

## اندازه‌گیری زوایای سه‌بعدی با استفاده از IMU مبتنی بر فناوری MEMS

### به وسیله فیلتر کالمن تطبیقی

محسن نژادشاه‌بداغی، سید محمدرضا موسوی میرکلایی<sup>\*۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۷/۰۴/۰۵، پذیرش: ۹۷/۰۷/۲۱)

### چکیده

اندازه‌گیری زوایای سه‌بعدی در تعداد زیادی از کاربردها از جمله سامانه‌های موقعیت‌یابی INS استفاده می‌شود. اندازه‌گیری زاویه در حسگر شتاب‌سنج به دلیل اثر دیگر شتاب‌ها علاوه بر شتاب جاذبه با خطای زیادی همراه است. همچنین زاویه می‌تواند به وسیله انتگرال گرفتن از خروجی ژيروسکوپ به دست آید، اما در عمل به خاطر مشکل دریافت در ژيروسکوپ، زاویه اندازه‌گیری از مقدار واقعی دور است که این مقدار خطا در طول زمان افزایش می‌یابد. در این مقاله، با استفاده از ترکیب ویژگی‌های شتاب‌سنج و ژيروسکوپ به وسیله یک فیلتر کالمن تطبیقی توانسته‌ایم نقاط ضعف هر یک از این دو حسگر را بپوشانیم. به منظور تطبیقی کردن فیلتر مورد نظر از یک سامانه فازی استفاده شده است. در این سامانه فازی، ورودی خطای فرآیند است که اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری و مقدار تخمین زده شده می‌باشد که باعث می‌گردد، فیلتر تطبیقی پیشنهاد شده، نسبت به نمونه‌های قبلی، خود را متناسب با شرایط استاتیکی و دینامیکی تنظیم کند تا بتواند اطلاعات خروجی حسگرها را به شکل مناسب ترکیب نماید. برای ارزیابی ساختار پیشنهاد شده، به صورت عملی آزمایش‌های دینامیکی و استاتیکی بر روی یک IMU مبتنی بر فناوری MEMS انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار مؤثر خطای زاویه در طرح پیشنهادی نسبت به ساختار کالمن بدون تطبیق، دارای بهبودی در حدود ۳۴٪ در حالت استاتیکی و حدود ۳۴/۳٪ و ۲۹/۸٪ به ترتیب در حالت‌های دینامیکی چرخش حول محور X و Y است.

### کلید واژه‌ها: MEMS، IMU، فیلتر کالمن تطبیقی، ترکیب حسگر

#### ۱- مقدمه

به هر حال هر یک از این حسگرها معایبی نیز دارند. بنابراین، این حسگرها خیلی کم به تنهایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. حسگر شیب به طور مستقیم زاویه را با توجه به محور عمودی‌اش اندازه می‌گیرد، اما مشکلاتی مانند تأخیر و پهنای باند کم دارد. زاویه می‌تواند به وسیله انتگرال گرفتن از خروجی ژيروسکوپ به دست آید، اما در عمل به خاطر مشکل دریافت در ژيروسکوپ، زاویه اندازه‌گیری از مقدار واقعی دور است که این مقدار در طول زمان افزایش می‌یابد. اندازه‌گیری زاویه در حسگر شتاب‌سنج بر اساس اجزای برداری شتاب جاذبه روی محورهای حسگر و روابط مثلثاتی است. به همین دلیل فقط در یک حد شبه‌استاتیکی، زاویه دقیقی می‌توان از شتاب‌سنج به دست آورد. در حالت دینامیکی، اندازه‌گیری زاویه با استفاده از این حسگر بسیار بی‌دقت می‌شود که به دلیل اثر دیگر شتاب‌ها علاوه بر شتاب جاذبه است [۳-۲].

امروزه در تعداد زیادی از کاربردها، اندازه‌گیری زاویه بسیار مهم می‌باشد. هر یک از این کاربردها به منظور اندازه‌گیری زاویه، حسگر مناسبی را نیاز دارند. به منظور اندازه‌گیری زاویه، حسگرهایی مانند انکدر، شتاب‌سنج، شیب و ژيروسکوپ استفاده می‌شوند. برای کاربردهایی که در آن‌ها محور زاویه اندازه‌گیری به یک مرجع ثابت شده است (به عنوان مثال زمین)، اندازه‌گیری زاویه با دقت بالا می‌تواند به وسیله ابزارهایی مانند انکدر به دست آید [۱]. به هر حال در تعداد زیادی از کاربردها مانند سامانه‌های هوافضا، سامانه‌های مکان‌یابی و غیره، محور زاویه اندازه‌گیری به یک مکان ثابت متصل نیست. از این رو حسگرهایی مانند ژيروسکوپ، شتاب‌سنج و شیب، به جای انکدر استفاده می‌شود.

محاسبه تابع انتقالش، روش‌های شناخت سامانه را به‌منظور تخمین پارامترهای متناظر استفاده کرده‌اند. به‌وسیله به‌کار بردن تابع انتقال به‌عنوان دینامیک‌های حسگر شیب و اعمال کردن فیلتر کالمن، اطلاعات خروجی حسگر شیب، شتاب‌سنج و ژيروسکوپ به‌منظور تخمین زدن زاویه ترکیب شده‌اند. در مرجع [۱۷]، یک شتاب‌سنج MEMS از نوع Low-g استفاده شده است تا شیب یک شی در محیط استاتیکی اندازه‌گیری شود. نتایج به‌دست‌آمده، نویزی و غیرخطی بودند. در کلیه این مراجعی که بررسی شده است، علاوه بر حسگرهای گران‌قیمت، برای ترکیب اطلاعات خروجی حسگرها از فیلترهایی استفاده شده است که دارای پارامترهای تنظیم‌کننده ثابتی می‌باشد و با تغییر کردن شرایط محیطی باعث دگرگون شدن و حتی ناپایدار شدن خروجی حسگرها می‌شود. به این دلیل، این فیلترها با ضرایب ثابت نمی‌توانند جواب‌گو باشند. بنابراین، زمینه‌های تحقیقاتی جدیدی در این حوزه ایجاد شده است که به تطبیقی کردن این فیلترها روی آورده‌اند. در مرجع [۱۸]، برای تطبیقی کردن فیلتر کالمن، پارامترهای شتاب و سرعت زاویه‌ای که به ترتیب خروجی‌های شتاب‌سنج و ژيروسکوپ می‌باشند، استفاده شده است. سپس این پارامترها به یک سامانه فازی اعمال شده است و متناسب با آن پارامترهای فیلتر تنظیم می‌شود، اما این روش نقطه‌ضعفی که دارد این است که علاوه بر این که حجم محاسبات بالا به واسطه قوانین زیاد دارد، دارای عدم پایداری در ورودی‌های سامانه فازی می‌باشد.

ایده منطق فازی برای اولین بار توسط پروفیسور لطفی‌زاده در دانشگاه برکلی کالیفرنیا در سال ۱۹۶۵ مطرح شد. هر سامانه فازی شامل سه بخش فازی‌سازی، استنتاج فازی و فازی زدایی است. برای این که یک سامانه بتواند داده‌های فازی را پشتیبانی کند، ورودی و خروجی صفر و یکی باید با استفاده از عناصر فازی به متغیرهای زبانی تبدیل شوند. در مرحله دوم، برای شروع فرآیند استنتاج فازی، می‌بایست توابع عضویت با قواعد کنترلی ترکیب شده تا خروجی کنترلی تولید شود و باید این خروجی‌ها در یک جدول جستجو نگهداری گردند. به‌علاوه این خروجی باید از یک متغیر زبانی به یک متغیر صفر و یکی تبدیل شود تا کاربر بتواند از آن به‌عنوان یک خروجی کنترلی استفاده کند که این امر توسط مرحله سوم انجام می‌گردد. سامانه فازی در حوزه‌های مختلفی از جمله در زمینه تاسیسات و حرکت‌سازی از آن می‌توان استفاده نمود مانند ماشین لباس‌شویی، دستگاه‌های سمعی و بصری دیجیتال، کنترل موتورهای جستجوگر در اینترنت،

امروزه حسگرهای ژيروسکوپ و شتاب‌سنج، به‌صورت بسته‌هایی به نام واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU<sup>۱</sup>) مبتنی بر فناوری MEMS<sup>۲</sup> وجود دارد. این فناوری باعث شده است که واحد اندازه‌گیری اینرسی از لحاظ فضای اشغال‌شده، مصرف توان و هزینه کاهش‌های چشمگیری داشته باشد [۴]. واحد اندازه‌گیری اینرسی دارای سه ژيروسکوپ دویبه‌دو متعامد برهم است که هر کدام از این حسگرها مقدار چرخش را در راستای هر کدام از محورهای مختصات اندازه‌گیری می‌کند. واحد IMU هم‌چنین دارای سه شتاب‌سنج دویبه‌دو متعامد نیز است که شتاب را در راستای همه محورهای مختصات می‌تواند اندازه‌گیری نماید و گاهی اوقات هم در آن از سه مغناطیس‌سنج نیز استفاده می‌شود [۵-۶].

در حوزه مکان‌یابی INS<sup>۳</sup>، این سامانه قادر است که با استفاده از خروجی‌های IMU که شامل اندازه‌گیری شتاب و سرعت زاویه‌ای می‌باشد، مکان فعلی جسم را به‌دست آورد. همان‌طور که اشاره شد، حسگرهای حرکتی شتاب‌سنج و ژيروسکوپ در معرض خطاهای زیادی هستند که دقت اندازه‌گیری را کاهش می‌دهند. در نتیجه دقت مکان‌یابی کم می‌شود. در بعضی از کاربردها به دنبال حسگرهایی با قیمت بالاتر می‌روند که بتوانند به هدف افزایش دقت برسند.

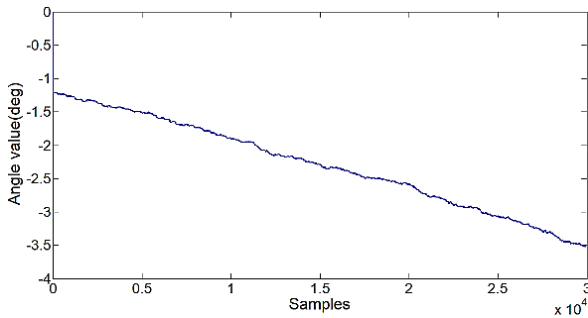
برای جبران کردن نقاط ضعف حسگرهای ژيروسکوپ و شتاب‌سنج از ترکیب اطلاعات خروجی این حسگرها استفاده می‌شود. از انواع فیلترها مانند فیلتر کالمن می‌توان برای ترکیب خروجی این حسگرها استفاده کرد [۱۳-۱۷]. فیلتر کالمن یک تخمین‌گر بهینه است که با به‌کارگیری مفهوم فضای حالت و مدل خطای سامانه، تخمین بهینه‌ای از حالت سامانه را ارائه می‌دهد. مهم‌ترین ویژگی فیلتر کالمن محاسبات بازگشتی آن است که فقط با ذخیره کردن آخرین محاسبات، حجم کمی را از فضای حافظه اشغال می‌کند و با آمدن اطلاعات جدید، محاسبات قبلی را به‌روزرسانی می‌نماید [۱۴]. در مرجع [۱۵]، حسگرهای شتاب‌سنج و شیب به‌منظور اندازه‌گیری زاویه به‌وسیله فیلتر مکمل و کالمن ادغام شده‌اند تا به این وسیله نقاط ضعف هرکدام از این حسگرها جبران شود. در مرجع [۱۶]، برای افزایش دادن پهنای باند اندازه‌گیری حسگر شیب، یک ترکیب از حسگر شتاب‌سنج، شیب و ژيروسکوپ استفاده می‌شود. در مرجع [۱۶]، حسگر شیب به‌عنوان یک پاندول ساده مدل شده است و با

1- Inertial Measurement Unit  
2- Micro-Electro-Mechanical Systems  
3- Inertial Navigation System

رخ می‌دهد و  $V_{gyro}$  نیز نشان‌دهنده نویز ژيروسکوپ است که در اثر عواملی مانند نویز بایاس، نویز تدریجی و غیره ایجاد می‌شود. رابطه‌ای که برای بایاس ژيروسکوپ وجود دارد به‌صورت رابطه (۲) است.

$$V_{gyro} = \frac{Z - Z_{R=0}}{SC} \quad (2)$$

که در رابطه (۲)،  $Z_{R=0}$  مقدار ولتاژ خروجی در حالت سرعت زاویه‌ای صفر است. مقدار  $SC$  پارامتر مقایسه‌بندی می‌باشد که توسط برگه داده حسگر قابل دریافت است.  $Z_{R=0}$  در طول کار با ژيروسکوپ به‌صورت پیوسته تغییر می‌کند که باعث می‌گردد در رابطه (۱)، بایاس ایجاد شود. به دلیل همین بایاس است که ژيروسکوپ سرعت زاویه واقعی را نشان نمی‌دهد و مقداری دریافت خواهد داشت. برای روشن‌تر شدن این پدیده، ما خروجی ژيروسکوپ را بعد از مدت زمان زیادی که سپری شده است، استخراج نموده‌ایم. در شکل (۱) می‌توان این پدیده دریافت را به‌طور کامل مشاهده کرد. در اینجا ما ژيروسکوپ را در حالت زاویه صفر قرار داده‌ایم. به جای این که خروجی همواره صفر باشد، همان‌طور که مشاهده می‌گردد، بعد از مدت‌زمان زیادی که سپری می‌شود، خروجی ژيروسکوپ از مقدار مطلوب خود خارج شده و رفته‌رفته زیاد می‌گردد.



شکل (۱): رخ دادن پدیده دریافت در خروجی ژيروسکوپ.

## ۲-۲- حسگر شتاب‌سنج

یک حسگر شتاب‌سنج مبتنی بر فناوری MEMS، به‌وسیله نیروهایی که به دیواره آن وارد می‌شود، می‌تواند شتاب را اندازه‌گیری نماید. شتاب‌هایی که این حسگر اندازه‌گیری می‌کند، شامل شتاب خطی لحظه‌ای، شتاب گرانش، مقداری نویز و بایاس می‌باشد. بنابراین، مدلی به‌صورت رابطه (۳) می‌توان برای آن در نظر گرفت [۱۹].

$$A = A_{INS} - A_{GRA} + B_{acc} + V_{acc} \quad (3)$$

سامانه‌های ترجمه زبان، رباتیک، هوش مصنوعی، مهندسی پزشکی، سی‌تی اسکن، سی‌سی یو، آی‌سی یو، دستگاه‌های ضربان‌ساز قلب و خیلی از حوزه‌های دیگر نیز کاربرد دارد [۱۸].

در این مقاله، یک سامانه فازی پیشنهاد شده است که ضمن داشتن پایداری در ورودی، می‌تواند خود را متناسب با شرایط استاتیکی و دینامیکی تنظیم کند. در واقع در این سامانه، خروجی‌های حسگر ژيروسکوپ به عنوان مدل سامانه و خروجی‌های شتاب‌سنج به‌عنوان مدل اندازه‌گیری در نظر گرفته شده‌اند و خطای بین مدل سامانه و اندازه‌گیری به‌عنوان ورودی پایدار برای سامانه فازی پیشنهاد شده است. برای تأیید کردن کارایی ساختار پیشنهادی، آن را به‌طور عملی بر روی IMU از نوع MPU6050 پیاده‌سازی کرده‌ایم. نتایج نشان می‌دهد که مقدار مؤثر خطای زاویه در طرح پیشنهادی نسبت به ساختار کالمن بدون تطبیق دارای بهبودی در حدود ۳۴٪ در حالت استاتیکی و حدود ۳۴/۳٪ و ۲۹/۸٪ به‌ترتیب در حالت‌های دینامیکی چرخش حول محور X و Y است.

این مقاله به شرح زیر سازمان‌دهی شده است. در بخش اول، به‌صورت مختصر، مطالبی در مورد خطای موجود در حسگرهای ژيروسکوپ و شتاب‌سنج بیان خواهد شد. در بخش دوم، به معرفی فیلتر کالمن و مدل‌های سامانه و اندازه‌گیری که در ترکیب حسگرهای ژيروسکوپ و شتاب‌سنج استفاده شده است، پرداخته می‌شود. در بخش سوم، به معرفی سامانه فازی می‌پردازیم و ساختار پیشنهادی را ارائه خواهیم کرد. در بخش چهارم، نتایج آزمایش‌های انجام‌شده را بیان می‌کنیم و در نهایت در بخش آخر، به نتیجه‌گیری خواهیم پرداخت.

## ۲- خطاهای موجود در حسگرهای ژيروسکوپ و شتاب‌سنج

### ۱-۲- حسگر ژيروسکوپ

در IMU سه ژيروسکوپ به صورت دوجه‌دو متعامد وجود دارد که مقدار سرعت زاویه را می‌تواند در راستای هرکدام از محورها محاسبه کند. مدلی که برای خروجی ژيروسکوپ وجود دارد به صورت رابطه (۱) می‌باشد [۱۹].

$$R_{gyro} = R + B_{gyro} + V_{gyro} \quad (1)$$

که در این رابطه،  $R$  مقدار سرعت زاویه واقعی ژيروسکوپ،  $B_{gyro}$  مقدار بایاس ژيروسکوپ را نشان می‌دهد که در اثر پدیده دریافت

- (۳) امکان تخمین از حالت‌های سامانه از قبیل سرعت و شتاب که مستقیماً اندازه‌گیری نمی‌شوند.
- (۴) ضرایب بهره به شکل دینامیکی محاسبه می‌گردند، یعنی فیلتر مشابهی را می‌توان برای انواع محیط‌های مختلف با حالت‌های مانور متفاوت هدف، به کار برد.
- (۵) فیلتر کالمن یک معیار اندازه‌گیری دقیق برای ماتریس کوواریانس فراهم می‌کند و ماتریس کوواریانس خطای تخمین‌ها را محاسبه می‌نماید.

### ۳-۲- مدل ارائه‌شده برای ترکیب اطلاعات خروجی حسگرها به کمک فیلتر کالمن

به منظور ترکیب اطلاعات حسگرها به کمک فیلتر کالمن، لازم است که ابتدا یک مدل برای سامانه و یک مدل برای اندازه‌گیری در نظر گرفته شود. برای روشن‌تر شدن موضوع، در ادامه علاوه بر توضیح معادلات مربوط به کالمن، مدل‌های در نظر گرفته‌شده برای سامانه نیز شرح داده خواهند شد [۲۱].

روابط (۴) و (۵)، معادلات مربوط به فیلتر کالمن استاندارد را نشان می‌دهند.

$$X_k = FX_{k-1} + BU_k + W_k \quad (۴)$$

$$Z_k = HX_k + V_k \quad (۵)$$

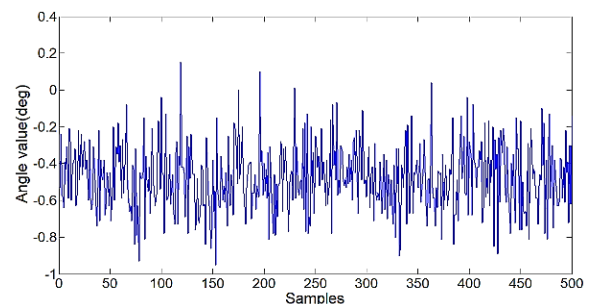
که در آن،  $X_k$  ماتریس حالت سامانه را در زمان  $k$  نشان می‌دهد. در این ساختار ارائه شده، خروجی‌های ژيروسکوپ که زاویه اندازه‌گیری شده و بایاس آن می‌باشند، به‌عنوان مدل سامانه در نظر گرفته شده است. بنابراین، مدل فرآیند سامانه را می‌توان به‌صورت رابطه (۶) نمایش داد.

$$X_k = \begin{bmatrix} \varphi \\ \varphi_B \end{bmatrix} \quad (۶)$$

در رابطه (۶)،  $\varphi$  و  $\varphi_B$  به ترتیب نشان‌دهنده بایاس و زاویه خروجی ژيروسکوپ می‌باشند.  $F$  ماتریس انتقال حالت است که  $k$  امین حالت خروجی مدل فرآیند را به  $k-1$  امین حالت آن مربوط می‌سازد و برای حالتی که IMU دارای یک شتاب‌سنج و ژيروسکوپ سه محوره است، به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۷)$$

که در این رابطه،  $A_{INS}$  مقدار شتاب لحظه‌ای یا همان شتاب‌هایی که در اثر نیروهای خارجی ایجاد می‌شود را نشان می‌دهد. همچنین  $A_{GRA}$  شتاب گرانش،  $B_{acc}$  مقدار بایاس و  $V_{acc}$  نیز مقدار نویز شتاب‌سنج را مدل می‌کنند. برای اندازه‌گیری شتاب به کمک این حسگر از اجزای برداری شتاب جاذبه روی محورهای حسگر و روابط مثلثاتی استفاده می‌شود. به همین خاطر فقط در یک حد شبه‌استاتیکی، زاویه دقیقی می‌توان از شتاب‌سنج به‌دست آورد. در حالت دینامیکی، اندازه‌گیری زاویه با استفاده از این حسگر بسیار بی‌دقت می‌شود که به دلیل اثر دیگر شتاب‌ها علاوه بر شتاب جاذبه‌ای است. در شکل (۲) می‌توان عدم ناتوانی شتاب‌سنج را در اندازه‌گیری زاویه در حالتی که به آن نویز یا نیروی خارجی وارد می‌شود را مشاهده کرد.



شکل (۲): وجود نویز زیاد در خروجی شتاب‌سنج.

### ۳-۳- ترکیب اطلاعات خروجی حسگرها به کمک فیلتر کالمن

#### ۳-۱- فیلتر کالمن

در سال ۱۹۶۰ رادولف کالمن مقاله مشهورش را انتشار داد که در آن یک راه حل بازگشتی برای مشکلات فیلترینگ خطی داده‌های گسسته بیان کرد. از آن زمان به بعد، به‌دلیل بخش عظیمی از پیشرفت‌ها در محاسبات دیجیتال، فیلتر کالمن موضوع بسیاری از تحقیقات بوده است [۲۰].

اساس کار این روش حداقل کردن میانگین خطاهای تخمین است. از جمله ویژگی‌های این فیلتر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

(۱) تخمین بهینه‌ای از حالت‌های سامانه دارد.

(۲) محاسبه نمودن کوواریانس خطای تخمین‌ها.

$H$  ماتریسی است که مقادیر تخمین زده شده توسط مدل فرآیند سامانه را به مقادیر اندازه‌گیری شده نگاشت می‌کند.

$$H = [1 \quad 0] \quad (12)$$

$V_k$  کوواریانس نویز اندازه‌گیری، یک ماتریس نیست، بلکه برابر با واریانس نویز اندازه‌گیری می‌باشد. در واقع این پارامتر، خطایی که شتاب‌سنج در اندازه‌گیری زاویه دارد را نشان می‌دهد. چون کوواریانس متغیر با واریانس خود برابر است، بنابراین، رابطه (۱۳) همواره برقرار می‌باشد.

$$R_k = E[v_k * v_k^T] = \text{var}(v_k) \quad (13)$$

پس فیلتر کالمن به‌صورت رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) بازنویسی می‌شود.

$$\begin{pmatrix} \varphi \\ \varphi_B^* \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi \\ \varphi_B^* \end{pmatrix}_{k-1} + \begin{pmatrix} dt \\ 0 \end{pmatrix} \varphi_k^* + W_k \quad (14)$$

$$Z_k = (1 \quad 0) \begin{pmatrix} \varphi \\ \varphi_B^* \end{pmatrix} + V_k \quad (15)$$

#### ۴- پیشنهاد یک ساختار بهبود یافته به کمک فیلتر کالمن تطبیق شده به‌وسیله سامانه فازی

##### ۴-۱- سامانه فازی

در سال‌های اخیر، منطق فازی که با هدف حذف کردن فرآیند تصمیم‌گیری انسانی طراحی شده بود، امروزه به عنوان یک موضوع محبوب در زمینه سامانه‌های کنترلی تبدیل شده است. منطق فازی برای کنترل کردن سامانه‌هایی به‌کار می‌رود که دارای فرآیند کنترلی سخت بوده و همچنین پارامترهای کنترلی آن‌ها به‌طور کیفی مشخص می‌شود. محققان دریافته‌اند که سامانه‌های کنترلی که الگوریتم‌های فازی در آن‌ها به‌کار رفته است، دارای پایداری و خاصیت تشخیص خطا نسبتاً خوبی می‌باشند. به‌عبارت دیگر، برای داشتن یک کنترل پایدار می‌توان از کنترل فازی که یک ایده کنترلی با پایداری عالی می‌باشد، استفاده نمود. برای طراحی قوانین فازی، یک دانش دقیق لازم نیست، بلکه کنترلر فازی با استفاده از قوانین فازی زبان‌شناختی، یک کنترلر هوشمند می‌باشد که شامل اطلاعاتی از متخصصان مربوطه است [۲۲-۲۳].

$U_k$  ورودی کنترلی را نشان می‌دهد که در اینجا این مقدار به‌وسیله خروجی ژيروسکوپ تأمین می‌شود. بنابراین، معادله (۴) را می‌توان به‌صورت رابطه (۸) بازنویسی کرد.

$$X_k = FX_{k-1} + B\varphi_k^* + W_k \quad (8)$$

$B$  ماتریس کنترلی نامیده می‌شود و به‌صورت رابطه (۹) تعریف می‌گردد.

$$B = \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

زاویه  $\varphi$  از طریق معادله (۸) زمانی که  $\varphi_B$  در  $dt$  زمان ضرب می‌شود، حاصل می‌گردد. چون بایاس نمی‌تواند به‌صورت مستقیم بر اساس زاویه به‌دست آید، سطر دوم این ماتریس صفر شده است.

در معادله (۵)،  $Z_k$  مدل اندازه‌گیری سامانه را نشان می‌دهد. در اینجا خروجی‌های شتاب‌سنج به‌عنوان مدل اندازه‌گیری سامانه می‌باشد. دلیلی که باعث شده است خروجی‌های شتاب‌سنج به‌عنوان مدل اندازه‌گیری و خروجی‌های ژيروسکوپ به‌عنوان مدل فرآیند در نظر گرفته شود، این است که در عمل، اطمینان بیشتری به خروجی‌های شتاب‌سنج در مقایسه با ژيروسکوپ وجود دارد، زیرا خروجی‌های ژيروسکوپ به واسطه پدیده دریافت دارای خطای زیادی می‌باشند.

در معادله‌های (۴) و (۵)، متغیرهای  $V_k$  و  $W_k$  به‌ترتیب نویز اندازه‌گیری و نویز فرآیند هستند. آن‌ها فرض می‌شوند که مستقل از یکدیگر می‌باشند و با توزیع‌های نرمالی به‌صورت رابطه (۱۰) در نظر گرفته می‌شوند.

$$W_k \sim N(0, Q_k) \quad V_k \sim N(0, R_k) \quad (10)$$

$Q_k$  ماتریس کوواریانس نویز فرآیند است و یک ماتریس با ابعاد  $2 \times 2$  می‌باشد که درآیه‌های قطری آن به‌ترتیب واریانس زاویه و بایاس تخمین‌زده شده توسط مدل فرآیند را نشان می‌دهند. درآیه‌های غیرقطری نیز نشان‌دهنده وابستگی بین این پارامترهای تخمین زده شده است و چون این پارامترها مستقل از یکدیگر فرض می‌شوند، درآیه‌های غیرقطری صفر خواهند بود. بنابراین، ماتریس کوواریانس نویز فرآیند را می‌توان به‌صورت رابطه (۱۱) نشان داد.

$$Q_k = \begin{bmatrix} Q_\theta & 0 \\ 0 & Q_{\theta_b^*} \end{bmatrix} \Delta t \quad (11)$$

## ۴-۲- ساختار پیشنهادی

فیلتر کالمن در مرحله دوم، به روزرسانی مقادیری که پیش‌بینی کرده است را انجام می‌دهد. برای انجام این کار، ابتدا باید خطای مدل فرآیند سامانه را محاسبه کند. خطای مدل فرآیند سامانه به وسیله رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود.

$$e_k = \varphi_{k,Acc} - \hat{\varphi}_{k|k-1} \quad (22)$$

در رابطه فوق،  $e_k$  خطای مدل فرآیند سامانه و  $\varphi_{k,Acc}$  نیز زاویه‌ای است که توسط مدل اندازه‌گیری سامانه که در اینجا شتاب‌سنج می‌باشد، از طریق خروجی مبدل به دست می‌آید. این مبدل در واقع مقدار شتاب را از شتاب‌سنج دریافت و از طریق روابط (۲۳) تا (۲۵) مقدار زاویه مورد نظر را برای مدل اندازه‌گیری فراهم می‌کند.

$$\varphi_{AccPitch} = \text{Arc tan } 2(\text{AccData}_z, \text{AccData}_x) \quad (23)$$

$$\varphi_{AccRoll} = \text{Arc tan } 2(\text{AccData}_z, \text{AccData}_y) \quad (24)$$

$$\varphi_{AccYaw} = \text{Arc tan } 2(\text{AccData}_y, \text{AccData}_x) \quad (25)$$

در روابط بالا  $\text{AccData}_x$ ،  $\text{AccData}_y$  و  $\text{AccData}_z$  به ترتیب داده‌های خروجی شتاب‌سنج را در راستای محورهای X، Y و Z نشان می‌دهند.

قبل از این که سامانه بخواهد بقیه مراحل به روزرسانی را انجام دهد، لازم است که ماتریس‌های کوواریانس نوین فرآیند و اندازه‌گیری به روز شوند. به همین منظور از یک سامانه فازی برای این هدف استفاده کرده‌ایم. پارامترهای مختلفی وجود دارد که می‌توان به عنوان ورودی برای این سامانه فازی در نظر گرفت (مانند شتاب، سرعت زاویه‌ای و ...)، اما این ورودی‌ها همان‌طور که قبلاً بیان شد، به علت نویز زیاد و پدیده‌ی دریافت نمی‌توانند به عنوان ورودی فازی، معیار مناسبی باشند. به همین دلیل، در طراحی، پارامتر خطای مدل فرآیند را به عنوان ورودی سامانه فازی در نظر گرفته‌ایم. برای طراحی این سامانه فازی از مدل استنتاجی مددانی که به خوبی شناخته شده است، استفاده می‌شود. معیاری که برای تنظیم کردن قوانین فازی در نظر گرفته‌ایم، به این صورت است که هرگاه خطای مدل فرآیند سامانه نرمالیزه شده، بزرگ باشد، نشان می‌دهد که تخمین مدل فرآیند دارای خطای زیادی است و لازم است که سامانه به مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر از مقادیر تخمین زده شده اعتماد کند. به همین دلیل، باید ماتریس کوواریانس نوین فرآیند (Q) افزایش و ماتریس کوواریانس نوین اندازه‌گیری (R) نیز کاهش یابد و

فیلتر کالمن برای پیاده‌سازی شامل دو مرحله کلی می‌باشد که اولین مرحله آن، پیش‌بینی است. همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد، مدلی که برای فرآیند سامانه در نظر گرفته شده است بر اساس خروجی ژيروسکوپ می‌باشد. بنابراین در مرحله پیش‌بینی، ابتدا طبق مدل فرآیند سامانه، زاویه مورد نظر به وسیله رابطه (۱۶) تخمین زده می‌شود.

$$\hat{\varphi}_{k|k-1} = \hat{\varphi}_{k-1|k-1} - dt \hat{\varphi}_{B_{k-1|k-1}}^* + dt \hat{\varphi}_k^* \quad (16)$$

$$\hat{\varphi}_{B_{k|k-1}}^* = \hat{\varphi}_{B_{k-1|k-1}}^* \quad (17)$$

که در این معادله، منظور از  $\hat{\varphi}_{k|k-1}$  زاویه تخمین زده شده در زمان k بر اساس زاویه محاسبه شده در زمان k-1 توسط مدل فرآیند سامانه می‌باشد. مقدار بایاس ژيروسکوپ را چون نمی‌توان به طور مستقیم به دست آورد، بنابراین مقدار آن در زمان k ( $\hat{\varphi}_{B_{k|k-1}}^*$ ) بر اساس ارزش آن در زمان k-1 ( $\hat{\varphi}_{B_{k-1|k-1}}^*$ ) تخمین زده می‌شود. در قدم بعدی باید ماتریس کوواریانس خطا به دست آید. این ماتریس دارای ابعاد ۲\*۲ می‌باشد که مؤلفه‌های آن به صورت روابط (۱۸) تا (۲۱) محاسبه می‌گردد.

$$\hat{P}_{00_{k|k-1}} = \hat{P}_{00_{k-1|k-1}} - dt \hat{P}_{01_{k-1|k-1}} - dt \hat{P}_{10_{k-1|k-1}} + dt^2 \hat{P}_{11_{k-1|k-1}} + Q_\theta \quad (18)$$

$$\hat{P}_{11_{k|k-1}} = \hat{P}_{11_{k-1|k-1}} + Q_{\theta_b}^* \quad (19)$$

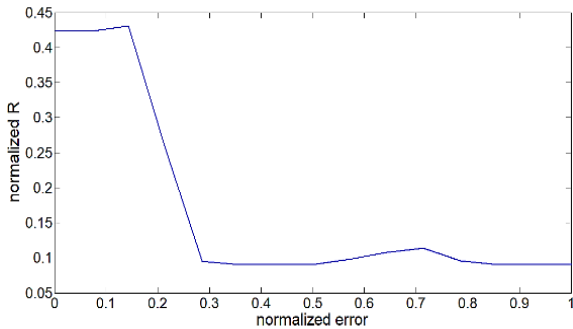
$$\hat{P}_{01_{k|k-1}} = \hat{P}_{01_{k-1|k-1}} - dt \hat{P}_{11_{k-1|k-1}} \quad (20)$$

$$\hat{P}_{10_{k|k-1}} = \hat{P}_{10_{k-1|k-1}} - dt \hat{P}_{11_{k-1|k-1}} \quad (21)$$

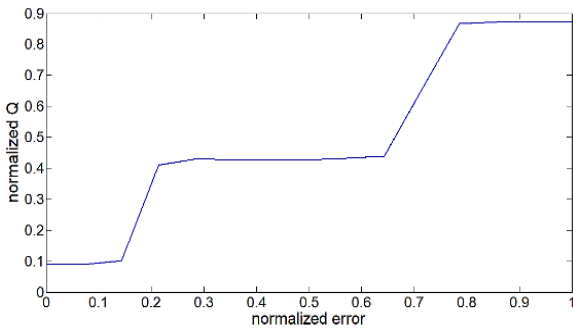
مؤلفه‌های ماتریس کوواریانس خطا در واقع میزان قابلیت اطمینان مقادیر تخمین زده شده توسط فرآیند سامانه را نشان می‌دهد. در روابط بالا  $\hat{P}_{00_{k|k-1}}$  و  $\hat{P}_{11_{k|k-1}}$  به مقادیر قابلیت اطمینان زاویه و سرعت زاویه تخمین زده شده توسط مدل فرآیند سامانه در زمان k اشاره دارد، و  $\hat{P}_{01_{k|k-1}}$  و  $\hat{P}_{10_{k|k-1}}$  نیز وابستگی بین این تخمین‌ها را نشان می‌دهند. اگر مقدار این مؤلفه‌ها کوچک باشد، نشان می‌دهد که سامانه می‌تواند به مقادیر تخمین زده شده توسط مدل فرآیند اطمینان کند.

همچنین در شکل (۴) نحوه تغییرات خروجی‌های فازی برحسب تغییرات ورودی فازی نشان داده شده است.

بعد از این‌که مقدار ماتریس کوواریانس نویز فرآیند و اندازه‌گیری به‌وسیله سامانه فازی تنظیم گردید، می‌توان از آن‌ها برای به‌روزرسانی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل فرآیند استفاده کرد. برای این منظور، باید مقدار پارامتر S به‌وسیله رابطه (۲۶) محاسبه گردد و سپس بهره فیلتر کالمن به‌وسیله آن محاسبه می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل (۴): تغییرات: (الف) خروجی R نرمالیزه شده برحسب ورودی خطای نرمالیزه شده و (ب) خروجی Q نرمالیزه شده برحسب خطای نرمالیزه شده.

$$(۲۶)$$

$$S = \hat{P}_{00,k|k-1} + R$$

$$K_0 = \frac{\hat{P}_{00,k|k-1}}{S} \quad (۲۷)$$

$$K_1 = \frac{\hat{P}_{10,k|k-1}}{S} \quad (۲۸)$$

در نهایت در مرحله آخر، با استفاده از مقادیر محاسبه شده توسط رابطه‌های (۲۲)، (۲۷) و (۲۸) مقادیری که در مرحله پیش‌بینی

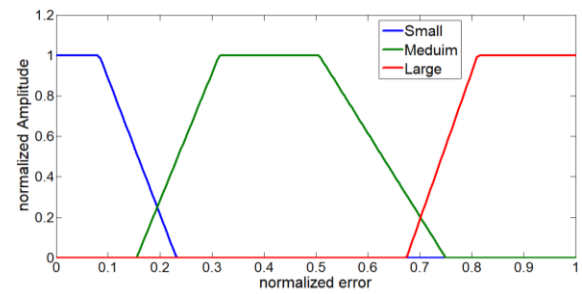
همچنین زمانی که خطای مدل فرآیند کوچک باشد، باید عکس این موضوع عمل شود. بنابراین، قوانین فازی را می‌توان به صورت زیر نشان داد.

۱- اگر خطای مدل فرآیند سامانه کوچک است، آن‌گاه باید ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری متوسط و کوواریانس نویز فرآیند کوچک باشد.

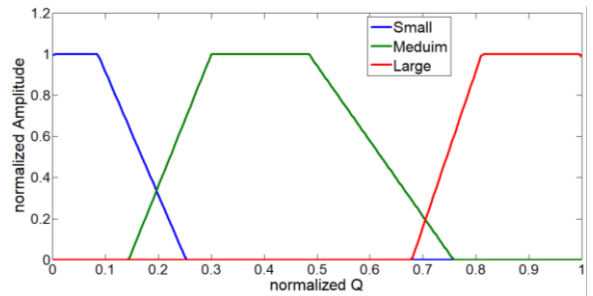
۲- اگر خطای مدل فرآیند سامانه متوسط است، آن‌گاه باید ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری کوچک و کوواریانس نویز فرآیند متوسط باشد.

۳- اگر خطای مدل فرآیند سامانه بزرگ است، آن‌گاه باید ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری کوچک و کوواریانس نویز فرآیند بزرگ باشد.

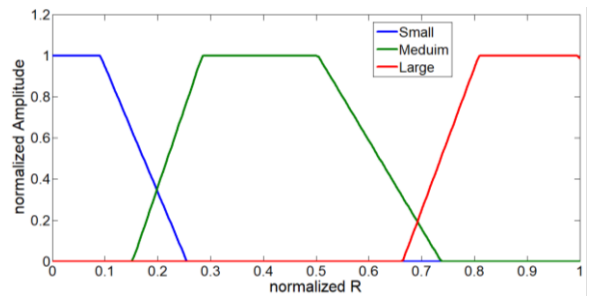
در شکل (۳) می‌توان توابع عضویت ورودی و خروجی‌ها را مشاهده نمود.



(الف)



(ب)



(ب)

شکل (۳): توابع عضویت (الف) ورودی و (ب) خروجی‌ها.

در این سخت‌افزار، از یک میکروکنترلر از خانواده آردینو با مشخصات Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU استفاده شده است. از این میکروکنترلر برای به‌دست آوردن اطلاعات خروجی IMU با شش درجه آزادی و اجرا کردن الگوریتم‌های مورد نظر استفاده گردیده است. IMU استفاده‌شده در این آزمایش از نوع MPU6050 است که دارای شش درجه آزادی (سه درجه آزادی برای ژيروسکوپ و سه درجه آزادی برای شتاب‌سنج) بوده و برای کار ما کافی است. در این میکروکنترلر، سرعت دریافت داده از حسگر MPU6050 براساس نرخ‌های مختلف قابل تنظیم می‌باشد. ما در این پیاده‌سازی سرعت ۱۱۵۲۰۰ را برای دریافت داده در نظر گرفته‌ایم. یعنی داده‌ها با سرعت ۰/۰۱ ثانیه از حسگر دریافت می‌شوند. لازم به‌ذکر است که معیار انتخاب این سرعت بر این اساس است که دو جنبه: (۱) سرعت پردازش بالا و (۲) پردازش داده‌ها در میکروکنترلر در نظر گرفته شده و بین آن‌ها مصالحه لازم لحاظ شده است تا هم سرعت پردازش بالا داشته باشیم و هم میکروکنترلر فرصت کافی داشته باشد تا بتواند بر روی داده‌های دریافتی، پردازش انجام دهد. برای جمع‌آوری داده برای هر سناریو نیز حدود ۲۵ ثانیه در نظر گرفته شده است که این بازه زمانی برای هر سناریو ۱۰ بار اجرا گردیده است تا بتوانیم به مقادیر مؤثر خطای (RMS) دقیق‌تر دسترسی پیدا کنیم. با توجه به این‌که میکروکنترلر از طریق راه ارتباطی I2C با حسگر ارتباط برقرار می‌کند و به مبادله داده می‌پردازد، طبق برگه‌داده حسگر، در این حالت پهنای باند سامانه حدود ۴۰۰ کیلوهرتز می‌باشد. برای حساسیت حسگر مورد نظر، آن دارای سه ژيروسکوپ و سه شتاب‌سنج می‌باشد که به‌صورت متعامد قرار گرفته‌اند و هر کدام شتاب و سرعت زاویه را در راستای هر محور مختصات اندازه‌گیری می‌کنند. این اندازه‌گیری برای شتاب‌سنج چهار بازه مختلف می‌باشد و کاربر می‌تواند با فرستادن فرمان به حسگر، آن‌ها را تنظیم کند. این چهار بازه شامل  $\pm 2g$ ،  $\pm 4g$ ،  $\pm 8g$  و  $\pm 16g$  هستند. حسگر ژيروسکوپ نیز به همین ترتیب قابلیت اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای را در بازه‌های  $\pm 250$ ،  $\pm 500$ ،  $\pm 1000$  و  $\pm 2000$  درجه بر ثانیه دارد.

اطلاعات بعد از این‌که از IMU خوانده شد، در میکروکنترلر به وسیله الگوریتم مورد نظر پردازش می‌شوند و سپس اطلاعات پردازش شده به کامپیوتر ارسال و توسط نرم‌افزار Matlab، اطلاعات فیلتر شده و فیلتر نشده رسم می‌گردند.

برای ارزیابی روش پیشنهادی، آزمایش‌ها در دو حالت دینامیکی و استاتیکی انجام گرفته است. مقادیر اولیه‌ای که برای

تخمین زده شده بود، به‌وسیله روابط (۲۹) تا (۳۴) به‌روزرسانی می‌شوند.

$$\hat{\phi}_{k|k-1}^+ = \hat{\phi}_{k|k-1}^- + K_1 e_k \quad (29)$$

$$\hat{\phi}_{B_{k|k-1}}^{*+} = \hat{\phi}_{B_{k|k-1}}^{*-} + K_0 e_k \quad (30)$$

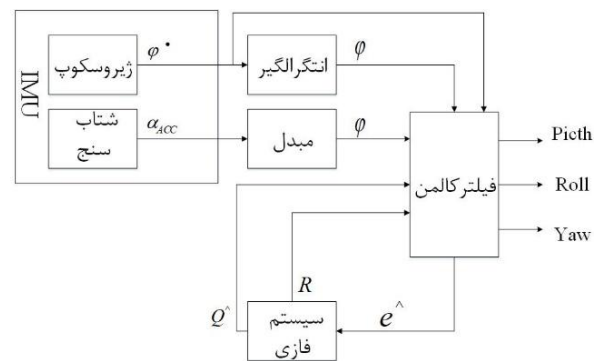
$$\hat{P}_{00_{k|k-1}}^+ = \hat{P}_{00_{k|k-1}}^- (1 - K_0) \quad (31)$$

$$\hat{P}_{01_{k|k-1}}^+ = \hat{P}_{01_{k|k-1}}^- (1 - K_0) \quad (32)$$

$$\hat{P}_{10_{k|k-1}}^+ = \hat{P}_{10_{k|k-1}}^- - \hat{P}_{00_{k|k-1}}^- K_1 \quad (33)$$

$$\hat{P}_{11_{k|k-1}}^+ = \hat{P}_{11_{k|k-1}}^- - \hat{P}_{01_{k|k-1}}^+ K_1 \quad (34)$$

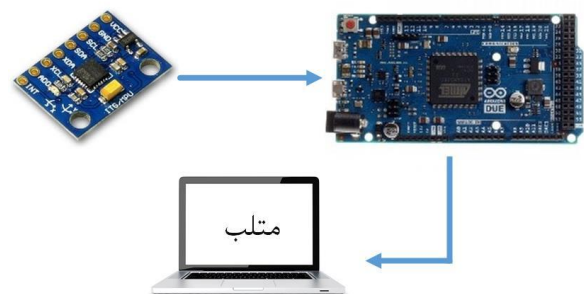
در روابط بالا، منظور از علامت مثبت، مقدار به‌روزرسانی شده و علامت منفی مقدار پیش‌بینی شده است. بنابراین دیاگرام روش پیشنهادی به صورت شکل (۵) خواهد بود.



شکل (۵): دیاگرام کلی روش اندازه‌گیری زوایای سه‌بعدی با استفاده از IMU مبتنی بر فناوری MEMS به‌وسیله فیلتر کالمن تطبیقی.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی‌ها

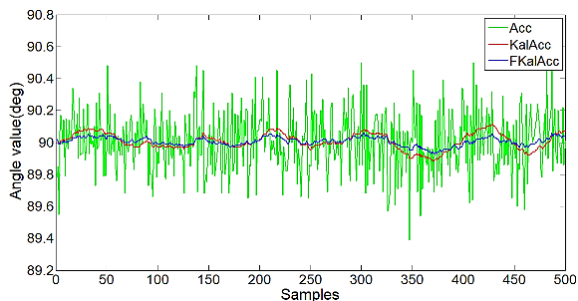
به منظور بررسی کردن نحوه عملکرد فیلتر کالمن تطبیقی در ترکیب اطلاعات خروجی IMU، از سخت‌افزاری مانند شکل (۶) استفاده شده است.



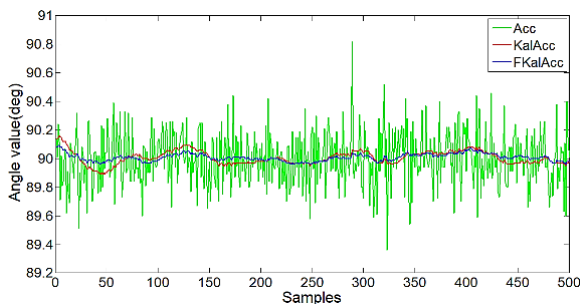
شکل (۶): سخت‌افزار استفاده شده برای ارزیابی ساختار پیشنهادی.



در حالت دینامیکی برای ارزیابی روش پیشنهادی، در زوایای چرخشی حول محور  $Y$  و حول محور  $X$  مورد سنجش قرار گرفته است که در شکل‌های (۸) و (۹) می‌توان نتیجه این ارزیابی را مشاهده کرد. همچنین در جدول (۲) نتایج RMS سه روش بررسی شده بعد از انجام ۱۰ بار اجرای الگوریتم‌ها آورده شده است. مقدار مؤثر خطای زاویه در روش پیشنهادی FkalAcc در حالت دینامیکی چرخش حول محور  $Y$  حدود ۰.۸٪ نسبت به روش Acc و حدود ۰.۳۴/۳٪ نسبت به روش KalAcc بهبود داشته است و در حالت دینامیکی چرخش حول محور  $X$  حدود ۰.۸۲٪ نسبت به روش Acc و حدود ۰.۲۹/۸٪ نسبت به روش KalAcc افزایش دقت دارد.



شکل (۸): خروجی سه روش KalAcc, FkalAcc, Acc در حالت دینامیکی چرخش حول محور  $Y$ .



شکل (۹): خروجی سه روش KalAcc, FkalAcc, Acc در حالت دینامیکی چرخش حول محور  $X$ .

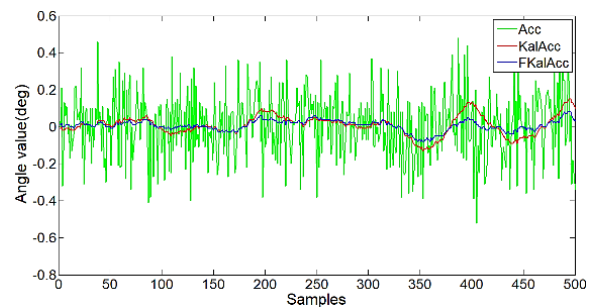
جدول (۲): مقادیر مؤثر خطای زاویه در سه روش KalAcc, FkalAcc و Acc در حالت دینامیکی چرخش حول محور  $X$  و  $Y$ .

مقدار مؤثر خطای زاویه چرخش حول محور $Y$	مقدار مؤثر خطای زاویه چرخش حول محور $X$	روش‌ها
۰/۱۸۷۲	۰/۱۸۰۷	Acc
۰/۰۴۷۷	۰/۰۴۳۲	KalAcc
۰/۰۳۱۷	۰/۰۳۰۳	FkalAcc

بایاس ماتریس‌های نویز فرآیند و نویز اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است، به صورت  $R=0.03$ ,  $Q_{\theta}=0.001$  و  $Q_{\theta^*}=0.003$  می‌باشد که این مقادیر با آزمایش‌های فراوان تعیین شده است. در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی خروجی‌های سه نوع روشی که با هم مقایسه شده است، به صورت زیر می‌باشند:

- (۱) خروجی زاویه ناشی از شتاب‌سنج (Acc).
- (۲) خروجی زاویه ناشی از ترکیب اطلاعات ژيروسکوپ و شتاب‌سنج به وسیله کالمن (KalAcc).
- (۳) خروجی زاویه ناشی از ترکیب اطلاعات ژيروسکوپ و شتاب‌سنج به وسیله کالمن تطبیقی (FKalAcc).

در شکل (۷) می‌توان خروجی سه روش بالا را در حالت استاتیکی مشاهده کرد. همان‌طور که دیده می‌شود، نمودار سبز رنگ مربوط به خروجی شتاب‌سنج است که به دلیل نویز زیادی که دارد، خروجی آن همواره ناپایدار است و دامنه خروجی هم همواره در حال نوسان می‌باشد. در نمودارهای قرمز رنگ و آبی که به ترتیب مربوط به روش‌های KalAcc و FKalAcc است، نویز و دامنه آن به صورت قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. مقدار RMS این سه روش بعد از انجام ۱۰ بار اجرای الگوریتم‌ها و سپس میانگین گرفتن در جدول (۱) آورده شده است که نتایج نشان می‌دهند، مقدار مؤثر خطای زاویه در روش پیشنهادی FKalAcc در حالت استاتیکی حدود ۰.۸۳٪ نسبت به روش Acc و حدود ۰.۳۴٪ نسبت به روش KalAcc بهبود داشته است.



شکل (۷): خروجی سه روش KalAcc, FkalAcc, Acc در حالت استاتیکی.

جدول (۱): مقادیر مؤثر خطای زاویه سه روش KalAcc, FkalAcc و Acc در حالت استاتیکی.

روش‌ها	مقدار مؤثر خطای زاویه (RMS)
Acc	۰/۱۸۶۲
KalAcc	۰/۰۴۵۰
FkalAcc	۰/۰۲۹۴

## ۶- نتیجه گیری

اندازه‌گیری زاویه در حسگر شتابسنج بر اساس اجزای برداری شتاب جاذبه روی محورهای حسگر و روابط مثلثاتی است. به همین دلیل فقط در یک حد شبه‌استاتیکی، زاویه تقریباً دقیقی می‌توان از آن به‌دست آورده شود. در حالت دینامیکی، اندازه‌گیری زاویه با استفاده از این حسگر بسیار بی‌دقت می‌شود. که به دلیل اثر دیگر شتاب‌ها علاوه بر شتاب جاذبه است. همچنین زاویه می‌تواند به‌وسیله انتگرال گرفتن از خروجی ژيروسکوپ به دست آید، اما در عمل به خاطر مشکل دریافت در ژيروسکوپ، زاویه اندازه‌گیری از مقدار واقعی دور است که این مقدار خطا در طول زمان افزایش می‌یابد.

در این مقاله، با استفاده از ترکیب ویژگی‌های شتابسنج و ژيروسکوپ به‌وسیله یک فیلتر کالمن تطبیقی توانسته‌ایم نقاط ضعف هر یک از این دو حسگر را بپوشانیم. فیلتر تطبیقی پیشنهاد شده قادر است، خود را متناسب با شرایط استاتیکی و دینامیکی تنظیم کند تا بتواند اطلاعات خروجی حسگرها را به شکل مناسب ترکیب نماید. همان‌طور که مشاهده گردید، برای ارزیابی روش پیشنهادی دو آزمایش استاتیکی و دینامیکی انجام گردید. در حالت استاتیکی، مقدار مؤثر خطای زاویه روش پیشنهادی نسبت به روش بدون تطبیقی کردن فیلتر کالمن، دارای بهبود حدود ۳۴٪ شد. همچنین در حالت دینامیکی نیز آزمایش را انجام دادیم که حدود ۳۴/۳٪ در حالت چرخش حول محور Y و حدود ۲۹/۸٪ در حالت چرخش حول محور X بهبود داشتیم.

## ۷- منابع

- [5] D. Gebre-Egziabher, R. C. Hayward, and J. D. Powell, "A Low-Cost GPS/Inertial Attitude Heading Reference System (AHRS) for General Aviation Applications," in Position Location and Navigation Symposium, pp. 518-525, 1998.
- [6] S. O. Madgwick, A. J. Harrison, and R. Vaidyanathan, "Estimation of IMU and MARG Orientation using a Gradient Descent Algorithm," in IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), pp. 1-7, 2011.
- [7] E. R. Bachmann, I. Duman, U. Usta, R. B. McGhee, X. Yun, and M. Zyda, "Orientation Tracking for Humans and Robots using Inertial Sensors," in International Conference on Computational Intelligence in Robotics and Automation, pp. 187-194, 1999.
- [8] E. Foxlin, "Inertial Head-Tracker Sensor Fusion by a Complementary Separate-Bias Kalman Filter," in Virtual Reality Annual International Symposium, pp. 185-194, 1996.
- [9] J. N. Lim, "Design of Attitude Estimation System for Micro Aerial Vehicle," Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea, Seoul, 1993.
- [10] N. Miller, O. C. Jenkins, M. Kallmann, and M. J. Mataric, "Motion Capture from Inertial Sensing for Untethered Humanoid Teleoperation," in IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, vol. 2, pp. 547-565, 2004.
- [11] F. M. Mirzaei and S. I. Roumeliotis, "A Kalman Filter-based Algorithm for IMU-Camera Calibration: Observability Analysis and Performance Evaluation," IEEE Transactions on Robotics, vol. 24, no. 5, pp. 1143-1156, 2008.
- [12] D. Roetenberg, H. J. Luinge, C. T. Baten, and P. H. Veltink, "Compensation of Magnetic Disturbances Improves Inertial and Magnetic Sensing of Human Body Segment Orientation," IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 13, no. 3, pp. 395-405, 2005.
- [13] S. Sabatelli, M. Galgani, L. Fanucci, and A. Rocchi, "A Double Stage Kalman Filter for Sensor Fusion and Orientation Tracking in 9D IMU," in Sensors Applications Symposium (SAS), pp. 1-5, 2012.
- [14] R. Faragher, "Understanding the Basis of the Kalman Filter via a Simple and Intuitive Derivation," IEEE Magazine on Signal Processing, vol. 29, no. 5, pp. 128-132, 2012.
- [15] M. Ghanbari and M. J. Yazdanpanah, "Delay Compensation of Tilt Sensors Based on MEMS Accelerometer Using Data Fusion," IEEE Sensors Journal, vol. 15, no. 3, pp. 1959-1966, 2015.
- [16] J. Lim and D. Hong, "Cost Reference Particle Filtering Approach to High-Bandwidth Tilt Estimation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 11, pp. 3830-3839, 2010.
- [17] S. Jung, H. T. Cho, and T. C. Hsia, "Neural Network Control for Position Tracking of a Two-Axis Inverted Pendulum System: Experimental Studies," IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 18, no. 4, pp. 1042-1048, 2007.
- [18] C. W. Kang and C. G. Park, "Attitude Estimation with Accelerometers and Gyros using Fuzzy Tuned Kalman Filter," in IEEE International Conference on Control Conference (ECC), pp. 3713-3718, 2009.
- [1] S. B. Lazarus, I. Ashokaraj, A. Tsourdos, P. M. Silson, N. Aouf, and B. A. White, "Vehicle Localization using Sensors Data Fusion via Integration of Covariance Intersection and Interval Analysis," IEEE Sensors Journal, vol. 7, no. 9, pp. 1302-1314, 2007.
- [2] M. Ghanbari and M. J. Yazdanpanah, "Delay Compensation of Tilt Sensors based on MEMS Accelerometer using Data Fusion Technique," IEEE Sensors Journal, vol. 15, no. 3, pp. 1959-1966, 2015.
- [3] S. Luczak, W. Oleksiuk, and M. Bodnicki, "Sensing Tilt with MEMS Accelerometers," IEEE Sensors Journal, vol. 6, no. 6, pp. 1669-1675, 2006.
- [4] F. Alam, Z. ZhaiHe, and H. Jia, "A Comparative Analysis of Orientation Estimation Filters using MEMS based IMU," in Proceedings of the International Conference on Research in Science, Engineering and Technology, Dubai, UAE, pp. 21-22, 2014.

- [22] M. R. Remus, "Fuzzy Logic Applied to Adaptive Kalman Filtering," University of Nebraska - Lincoln, 1992.
- [23] M. M. Fateh and S. Khorashadizadeh, "Robust Control of Electrically Driven Robots by Adaptive Fuzzy Estimation of Uncertainty," *Nonlinear Dynamics*, vol. 69, no. 3, pp. 1465-1477, 2012.
- [19] H. Sun, J. Fu, X. Yuan, and W. Tang, "Analysis of the Kalman Filter with Different INS Error Models for GPS/INS Integration in Aerial Remote Sensing Applications," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 37, pp. 883-890, 2008.
- [20] D. Simon, "Kalman Filtering," *Embedded Systems Programming*, vol. 14, no. 6, pp. 72-79, 2001.
- [21] P. Gui, L. Tang, and S. Mukhopadhyay, "MEMS based IMU for Tilting Measurement: Comparison of Complementary and Kalman Filter based Data Fusion," in *IEEE International Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 2004-2009, 2015.