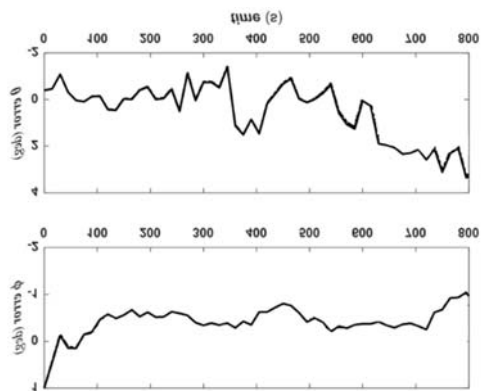
نمودار ۵) زوایه به‌دست‌آمده از ژایرو بدون تلفیق و بدون جبران‌سازی دمایی



نمودار ۶) خطای زوایه به‌دست‌آمده از ژایرو بدون تلفیق و بدون جبران‌سازی دمایی



نمودار ۷) خطای زوایه به‌دست‌آمده از ژایرو بدون تلفیق و با جبران‌سازی دمایی در کل مسیر

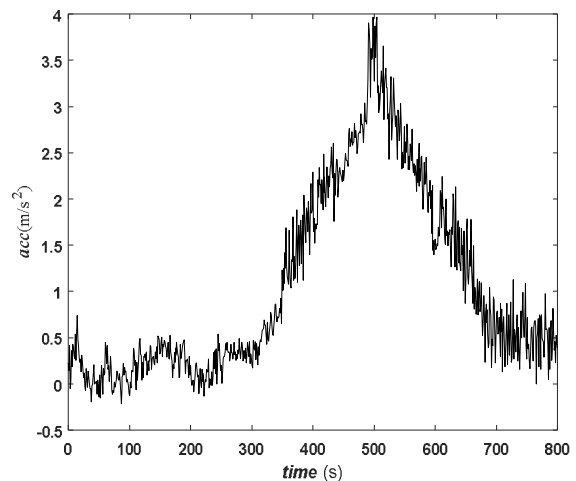


نمودار ۸) خطای زوایه به‌دست‌آمده از ژایرو با تلفیق و با جبران‌سازی دمایی در حرکات شتاب‌دار

که در آن acc_x و acc_y و acc_z مولفه‌های شتاب در دستگاه بدنی هستند. حال اگر مقدار α و نرخ تغییرات آن در بازه مجاز باشد از فیلتر کالمن استفاده می‌شود و اگر خارج از این بازه قرار داشته باشد از منحنی دمایی برای جبران اثرات بایاس بهره برده شده است. همان طور که در نمودار مشخص است از ثانیه ۳۵۰ تا ۸۰۰ حرکات شتاب‌دار است. در این بازه تلفیق جواب مناسبی نمی‌دهد و بهتر است از آن استفاده نشود اما با توجه به اینکه اثرات ناشی از تغییرات دمایی در این بازه وجود دارد جبران‌سازی دمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر برای جبران‌سازی در زمان مشخصی الگوریتم سویچینگ تشخیص داد که عمل تلفیق نباید صورت بگیرد، دمای آن لحظه طبق رابطه ۲۰ تاثیر دما بر نرخ ژایرو را مشخص می‌نماید. برای اینکه اثر ناشی از دما به خوبی مشخص شود، در نمودار ۵ زاویه رول و پیچ مرجع در مقایسه با زوایای جبران‌سازی نشده ژایرو نشان داده شده است. همان طور که از نمودار مشخص است زوایای به‌دست‌آمده از ژایرو با گذشت زمان از مقدار مرجع فاصله گرفته است. خطای به‌دست‌آمده در این حالت در نمودار ۶ نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود در زاویه رول خطا بین مقادیر ۵- و ۳- نوسان داشته و زاویه پیچ نیز تا حدود ۸ درجه در مدت زمان ۸۰۰ ثانیه خطا گرفته است.

در قسمت بعد، جبران‌سازی دمایی به سیستم اعمال شده است اما تلفیق در آن اعمال نشده است. در نمودار ۷ می‌توان مشاهده نمود که خطا در این حالت تا ۳ درجه در زاویه رول و ۵ درجه زاویه پیچ است.

در نهایت نمودار ۸ حالتی را نشان می‌دهد که در آن خطای زوایه رول به‌دست‌آمده با تلفیق و با جبران‌سازی دمایی در حرکات شتاب‌دار حدود ۱ درجه و در زاویه پیچ حدود ۳ درجه است. همان طور که مشاهده می‌شود استفاده همزمان از این دو روش خطا را کاهش داده است. هر چند که به هر حال زمانی که مدت زمان شتاب‌گیری زیاد باشد خطای ژایروسکوپ جمع‌شونده است و به مرور قابل توجه خواهد شد.



نمودار ۹) مقادیر شتاب محوری در دستگاه بدنی

- 3- Narasimhappa M, Sabat SL, Peesapati R, Nayak J. An innovation based random weighting estimation mechanism for denoising fiber optic gyro drift signal. *Optik*. 2014;125(3):1192-1198.
- 4- Mirzaei M, Hosseini I. Robust ellipsoid fitting method based on optimization of a novel nonlinear cost function in navigation systems. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences Engineering*. 2019;41(6):247-256.
- 5- Cui J, Zhao Q, Yan GJM. Effective bias warm-up time reduction for MEMS gyroscopes based on active suppression of the coupling stiffness. *Microsystems and Nanoengineering*. 2019;5(1):1-12.
- 6- Cui M, Huang Y, Wang W, Cao H. MEMS gyroscope temperature compensation based on drive mode vibration characteristic control. *Micromachines*. 2019;10(4):248.
- 7- Xia D, Chen S, Wang S, Li H. Microgyroscope temperature effects and compensation-control methods. *Sensors*. 2009;9(10):8349-8376.
- 8- Zhang C, Wu Q-S, Yin T, Yang H-G. A MEMS gyroscope readout circuit with temperature compensation. In *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, 5th IEEE International Conference, 20-23 January 2010, Xiamen, China. Xiamen: IEEE; 2010.
- 9- Sun H, Jia k, Liu X, Yan G, Hsu Y-W, Fox RM, et al. A CMOS-MEMS gyroscope interface circuit design with high gain and low temperature dependence. *IEEE Sensors Journal*. 2011;11(11):2740-2748.
- 10- Yin T, Wu H, Wu Q, Yang H, Jiao J. A TIA-based readout circuit with temperature compensation for MEMS capacitive gyroscope. In *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, IEEE International Conference, 20-23 February 2011, Kaohsiung, Taiwan. Kaohsiung: IEEE; 2011.
- 11- Prikhodko IP, Trusov AA, Shkel AM. Compensation of drifts in high-Q MEMS gyroscopes using temperature self-sensing. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013;201:517-524.
- 12- Chiu S-R, Sue Ch-Y, Lin Ch-H, Teng L-T, Liao L-P, Hsu Y-W, et al. Active thermal compensation of MEMS based gyroscope. In *Sensors, 2012 IEEE*, 28-31 October 2012, Taipei, Taiwan. Taipei: IEEE; 2013.
- 13- Zhang Q, Tan Z, Guo L. Compensation of temperature drift of MEMS gyroscope using BP neural network. In *International Conference on Information Engineering and Computer Science*, 19-20 December 2009, Wuhan, China. Wuhan: IEEE; 2009.
- 14- Bekkeng JK. Calibration of a novel MEMS inertial reference unit. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 2009;58(6):1967-1974.
- 15- Liu Y, Liu C, Xu J, Zhao X. Research on temperature compensation technology of micro-electro-mechanical systems gyroscope in strap-down inertial measurement unit. In *The Euro-China Conference on Intelligent Data Analysis and Applications*, 25 December 2018. Berlin: Springer; 2018.
- 16- Nez A, Fradet L, Laguillaumie P, Monnet T, Lacouture P. Simple and efficient thermal calibration for MEMS gyroscopes. *Medical engineering physics*. 2018;55:60-67.
- 17- Zhang Q, Wang L, Gao P, Liu Z. An innovative wavelet threshold denoising method for environmental drift of fiber optic gyro. *Mathematical Problems in Engineering*. 2016;2016:1-8.
- 18- Huaming Q, Jichen M. Research on fiber optic gyro signal de-noising based on wavelet packet soft-threshold. *Journal of Systems Engineering and Electronics*. 2009;20(3):607-612

روش پیشنهادی در این مقاله استفاده از تلفیق فیلتر کالمن گسترش یافته و منحنی‌های تصحیح خطای خاموش به همراه یک الگوریتم سویچ کننده برای حرکات پرشتاب برای جبران سازی بایاس در ژایروهای نرخی میکروالکترومکانیکی است. مزیت این روش این است که اگر حرکتی با شتاب کم وجود داشته باشد با استفاده از فیلتر کالمن گسترش یافته می توان مقادیر بایاس را با دقت مناسبی به درستی تخمین زد و نهایتاً برای بهبود نتایج مقدار میانگین تخمین را به عنوان بایاس معرفی کرد. در حالت حرکات پرشتاب می توان از منحنی‌های تصحیح خطای خاموش بایاس گیری را از انتهای مرحله استفاده از فیلتر کالمن انجام داد. در ادامه، اگر حرکت آرام باشد و دارای تغییرات شدید نباشد فیلتر کالمن فعال شده و با تکرار روند، بایاس را مجدداً به دست می آورد و اثر منحنی دمایی کنار گذاشته شود. نتایج در سه حالت بدون تلفیق و بدون جبران سازی دمایی، بدون تلفیق و با جبران سازی دمایی و با تلفیق و با جبران سازی دمایی بررسی شده است. در حالت اول در زاویه رول در مدت زمان ۸۰۰ ثانیه ماکزیمم خطا حدود ۵ درجه بوده است. در زاویه پیچ نیز میزان خطا به حدود ۸ درجه رسیده است. در حالت دوم خطای زاویه رول به تقریباً ۳ درجه و خطای زاویه پیچ به حدود ۴/۵ درجه رسیده است. اما در حالت سوم که روش پیشنهادی این مقاله است میزان ماکزیمم خطا در زاویه رول به ۱ درجه و در زاویه پیچ به حدود ۳ درجه رسیده است. مشاهده می شود که با اعمال این روش در آزمون تجربی بهبود قابل توجهی در محاسبه بایاس و اثر آن در محاسبه زاویه خروجی در حرکات پرشتاب طولانی مدت حاصل شده است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از پژوهشکده علوم و فنون هوادریا دانشگاه شیراز بابت ایجاد تسهیلات در انجام این پروژه تشکر می نمایند.

تأییدیه اخلاقی: تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی، حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده آنها است.

تعارض منافع: این مقاله هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: مجتبی میرزایی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ ایمان حسینی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

منابع

- 1- Walther A, Le Blanc C, Delorme N, Deimerly Y, Anciant R, Willemin J. Bias contributions in a MEMS tuning fork gyroscope. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2013;22(2):303-308.
- 2- Feng R, Bahari J, Jones JD, Leung AM. MEMS thermal gyroscope with self-compensation of the linear acceleration effect. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013;203:413-420.

22- Fontanella R, Accardo D, Moriello R, Angrisani L, Simone D. An innovative strategy for accurate thermal compensation of Gyro Bias in inertial units by exploiting a novel Augmented Kalman Filter. *Sensors*. 2018;18(5):1457.

23- Hu G, Zhang Zh, Armaou A, Yan Zh. Robust extended Kalman filter based state estimation for nonlinear dynamic processes with measurements corrupted by gross errors. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2020;106:20-33.

24- Titterton D, Weston JL, Weston J. Strapdown inertial navigation technology. Stevenage: IET; 2004.

19- Dang Sh-W, Li L-J, Wang Q-Q, Wang K-L, Cheng P-Zh. Fiber optic gyro noise reduction based on hybrid CEEMDAN-LWT method. *Measurement*. 2020;161:107865-107877.

20 Shiau J-K, Huang C-X, Chang M-Y. Noise characteristics of MEMS gyro's null drift and temperature compensation. *Applied Science and Engineering*. 2012;15(3):239-246.

21- Fontanella R, Accardo D, Moriello RSL, Angrisani L, De Simone D. MEMS gyros temperature calibration through artificial neural networks. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018;279:553-565.