

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1400.7.1.8.9](https://doi.org/10.1001.1.24767131.1400.7.1.8.9)

درصد همانندی: ۱٪

طراحی و پیاده‌سازی یک الگوریتم تعیین توجیه (AHRS) مستقل بر مبنای حسگرهای میکروالکترومکانیکی برای شرایط دینامیک بالا در سامانه‌های ناوبری

حانیه علمی عزیز^۱، افشین محسنی آراسته^{۲*}

haniyeh.elmiaziz@gmail.com

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران-شمال، تهران

a_mohseni@iau-tnb.ac.ir

^{۲*} نویسنده مسئول، دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران-شمال، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲

چکیده

در سامانه‌های ناوبری اینرسی، تعیین زوایای توجیه سطوح دوار با انتگرال‌گیری از مشاهدات ژيروسکوپ‌ها انجام می‌گیرد. ژيروسکوپ‌های مکانیکی که به شکل سنتی برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند، قیمت، ابعاد و وزن بسیار زیادی دارند که این موضوع، استفاده از آن‌ها را محدود می‌کند. با پیدایش حسگرهای میکروالکترومکانیکی (MEMS)، این محدودیت‌ها به شکل قابل توجهی کاهش یافته است، امروزه این حسگرها در اغلب تلفن‌های همراه هوشمند وجود دارد. با این حال، این حسگرها دقت بسیار کمتری از انواع مکانیکی دارند. به خصوص ژيروسکوپ‌های MEMS خطای تجمعی بزرگی دارند که باعث می‌شود، خطای زوایای توجیه به شکل جمع‌شونده در طول زمان افزایش یابد و پس از مدتی غیرقابل استفاده شود. برای حل این مشکل، از مشاهدات شتاب‌سنج‌ها برای محاسبه زوایای تراز (رول و پیچ) و از مغناطیس‌سنج‌ها برای محاسبه زاویه آزیموت (یاو) استفاده می‌شود. اما در این روش، دقت سیستم تحت تأثیر شتاب‌های خارجی و اغتشاشات مغناطیسی دچار اختلال می‌شود. در این پژوهش، به معرفی یک فیلتر مکمل پرداخته خواهد شد که با تلفیق دو روش مزبور، یک جواب بهینه با دقت کوتاه‌مدت و بلندمدت مناسب فراهم می‌کند. نتایج آزمایش‌های میدانی انجام‌شده به وسیله حسگرهای MEMS یک تلفن همراه هوشمند نشان می‌دهند که حتی در حرکاتی با تغییرات دینامیکی بسیار بالا و طولانی، دقت زوایای تراز حدود ۲ درجه، و زاویه آزیموت حدود ۴ درجه خواهد بود که نسبت به روش‌های قدیمی، بسیار بهتر و پایدارتر است.

واژه‌های کلیدی: حسگرهای اینرسی، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، سامانه‌های ناوبری اینرسی، سیستم‌های تعیین

توجیه، فیلتر مکمل

۱. مقدمه

سیستم‌های تعیین توجیه (وضعیت) یا به اختصار^۱ AHRs، برای تعیین زوایای تراز (رول^۲ و پیچ^۳) و آزیموت (یاو^۴) به کار می‌روند که با توجه به طراحی، می‌توانند از حسگرهای شتاب‌سنج، ژيروسکوپ، مغناطیس‌سنج، آنتن سامانه‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای (GNSS)^۵ یا فناوری‌های دیگر تشکیل شده باشند. امروزه از سیستم‌های AHRs برای تعیین زوایای توجیه یک سطح یا سکو در حوزه‌های متنوعی از قبیل کاربردهای هوایی [۱-۵]، دریایی و زیردریایی [۶، ۷]، رباتیک [۹، ۸]، هواپیماهای بدون سرنشین^۶ [۱۰، ۱۱]، سیستم‌های پوشیدنی برای رهگیری و شبیه‌سازی حرکات بدن^۷ [۱۲-۱۴] و کشاورزی [۱۵] استفاده می‌شود.

نخستین سامانه‌های AHRs مدرن بر اساس حسگرهای اینرسی^۸ که شامل شتاب‌سنج و ژيروسکوپ هستند، طراحی شده‌اند [۱۶]. ولی استفاده از حسگرهای اینرسی دقیق‌تر گران‌قیمت و سنگین‌وزن، گستره استفاده از چنین سامانه‌هایی را محدود می‌کند.

از اواسط دهه ۱۹۹۰ میلادی، با فراگیر شدن سامانه‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای همچون GPS^۹، تحقیقاتی در مورد استفاده از این سیستم‌ها در فرایند تعیین توجیه شروع شد. کوهن و همکاران در سال ۱۹۹۴ در تحقیقی به مقایسه سیستم‌های مبتنی بر GPS با انواع حسگرهای اینرسی پرداختند که در آن، حداکثر اختلاف دو سیستم کمتر از ۰/۱ درجه و انحراف معیاری در حدود ۰/۰۵ درجه به دست آمد [۱۷].

با توجه به امکان قطع شدن موقت دید مستقیم به ماهواره و سایر محدودیت‌های سیستم ماهواره‌ای، پژوهش‌هایی گسترده برای تلفیق دو سیستم مبتنی بر GNSS و حسگرهای اینرسی انجام گرفت. به‌عنوان نمونه، هیوارد و همکاران در سال‌های ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸، با استفاده از سه آنتن GPS با فاصله (خط مبنای) کوتاه و تلفیق آن با ژيروسکوپ‌های ارزان‌قیمت به نتایج قابل توجهی رسیدند [۲، ۳]. در این روش، سامانه تلفیقی در حضور GPS، به دقتی در حدود ۰/۲ درجه برای زوایای توجیه رسید. به علاوه، در صورت نبودن

سیگنال GPS، سیستم توانست با استفاده از مشاهدات ژيروسکوپ، در طول ۲ دقیقه خطای توجیه را در مقادیر کمتر از ۶ درجه نگه دارد.

در کنار چالش سه آنتن GPS برای برآزش یک صفحه به آن‌ها، روش‌های دیگری به‌منظور کمک گرفتن از مشاهدات ماهواره‌ای برای کمک به سیستم‌های AHRs ابداع شد. به‌عنوان نمونه، هیوارد و همکاران در سال ۱۹۹۹ سامانه‌ای طراحی کردند که در آن، زوایای تراز با تلفیق مشاهدات شتاب‌سنج‌ها و شتاب ناشی از مشتق‌گیری عددی از خروجی GPS محاسبه می‌شد [۴]. در تحقیق یادشده، برای محاسبه زاویه یاو، تنها از یک خط مبنای دو آنتن در راستای محور اول هواپیما کمک گرفته شد. به‌عنوان یک نمونه دیگر، می‌توان به پژوهش لی و همکاران در سال ۲۰۱۸ اشاره کرد که در آن، از مقادیر سرعت به‌دست‌آمده از GPS و سامانه ناوبری اینرسی (INS)^{۱۰}، به‌عنوان مشاهدات کمکی در AHRs استفاده شده است [۱۸].

با پیشرفت فناوری میکروالکترومکانیکی در سال‌های اخیر، توجه ویژه پژوهشگران به استفاده از حسگرهای میکروالکترومکانیکی (MEMS)^{۱۱} در الگوریتم AHRs جلب شده است [۱۹، ۲۰]. این سامانه‌ها علاوه بر سه ژيروسکوپ، شامل سه شتاب‌سنج و مغناطیس‌سنج نیز هستند. از آنجاکه ژيروسکوپ‌های میکروالکترومکانیکی خیلی سریع دچار خطای تجمعی می‌شوند، با یک روش کمکی که در این پژوهش هم به آن اشاره خواهد شد، زوایای توجیه با استفاده از میدان گرانش و مغناطیسی زمین هم برآورد شده و با جواب ژيروسکوپ‌ها ادغام می‌شود. این روش کمکی با دو چالش اصلی در زمینه محاسبه زوایای توجیه با استفاده از مشاهدات شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها مواجه است.

نخستین مشکل در سیستم‌های تعیین توجیه میکروالکترومکانیکی، ناشی از خطای زاویه یاو در اثر وجود اغتشاشات مغناطیسی ناشی از اجسام فلزی و فرومغناطیس است. پژوهش‌ها در این زمینه، بر رهگیری و حذف اثر این اغتشاشات متمرکز است. به‌عنوان نمونه، یاداو و بلکلی در سال ۲۰۱۴ روشی برای برآورد زاویه شیب مغناطیسی^{۱۲}

تصحیح اثر مشاهدات شتاب‌سنج‌ها انجام شده‌اند و تمام حوزه‌هایی که از حسگرهای میکروالکترومکانیکی برای تعیین زوایای توجیه در حالت کینماتیک استفاده می‌کنند با چالشی در برابر تکان‌ها و شتاب‌های شدید سطوح دوار مواجه هستند. تمرکز این پژوهش، بر استفاده از یک فیلتر مکمل ترکیبی به منظور تلفیق زوایای به‌دست آمده از ژيروسکوپ‌ها، با زوایای به‌دست آمده از مشاهدات شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها است. در این فیلتر ترکیبی، نتایج ژيروسکوپ‌ها از یک فیلتر بالاگذر، و نتایج شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها از یک فیلتر پایین‌گذر عبور داده می‌شوند. سپس به طراحی و اجرای چند آزمایش میدانی پرداخته خواهد شد که نتایج آن نشان می‌دهد جواب نهایی فیلتر مکمل، هر دو دقت بلند مدت و کوتاه مدت را به شکل هم‌زمان مهیا می‌نماید.

در این آزمایش‌ها، مشاهدات خام حسگرهای اینرسی و مغناطیس‌سنج‌های یک تلفن همراه هوشمند، ثبت و در قالب یک فایل متنی استخراج می‌شوند و به عنوان ورودی به برنامه متلب^{۱۵} معرفی شده و زوایای توجیه با الگوریتم پیشنهادی محاسبه می‌گردد. سپس، به منظور برآورد دقت، مقدار این زوایای محاسبه شده، با مقادیر واقعی که در هنگام انجام آزمایش و اعمال مانورها تعیین شده‌اند، مقایسه می‌شوند.

۳. تئوری و محاسبات

۳-۱. محاسبه زوایای توجیه با شتاب‌سنج‌ها و

مغناطیس‌سنج‌ها

سیستم‌های AHRS میکروالکترومکانیکی غالباً متشکل از سه حسگر مغناطیس‌سنج، شتاب‌سنج و ژيروسکوپ هستند. در این نوشتار، مشاهدات خام این حسگرها با علائم ارائه شده در رابطه (۱) نمایش داده می‌شوند:

$$b^s = (b_1^s \quad b_2^s \quad b_3^s)^T; a^s = (a_1^s \quad a_2^s \quad a_3^s)^T \quad (1)$$

$$\omega^s = (a_1^s \quad a_2^s \quad a_3^s)^T$$

در روابط بالا، b^s بردار مشاهداتی مغناطیس‌سنج‌هاست که مؤلفه‌های میدان مغناطیسی را نمایش می‌دهد؛ a^s بردار مشاهداتی شتاب‌سنج‌هاست که مؤلفه‌های شتاب اعمال شده

به‌منظور تشخیص وجود اغتشاشات محیطی موقت در اطراف سامانه و حذف اثر آن‌ها ارائه دادند [۲۱]. مشکل اساسی دوم که به‌عنوان اصلی‌ترین چالش در زمینه تعیین توجیه سامانه‌های متحرک شناخته می‌شود و در این پژوهش نیز مورد توجه قرار دارد، وجود شتاب‌های غیرگرانشی ناشی از حرکت سطح دوار است. تحقیقات در این زمینه اغلب درباره شناسایی شتاب‌های خارجی و عدم استفاده از مشاهده شتاب‌سنج در این مواقع [۲۲] یا کاهش وزن تأثیر آن با افزایش واریانس در ماتریس واریانس-کواریانس انجام شده است [۲۳]. مشکل چنین روش‌هایی این است که در صورت تشخیص وجود شتاب‌های غیرگرانشی، تعیین توجیه را بیشتر با استفاده از مشاهدات ژيروسکوپ‌ها انجام می‌دهند که در درازمدت دچار خطای تجمعی غیرقابل‌کنترلی خواهد شد.

در رویکردی متفاوت، به‌جای حذف مشاهده در حضور شتاب‌های غیرگرانشی، مالیناک و همکاران در سال ۲۰۱۸، مقدار شتاب‌های خارجی را با یک مدل آماری گاوس مارکوف مرتبه‌ی اول^{۱۳} به همراه سایر مجهولات در بردار حالت^{۱۴} فیلتر کالمن برآورد و اثر آن را تصحیح کردند [۲۴].

تمرکز این پژوهش بر طراحی و اجرای یک روش محاسبه زوایای توجیه تنها با استفاده از حسگرهای ژيروسکوپ، در کنار شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌هاست. استفاده نکردن از مشاهدات GNSS منجر به این می‌شود که سامانه طراحی شده هیچ نیازی به وجود دید مستقیم به ماهواره نداشته باشد، بنابراین در محیط‌های بسته همچون داخل ساختمان، معدن، مناطق شهری متراکم، جنگل‌ها و غیره هم کارایی خود را حفظ نماید. از طرفی، تمام این حسگرها از نوع ارزان قیمت میکروالکترومکانیکی خواهند بود. در نتیجه پیشنهاداتی برای کاهش، کنترل و تصحیح خطای این حسگرها ارائه و ارزیابی خواهد شد.

۲. مواد و روش‌ها

پژوهش‌ها در زمینه خطای ناشی از شتاب‌های غیرگرانشی در سامانه‌های AHRS متحرک، اغلب حول حذف، کاهش یا

است. به عبارت دیگر، در حالت ایستا، شتاب سنج‌ها شبیه به یک ثقل سنج، تنها واکنش به شتاب ثقل را اندازه می‌گیرند. از آنجاکه این راستا منطبق بر محور سوم سیستم مختصات محلی شمال-غرب-بالا است، بنابراین می‌توان مقادیر تیلت (زوایای تراز) را با توجه به هندسه شکل ۱، با مشاهدات شتاب سنج‌ها طبق رابطه ۴ محاسبه کرد:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{-a_2^s}{a_3^s} \right), \quad \beta = \sin^{-1} \left(\frac{a_1^s}{|a^s|} \right) \quad (4)$$

در مرحله بعد، با معلوم بودن زوایای تراز، می‌توان مشاهدات مغناطیس سنج‌ها را از سیستم مختصات دستگاهی، به یک سیستم مختصات محلی تراز منتقل نمود که صفحه اصلی‌اش منطبق بر افق است. راستای محور اول این سیستم مختصات در شکل ۱ با X^t نشان داده شده، و آزیموتی به اندازه زاویه یابو دارد (رابطه ۵):

$$b^t = C_s^t b^s = R_2 \beta R_1 \alpha b^s \quad (5)$$

از آنجاکه تصویر بردار میدان مغناطیسی زمین بر صفحه افق در راستای شمال مغناطیسی است، با توجه به شکل ۱، مقدار زاویه یابو با بردار جدید قابل محاسبه است:

$$\gamma^m = \tan^{-1} \left(\frac{b_2^t}{b_1^t} \right) \quad (6)$$

باید توجه داشت که زاویه یابو محاسبه شده در رابطه (۶) برابر با آزیموت نسبت به شمال مغناطیسی است. اگر به دنبال محاسبه آزیموت نسبت به شمال جغرافیایی باشیم، باید زاویه میل مغناطیسی^{۱۷} که برابر با زاویه بین شمال مغناطیسی و جغرافیایی است را لحاظ کنیم. برای محاسبه این زاویه می‌توان از رابطه (۷) استفاده نمود:

$$D = \tan^{-1} \left(\frac{b_W}{b_N} \right) \quad (7)$$

در رابطه بالا، b_W و b_N ، مؤلفه‌های اول و دوم بردار میدان مغناطیسی در سیستم محلی هستند که با مدل جهانی مغناطیس قابل استخراج هستند [۲۵]. بنابراین آزیموت نسبت به شمال جغرافیایی برابر است با:

$$\gamma = \gamma^m - D \quad (8)$$

همان طور که در ابتدای این بخش اشاره شد، روش بالا برای

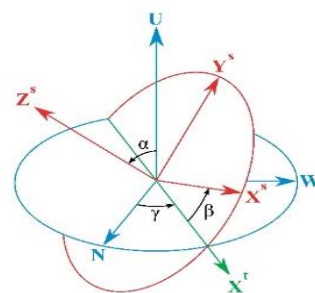
به سامانه را نمایش می‌دهد؛ و در نهایت ω^s بردار مشاهداتی ژيروسکوپ‌هاست که نمایشگر سرعت‌های زاویه‌ای حول سه محور مختصات است. در ضمن، در هر سه بردار، بالانویس s به این موضوع اشاره دارد که این بردارها در سیستم مختصات دستگاهی مؤلفه‌دهی شده‌اند.

با توجه به شکل ۱، توجه یک سطح دوار نسبت به یک فریم محلی همچون شمال-غرب-بالا^{۱۶} را می‌توان با سه زاویه اولیری رول (α)، پیچ (β) و یاو (γ)، به ترتیب حول محورهای اول، دوم و سوم بیان کرد، به شکلی که برای انتقال مؤلفه‌های یک بردار از سیستم مختصات دستگاهی به سیستم مختصات محلی، می‌توان از ماتریس انتقال رابطه (۲) استفاده نمود:

$$C_s^m = R_3 \gamma R_2 \beta R_1 \alpha \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $R_i \theta$ نشانگر ماتریس دوران راستگرد حول محور i ام به اندازه θ است (رابطه ۳):

$$R_1(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad R_2(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad R_3(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$



شکل ۱. توجه سطح دوار نسبت به فریم محلی NWU

با فرض صفر یا کوچک بودن شتاب‌های خارجی، می‌توان زوایای تراز رول و پیچ را با مشاهدات خام شتاب‌سنج‌ها محاسبه کرد. طبق این فرض، بردار مشاهده شده توسط شتاب‌سنج‌ها، موازی ولی در خلاف جهت بردار شتاب ثقل

ژیروسکوپ‌ها (رابطه ۱۰) دقت کوتاه مدت مناسبی دارد و می‌تواند فرکانس‌های دورانی بالا را هم به خوبی ردگیری کند [۴]. با وجود این، به دلیل ماهیت معادله‌های دیفرانسیل، خطای ناشی از ژیروسکوپ‌ها در طول زمان (در فرایند انتگرال‌گیری)، ذاتی جمع‌شونده (افزایشی) دارد. پس خطای ناشی از این روش، دقت بلند مدت مناسبی نخواهد داشت و پس از مدتی، غیر قابل استفاده می‌شود.

از طرف دیگر، همان‌طور که پیش از این اشاره شد، زوایای به دست آمده از شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها، تحت تأثیر شتاب‌های خارجی لحظه‌ای و اغتشاشات مغناطیسی، به سرعت دچار خطا می‌شوند و با توجه به شرایط، ممکن است دقت کوتاه مدت مناسبی نداشته باشند. با وجود این، برخلاف ژیروسکوپ‌ها، در این روش از انتگرال‌گیری استفاده نمی‌شود، و در طول زمان خطای تجمعی نخواهد داشت. در نتیجه، پایداری و دقت بلندمدت روش مزبور بسیار بهتر از ژیروسکوپ‌هاست.

با توجه به نکات بالا (که در بخش آزمایش‌های میدانی هم نشان داده خواهد شد)، بهترین راه برای تلفیق این دو دسته از برآورد زوایای توجیه، استفاده از یک فیلتر مکمل^{۱۸} است که در آن، نتایج حاصل از ژیروسکوپ‌ها از یک فیلتر بالاگذر، و نتایج حاصل از شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها از یک فیلتر پایین‌گذر عبور می‌کند (شکل ۲). در پژوهش‌های پیش از این پیشنهاداتی برای استفاده از چنین فیلترهای تلفیقی ارائه شده است؛ هر چند اغلب آن‌ها شامل استفاده از فیلترهای ساده هستند. در این پژوهش، استفاده از یک فیلتر تکمیلی پیشرفته‌تر پیشنهاد می‌گردد. برای این منظور، از رابطه (۱۱) که کالینسن توسعه داده است، استفاده می‌شود [۲۷]:

$$\hat{\theta} = \frac{\omega_0^2}{\delta^2 + 2\zeta\omega_0\delta + \omega_0^2} 2\zeta / \omega_0 \delta \theta_{Acc} + \frac{\delta^2}{\delta^2 + 2\zeta\omega_0\delta + \omega_0^2} \theta_{Gyro} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، θ_{Acc} ، θ_{Gyro} و $\hat{\theta}$ ، به ترتیب، زوایای به دست آمده از شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها، زوایای به دست آمده از ژیروسکوپ‌ها، و زوایای تلفیقی محاسبه شده با فیلتر مکمل هستند. δ عملگر دیفرانسیل است، پارامتر ω_0 مرتبط با فرکانس طبیعی سیستم است که برای حرکات

محاسبه زوایای توجیه، مبتنی بر صفر یا کوچک بودن شتاب‌های خارجی اعمال شده بر سیستم است. بنابراین در حرکات با دینامیک بالا، برآورد سیستم از زوایای رول و پیچ دچار خطای موقت ناشی از شتاب‌های لحظه‌ای می‌شود. بعلاوه، دقت زاویه‌ی یاو نیز به شدت تحت تأثیر اغتشاشات مغناطیسی قرار دارد. در ادامه، راه‌حلی برای این دو مشکل با تلفیق با مشاهدات ژیروسکوپ‌ها ارائه خواهد شد.

۲-۳. فیلتر پایین‌گذر برای مشاهدات خام حسگرها

با توجه به نويز زیاد حسگرهای میکروالکترومکانیکی، پیش از استفاده از آن‌ها در هر فرایندی، توصیه می‌شود ابتدا با یک فیلتر پایین‌گذر، تأثیر نویز تا حد امکان کاهش داده شود. برای این کار، در این پژوهش از فیلتر پایین‌گذر ساده ارائه شده در رابطه (۹) که در واقع یک میانگین متحرک وزن‌دار است استفاده می‌شود:

$$\bar{x}_k = \kappa x_k + 1 - \kappa x_{k-1}; \quad \kappa \leq 1 \quad (9)$$

در رابطه (۹)، x_{k-1} و x_k ، مشاهدات حسگرها در لحظه k و $k-1$ هستند. در این پژوهش برای ضریب κ از مقدار ۰٫۷ استفاده شده است.

۳-۳. تلفیق با مشاهدات ژیروسکوپ‌ها با فیلتر مکمل

به شکل سنتی، در سیستم‌های ناوبری اینرسی، زوایای توجیه از انتگرال‌گیری از مشاهدات ژیروسکوپ‌ها محاسبه می‌شود. برای این منظور می‌توان از یک معادله دیفرانسیل کواترنیونی، یا معادله دیفرانسیل زاویه‌ای هم‌ارز آن به نام معادله کینماتیک اوپلر استفاده کرد [۲۶]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \alpha \tan \beta & -\cos \alpha \tan \beta \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha \sec \beta & \cos \alpha \sec \beta \end{bmatrix} \omega^s \quad (10)$$

با حل معادله دیفرانسیل (۱۰)، می‌توان به برآوردی مجزا از زوایای توجیه رسید که در صورت تلفیق هوشمندانه با مقادیر محاسبه شده از شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها، به جوابی بهینه از زوایای تراز (رول، پیچ) و آزیموت (یاو) می‌انجامد.

به منظور تلفیق این دو دسته از زوایا، تحلیل خصوصیات هر یک از آن‌ها، ضروری است. زوایای به دست آمده از

قرار دارد و هیچ شتاب خارجی جز واکنش به شتاب ثقل به آن وارد نمی‌شود؛ و از طرف دیگر میانگین‌گیری طولانی مدت، تأثیر نویزهای دستگاهی را به حداقل می‌رساند، می‌توان ادعا کرد، این زوایای توجیه، دقت بسیار زیادی دارند.



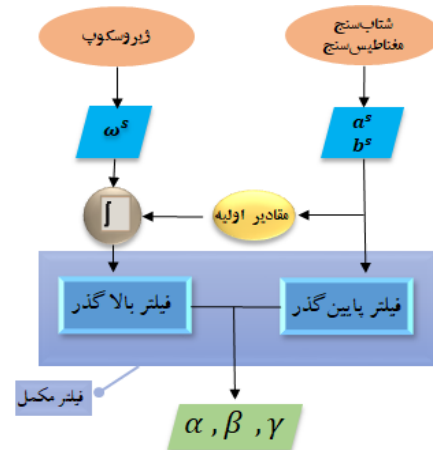
شکل ۳. شیوه استقرار تلفن همراه برای ایجاد پنج‌مارک

در ادامه، در هر سه آزمایش پس از حدود هر ۳۰ ثانیه حرکت، دستگاه برای لحظاتی به همان حالت مینا برگردانده، و سپس حرکت ادامه داده شد. برای ساختن پنج‌مارک در هر آزمایش، کافی است زوایای توجیه با مشاهدات ژيروسکوپ‌ها (رابطه ۱۰) محاسبه شده، و با هر بار بازگشت به حالت مینا، تفاوت مقادیر مینا و مقادیر محاسبه شده، به عنوان خطا در مقاطع زمانی گذشته سرشکن شود. در نتیجه، جواب حاصل از این روش علاوه بر داشتن دقت کوتاه‌مدت قابل قبول ژيروسکوپ‌ها، به دلیل فرایند سرشکنی، دچار خطای بلندمدت هم نمی‌شود و معیار خوبی برای برآورد دقت الگوریتم‌های مختلف مورد آزمایش فراهم می‌نماید. جدول ۱، خلاصه‌ای از روش‌های مورد مقایسه در آزمایش‌ها را نمایش می‌دهد.

جدول ۱. روش‌های مورد مقایسه در آزمایشات میدانی

نام روش	توضیحات
Benchmark	معیار برآورد دقت سایر روش‌ها
CF (Complementary Filter)	تلفیق از طریق فیلتر مکمل
Gyro	جواب به دست آمده از ژيروسکوپ‌ها
Acc	جواب به دست آمده از شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها
Acc_MA	میانگین متحرک جواب Acc

معمول، مقادیر کوچکی همچون ۰٫۲۵ برای آن کفایت می‌کند و در نهایت، پارامتر γ نسبت میرایی فیلتر نام دارد که در این تحقیق برابر با ۳ فرض شده است. این پارامترها بر اساس پژوهش‌های پیشین روی وسایل نقلیه زمینی انتخاب شده‌اند [۲۸]؛ با این حال در پژوهشی جداگانه می‌توان به مطالعه نحوه تعیین دقیق تر آن‌ها با توجه به دینامیک حرکت، پرداخت.



شکل ۲. دیاگرام تلفیق حسگرها در فیلتر مکمل

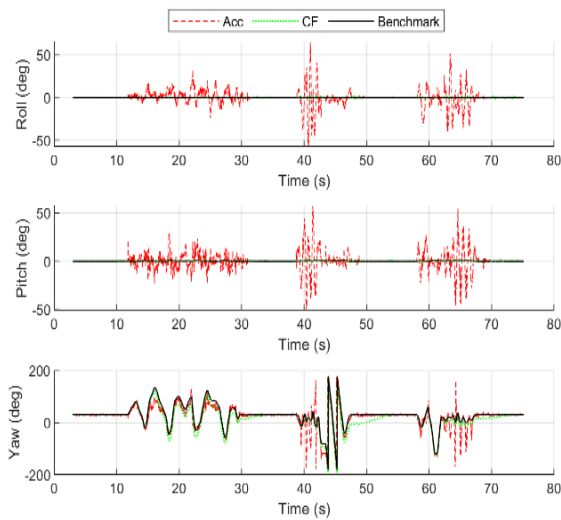
۴. یافته‌ها

برای ارزیابی عملکرد روش تلفیقی ارائه شده در این پژوهش، یک آزمایش میدانی، طراحی و اجرا شد. برای این کار، مشاهدات خام حسگرهای اینرسی و مغناطیس‌سنج‌های یک دستگاه تلفن همراه هوشمند ثبت، و در نرم‌افزار متلب پردازش گردید. بدین منظور سه آزمایش اصلی انجام شد که در ادامه به تشریح شرایط، روش‌ها و نتایج هر یک از آن‌ها پرداخته خواهد شد.

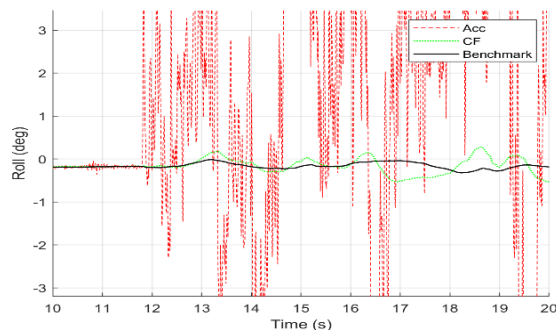
برای انجام هر یک از آزمایش‌ها، مشاهدات خام حسگرهای اینرسی و مغناطیس‌سنج‌ها، در مانورها و زوایای مختلف با نرخ مشاهداتی ۱۰۰ هرتز ثبت شده و در قالب یک فایل متنی استخراج گردید. از آنجا که برای برآورد و مقایسه دقت نتایج روش‌های مختلف، نیاز به ایجاد یک معیار یا پنج‌مارک^{۱۹} است، در هر سه آزمایش یک حالت مینا مانند شکل ۳ در نظر گرفته شده است. با قرار دادن تلفن همراه در این حالت به مدت یک دقیقه، یک میانگین از زوایای توجیه توسط روابط (۴) و (۸) محاسبه می‌شود. از آنجا که دستگاه در حالت سکون

۴-۱. آزمایش اول

Acc، ناشی از شتاب‌های افقی اعمال شده به دستگاه در طول حرکت هستند. برای روشن تر شدن موضوع، مقادیر زاویه رول در بازه ۱۰ تا ۲۰ ثانیه در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۵. آزمایش اول: مقایسه الگوریتم CF و Acc برای زوایای اوپلری (رول، پیچ و یاو)



شکل ۶. آزمایش اول: مقادیر زاویه رول با الگوریتم‌های CF و Acc در بازه ۱۰ تا ۲۰ ثانیه

همان‌طور که در شکل ۶ واضح است با شروع حرکت، شتاب‌های افقی وارد شده به دستگاه، به بی‌اعتبار شدن فرض صفر بودن شتاب‌ها در الگوریتم Acc منجر می‌شوند. در طرف مقابل، الگوریتم CF به دلیل ماهیت فیلترینگ هوشمند، نسبت به این شتاب‌های لحظه‌ای حساسیت بسیار کمتری نشان می‌دهد و تفاوت چشم‌گیری با مقادیر پنج‌مارک ندارد.

روش دیگری که ممکن است در نگاه اول جذاب به نظر برسد، این است که به جای استفاده از فیلتر مکمل در رابطه (۱۱)، از یک میانگین متحرک ساده برای حذف تأثیر

برای انجام آزمایش اول، نحوه قرارگیری تلفن همراه به گونه‌ای تعیین شد که کاملاً روی یک سطح مسطح و ثابت قرار بگیرد. برای این کار از یک میز مسطح که از قبل در یک مختصات معلوم تثبیت شده بود، استفاده شد. تلفن همراه در یکی از گوشه‌های میز با مختصات معلوم (که همان نقطه مبنای پنج‌مارک در شکل ۳ است)، قرار گرفته و به مدت ۱۰ ثانیه در همان نقطه ثابت و به حالت سکون، داده‌های لازم برای فرایند آماده‌سازی را ثبت کرد. پس از برداشت اطلاعات برای توجیه اولیه سیستم، دستگاه بدون اینکه از سطح میز جدا شود، و طوری که تنها در راستای محور سوم دارای دوران باشد، تحت حرکات مختلف بر سطح میز قرار گرفت (شکل ۴). همچنین برای بررسی عملکرد سیستم در فرکانس‌های متفاوت، در حین حرکت دادن تلفن همراه، شتاب‌های افقی متفاوتی به آن اعمال شد. در انتها نیز تلفن همراه به نقطه ثابت اولیه انتقال داده شد. از آنجا که در این آزمایش، دستگاه از روی میز بلند نشده است، انتظار می‌رود مقادیر رول و پیچ تغییرات قابل توجهی نشان ندهند.



شکل ۴. مسیر تقریبی دستگاه در آزمایش اول

شکل ۵، نتایج روش‌های CF و Acc را برای هر سه زاویه رول، پیچ و یاو مقایسه می‌کند.

همان‌طور که پیش‌ازین اشاره شد، از آنجا که دستگاه بر روی یک سطح مسطح حرکت کرده، انتظار می‌رود زوایای رول و پیچ در طول بازه، مقادیر تقریباً ثابت و نزدیک به صفر داشته باشند. نتایج CF، این انتظار را برآورده کرده است؛ ولی روش Acc دارای مقادیری تا حتی ۵۰ درجه می‌باشد که به‌وضوح، غیر قابل استفاده است. این خطاهای بزرگ در

و پیچ نیست. هرچند واضح است که روش Acc علاوه بر نویز بیشتر، در بعضی شرایط، توانایی ردگیری کمتری هم نسبت به CF دارد (به عنوان نمونه، بازه ۱۵ تا ۱۷ ثانیه را ببینید).

همچنین اکنون می‌توان به بیان ایراد مهم روش Acc_MA که پیش از این به آن اشاره شد پرداخت. از آنجاکه این روش بر مبنای میانگین‌گیری متحرکی کار می‌کند که ذاتاً یک فیلتر پایین‌گذر ساده است، توانایی ردگیری دوران‌هایی با فرکانس بالا را که در این آزمایش حول محور سوم انجام شده است، ندارد. این موضوع از شکل ۸ به وضوح قابل استنتاج است. در طرف مقابل، روش CF قرار دارد که به دلیل تلفیق روش Acc (فیلتر پایین‌گذر) با مشاهدات ژيروسکوپ‌ها (فیلتر بالاگذر)، فرکانس‌های بالا را هم از دست نمی‌دهد. با توجه به این مشکل بزرگ در روش Acc_MA، در آزمایش‌های دوم و سوم از آن چشم‌پوشی می‌شود.

به‌علاوه، واضح است که دقت زاویه یاو در همه روش‌های تعیین توجیه (از جمله CF) کمتر از دقت زوایای رول و پیچ است. این موضوع ناشی از نویز مغناطیس‌سنج‌های میکروالکترومکانیکی، و مهم‌تر از آن، اغتشاشات مغناطیسی خارجی و داخلی موجود است.

تمام نتایج فوق را می‌توان با مشاهده جدول ۲ نیز استنتاج کرد که مقادیر خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) ^{۲۰} و بیشترین خطای مطلق (MaxAE) ^{۲۱} هر یک از روش‌های بالا را (با مقایسه با جواب بنچ‌مارک) نمایش می‌دهد.

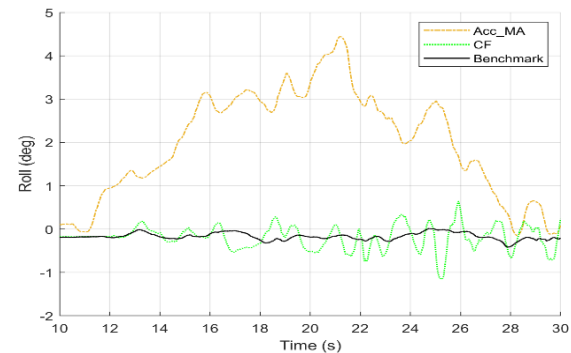
جدول ۲. مقایسه مقادیر RMSE و MaxAE الگوریتم‌ها در آزمایش اول

Yaw		Pitch		Roll		
MaxAE	RMSE	MaxAE	RMSE	MaxAE	RMSE	
۹,۰۸۳۹	۳,۶۰۸۹	۰,۹۷۷۴	۰,۲۶۴۹	۱,۰۱۲۰	۰,۲۴۱۷	CF
۴۴,۳۰۹۴	۵,۶۳۷۹	۲۸,۵۳۶۹	۴,۵۱۳۰	۳۲,۵۰۶۴	۴,۵۷۰۰	Acc
۴۴,۹۷۴۵	۹,۴۱۰۴	۰,۹۷۳۰	۰,۳۱۵۷	۲,۳۹۴۲	۰,۹۲۱۷	Acc_MA

۲-۴. آزمایش دوم

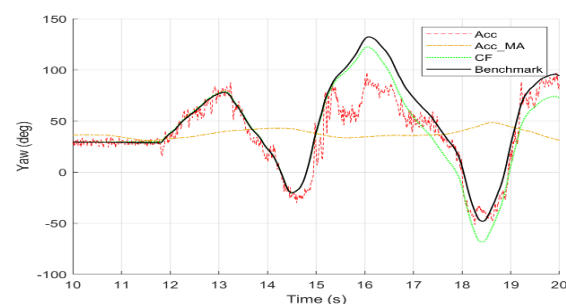
آزمایش اول، توانایی روش CF در کاهش اثر شتاب‌های افقی اعمال شده به دستگاه را به خوبی نشان داد. در طرف

شتاب‌های لحظه‌ای در روش Acc استفاده شود. در این آزمایش، طول بازه میانگین‌گیری برابر با ۷ ثانیه در نظر گرفته شد و نتایج آن با Acc_MA نمایش داده شده است. شکل ۷ این روش را با روش CF برای زاویه رول در بازه ۱۰ تا ۳۰ ثانیه مقایسه می‌کند.



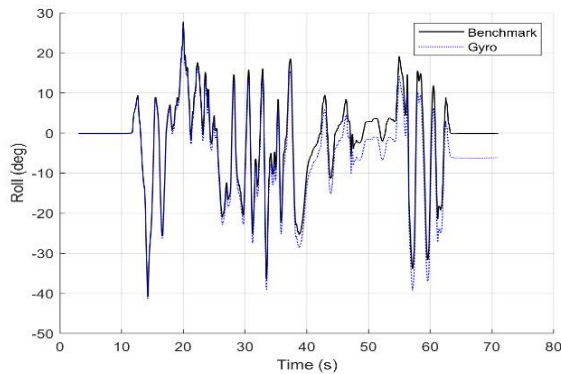
شکل ۷. آزمایش اول: مقادیر زاویه رول با الگوریتم‌های Acc_MA و CF در بازه ۱۰ تا ۳۰ ثانیه

واضح است که این روش هرچند خطایی قابل قبول‌تر از Acc دارد (حداکثر ۵ درجه)، ولی همچنان ضعیف‌تر از CF عمل می‌کند. البته این نوع میانگین‌گیری ساده، ایراد مهم‌تری هم دارد که با بررسی وضعیت زاویه یاو روشن خواهد شد. شکل ۸ بازه ۱۰ تا ۲۰ ثانیه از زاویه یاو در روش‌های مختلف، نشان می‌دهد.



شکل ۸. آزمایش اول: مقادیر زاویه یاو با الگوریتم‌های متفاوت در بازه ۱۰ تا ۲۰ ثانیه

کاملاً مشخص است که برای زاویه یاو نیز روش CF بهترین و قابل‌اتکاترین جواب‌ها را به دست آورده است. باید توجه داشت که برخلاف زوایای رول و پیچ که مستقیماً تحت تأثیر شتاب‌های افقی هستند (رابطه ۴)، زاویه یاو تنها به شکل غیرمستقیم متأثر از این شتاب‌های خارجی است (رابطه ۵). به همین دلیل تفاوت دو روش Acc و CF به اندازه زوایای رول



شکل ۱۰. مقایسه الگوریتم Gyro و پنج‌مارک برای زاویه رول

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است، هرچند ژيروسکوپ‌ها (روش Gyro) توانسته‌اند به‌خوبی فرکانس‌های بالای دوران را ردگیری کنند، ولی به‌مرور دچار یک خطای افزایشی شده‌اند، به‌شکلی که پس از حدود یک دقیقه، خطای آن‌ها به حدود ۶ درجه رسیده است. برای زوایای پیچ و یاو هم دقیقاً همین اتفاق می‌افتد. این خطا، ناشی از ذات انتگرال‌گیری روش Gyro (رابطه ۱۰) است که به جمع شدن خطاها در طول زمان منجر می‌شود. هرچه زمان بیشتری از شروع حرکت بگذرد، این خطا بزرگ‌تر شده و پس از چند دقیقه کاملاً غیر قابل قبول می‌شود. دقیقاً به همین دلیل نیاز به یک فیلتر مکمل می‌باشد تا این خطای جمع‌شونده را با تزریق مشاهدات خارجی، کنترل نماید. این مشاهدات خارجی، همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، توسط شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها مهیا می‌شود که برخلاف ژيروسکوپ‌ها، خطای جمع‌شونده ندارند (هرچند از طرف دیگر، قابلیت ردگیری فرکانس‌های بالا در آن‌ها ضعیف‌تر از ژيروسکوپ‌ها است).

اکنون که نیاز به استفاده از مشاهدات شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها مشخص شد، دقت روش‌های CF و Acc در آزمایش دوم بررسی می‌شود. ابتدا، نتایج روش‌های CF و Acc در مقایسه با پنج‌مارک برای هر سه زاویه رول، پیچ و یاو در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

مقابل، روش Acc قرار داشت که جواب آن در حضور این شتاب‌ها، کاملاً نامعتبر می‌شود. همچنین مشخص شد که CF، به دلیل ماهیت هوشمند خود در تلفیق مشاهدات، بیشترین توانایی را در ردگیری تغییرات آزیموت (زاویه یاو) دارد، هرچند عامل بسیار مهم در این زاویه، اغتشاشات مغناطیسی دستگاهی و محیطی، و البته خطای مغناطیس‌سنج‌ها است.

اکنون سؤال اساسی این است که در حرکات معمولی که دستگاه، دوران حول هر سه محور (نه فقط محور سوم) را تجربه می‌کند، آیا روش پیشنهادی این پژوهش (CF) قادر به ردگیری سریع و صحیح تغییرات رول و پیچ نیز هست یا دچار مشکل می‌شود. برای این منظور، آزمایش دوم ترتیب داده شد.

در این آزمایش، بر خلاف آزمایش اول که دستگاه روی یک سطح ثابت (سطح میز) باقی می‌ماند، بر یک سه‌پایه حرفه‌ای عکاسی با قابلیت دوران حول هر سه محور قرار داده شد (شکل ۹). البته در این حالت هم شبیه به قبل، دستگاه ابتدا برای چند ثانیه در حالت سکون (مینا) قرار داده شد تا مقادیر اولیه به درستی محاسبه شوند. سپس شروع به دوران دستگاه در جهت‌های مختلف شد تا هر سه زاویه توجیه تحت تغییر قرار گیرند.

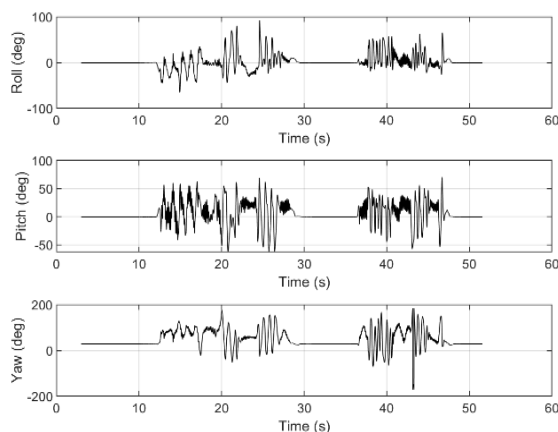


شکل ۹. آزمایش دوم: نحوه استقرار و حرکت تلفن همراه

پیش از اینکه به بررسی عملکرد روش‌های CF و Acc در این آزمایش پرداخته شود، ابتدا نشان داده می‌شود که در وهله اول، چرا جواب روش Gyro به تنهایی برای ردگیری زوایای توجیه در طولانی مدت کافی نیست. برای این کار، ابتدا یک برداشت مشاهداتی مجزا انجام شد و در آن، جواب Gyro با مقادیر پنج‌مارک مقایسه شد. به عنوان نمونه، نتیجه برای زاویه رول در شکل ۱۰ ترسیم شده است.

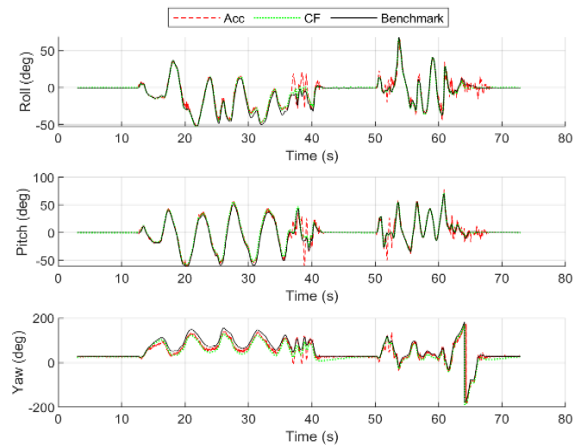
۳-۴. آزمایش سوم

در آخرین آزمایش، عملکرد روش‌های CF و Acc در حرکات با دینامیک بالا (شامل دوران‌ها و شتاب‌های شدید) ارزیابی می‌شود. برای این کار، مشابه آزمایش اول، ابتدا دستگاه به مدت چند ثانیه در کنج یک میز مسطح (به عنوان نقطه مبنا) قرار گرفت تا مقادیر اولیه با دقت خوبی برآورد شوند. ولی این بار پس از مرحله آماده سازی اولیه، دستگاه از سطح میز بلند شد و تا حد امکان تحت دوران‌های با فرکانس بالا، و تکان‌ها و شتاب‌های شدید قرار داده شد. البته همان‌طور که پیش از این توضیح داده شد، به منظور ساختن مقادیر پنج‌مارک، هر ۲۰ تا ۳۰ ثانیه، دستگاه برای چند ثانیه در نقطه مبنا قرار گرفت تا خطای تجمعی ناشی از ژيروسکوپ‌ها تصحیح شود. شکل ۱۳ نتایج روش پنج‌مارک را برای هر سه زاویه نمایش می‌دهد.



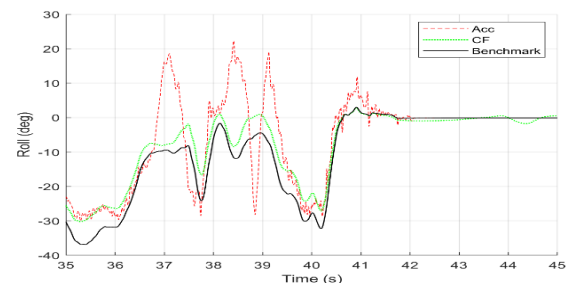
شکل ۱۳. آزمایش سوم: مقادیر پنج‌مارک به تفکیک زوایای اوپلری (رول، پیچ و یاو)

برای جلوگیری از شلوغی بیش از حد اشکال در این آزمایش، به عنوان نمونه، مقادیر زاویه رول در هر یک از روش‌های CF و Acc در بازه ۱۰ تا ۳۰ ثانیه به شکل جداگانه با مقادیر پنج‌مارک مقایسه شده است. برای شروع، مقادیر روش Acc را در شکل ۱۴ ملاحظه نمایید. با توجه به این شکل، واضح است که شتاب‌های شدید اعمال شده به دستگاه، عملکرد الگوریتم Acc را کاملاً مختل کرده است.



شکل ۱۱. آزمایش دوم: مقایسه الگوریتم CF و Acc برای زوایای اوپلری (رول، پیچ و یاو)

از آنجاکه در آزمایش دوم، شدت شتاب‌های افقی اعمال شده، کمتر از آزمایش اول بود و حرکت دستگاه بیشتر شامل دوران با فرکانس‌های پایین بود، نتایج روش Acc مقداری بهبود را نسبت به قبل نشان می‌دهند. با وجود این، جواب CF همچنان نویز و خطای کمتری دارد. در ضمن هر زمان که دستگاه تحت تأثیر شتاب افقی قرار گرفته، جواب Acc غیر قابل قبول شده است. به عنوان نمونه، مقادیر زاویه رول در بازه ۳۵ تا ۴۵ ثانیه را در شکل ۱۲ با هم مقایسه کنید.



شکل ۱۲. آزمایش دوم: مقایسه الگوریتم‌های CF و Acc برای مقادیر زاویه رول در بازه ۳۵ تا ۴۵ ثانیه

مقادیر RMSE و MaxAE جواب روش‌های CF و Acc در جدول ۳ قابل مشاهده است. واضح است که مطابق انتظار، روش CF کمترین مقادیر خطا را داشته است.

جدول ۳. مقایسه مقادیر RMSE و MaxAE الگوریتم‌ها در آزمایش دوم

	Yaw		Pitch		Roll		
	MaxAE	RMSE	MaxAE	RMSE	MaxAE	RMSE	
	۸,۵۲۱۶	۳,۹۱۸۱	۷,۶۲۶۳	۲,۰۸۴۸	۴,۰۱۹۷	۱,۳۴۹۰	CF
	۱۷,۰۰۶۹	۳,۴۰۱۴	۲۴,۶۸۵۹	۲,۹۲۳۴	۱۶,۹۵۲۰	۲,۴۳۹۶	Acc

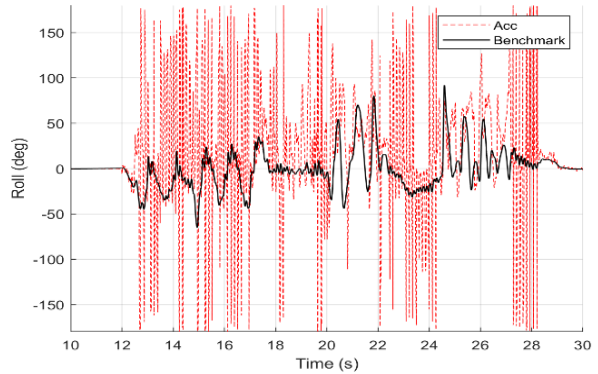
۴-۴. مقایسه با فیلتر کالمن

یک روش متداول دیگر برای محاسبه زوایای توجیه در سیستم‌های AHRS، استفاده از فیلتر کالمن است [۲۹، ۳۰]. در این روش، مشاهدات ژيروسکوپ‌ها، مدل دینامیک مسئله را تشکیل می‌دهند. در طرف مقابل، مشاهدات شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها، به‌عنوان به‌روزرسانی مشاهداتی استفاده می‌شوند تا خطای تجمعی ژيروسکوپ‌ها کنترل شود.

باین‌حال، فیلتر کالمن، چالش‌های جدیدی به مسئله وارد می‌کند که مهم‌ترین آن‌ها، افزایش حجم محاسبات است که اغلب ناشی از فرایند معکوس‌گیری در روابط است. به‌عنوان نمونه، در آزمایشی مشابه با آزمایش سوم، ولی در بازه زمانی طولانی ۲ ساعت، فیلتر کالمن استاندارد، تنها حدود ۰/۲ و ۰/۵ درجه بهبود در دقت زوایای تیلت و آزیموت را نشان داد؛ در حالی که مدت‌زمان انجام محاسبات در حدود ۴ برابر شد. این موضوع در پژوهش‌های پیشین نیز مورد توجه قرار گرفته است [۳۱]. از آنجاکه سیستم‌های AHRS اغلب بر روی میکروکنترلرها پیاده‌سازی می‌شوند، معمولاً فیلتر مکمل به دلیل سبک‌تر بودن محاسبات، و پیچیدگی کمتر روابط به‌منظور پیاده‌سازی، به فیلتر کالمن ترجیح داده می‌شود، مگر آنکه به بیشترین دقت ممکن در هر شرایطی نیاز مبرم وجود داشته باشد [۳۱].

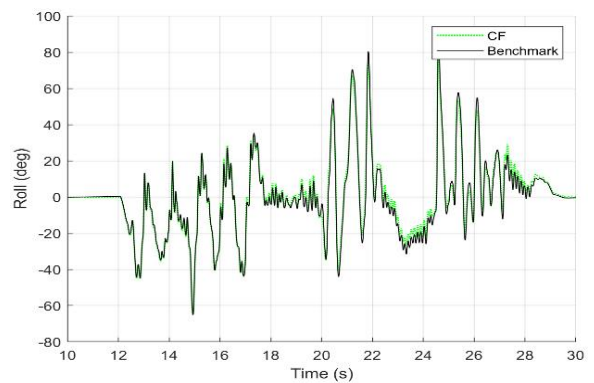
۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، دو روش اصلی برای برآورد زوایای توجیه یک سطح دوار معرفی شد. در روش اول، مشابه با آنچه در سیستم‌های ناوبری اینرسی گران‌قیمت انجام می‌شود، می‌توان با انتگرال‌گیری از مشاهدات ژيروسکوپ‌ها، توجیه سطح دوار را در طول زمان محاسبه کرد. این روش، هرچند توانایی زیادی در ردیابی دوران‌های سریع در کوتاه‌مدت دارد، ولی به دلیل ذات تجمعی خطاها، در بلندمدت دچار خطای بزرگ و غیرقابل‌قبولی می‌شود. این مشکل هنگام استفاده از ژيروسکوپ‌های میکروالکترومکانیکی بسیار شدیدتر نیز خواهد بود. در نقطه مقابل، روش ثانویه قرار دارد که زوایای توجیه را با مشاهدات شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها محاسبه می‌کند. برخلاف ژيروسکوپ‌ها، در این روش



شکل ۱۴. آزمایش سوم: مقایسه الگوریتم Acc و پنج‌مارک برای زاویه‌ی رول در بازه ۱۰ تا ۳۰ ثانیه

در طرف مقابل، الگوریتم CF قرار دارد که همان‌طور که در شکل ۱۵ مشخص است، به‌خوبی موفق به کاهش تأثیر شتاب‌های اعمال شده، و ردگیری دوران‌های دستگاه شده است.



شکل ۱۵. آزمایش سوم: مقایسه الگوریتم CF و پنج‌مارک برای زاویه‌ی رول در بازه ۱۰ تا ۳۰ ثانیه

همان‌طور که واضح است، در دینامیک‌های حرکتی شدید، تنها روش فیلتر مکمل (CF) موفق به ارائه عملکرد قابل قبول شده است. این موضوع را می‌توان از مقادیر RMSE و MaxAE جواب‌ها که در جدول ۴ آمده است هم استنتاج نمود.

جدول ۴. مقایسه مقادیر RMSE و MaxAE الگوریتم‌ها در آزمایش سوم

	Yaw		Pitch		Roll		
	MaxAE	RMSE	MaxAE	RMSE	MaxAE	RMSE	
11,9128	4,3108	8,0824	1,8562	9,4319	1,2830	CF	
44,9733	16,3406	69,6934	16,1595	16,9520	26,5381	Acc	

سپاسگزاری

نویسندگان از جناب آقای سروش ساسانی برای در اختیار قرار دادن نرم افزار تحت اندروید Sensorange به منظور ثبت و استخراج مشاهدات خام تلفن همراه هوشمند که روند انجام آزمایشات را بسیار تسهیل نمود، کمال سپاس و قدردانی را دارند [۳۳].

مراجع

- [1] Hristov B. Attitude and Heading Reference System for Unmanned Aerial Vehicles. InCyber-Physical Systems for Social Applications 2019 (pp. 340-364). IGI Global.
- [2] Gebre-Egziabher D, Hayward RC, Powell JD. A low-cost GPS/inertial attitude heading reference system (AHRS) for general aviation applications. InIEEE 1998 Position Location and Navigation Symposium (Cat. No. 98CH36153) 1996 Apr 20 (pp. 518-525). IEEE.
- [3] Hayward RC, Gebre-Egziabher D, Schwall M, Wilson J, Powell JD. Inertially aided GPS based attitude heading reference system (AHRS) for general aviation aircraft. In: Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1997); 1997 Sep 19. p. 289-98.
- [4] Hayward R, Marchick A, Powell JD. Single baseline GPS based attitude heading reference system (AHRS) for aircraft applications. InProceedings of the 1999 American Control Conference (Cat. No. 99CH36251) ;1999 Jun 2. IEEE;1999. Vol. 5. p. 3655-9.
- [5] Wendel J, Meister O, Schlaile C, Trommer GF. An integrated GPS/MEMS-IMU navigation system for an autonomous helicopter. Aerospace science and technology. 2006 Sep 1;10(6):527-33.
- [6] Sabet MT, Daniali HM, Fathi A, Alizadeh E. A low-cost dead reckoning navigation system for an AUV using a robust AHRS: Design and experimental analysis. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2017 Dec 4;43(4):927-39.
- [7] Armstrong B, Wolbrecht E, Edwards DB. AUV navigation in the presence of a magnetic disturbance with an extended Kalman filter. InOCEANS'10 IEEE SYDNEY 2010 May 24 (pp. 1-6). IEEE.
- [8] Guoqing Z, Tao L. Bio-inspired autonomous navigation system for logistics mobile robots with inertial AHRS. In2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC) 2017 Oct 3

مشکل خطای تجمعی وجود ندارد، هرچند شتاب‌های خارجی و اغتشاشات مغناطیسی به ایجاد خطاهای موقت منجر می‌شوند. به عبارت دیگر، دقیقاً برخلاف ژيروسکوپ‌ها، زوایای به دست آمده از شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها، دقت بلندمدت مناسب و کوتاه‌مدت ضعیفی دارند.

در نتیجه، استفاده از روشی به منظور تلفیق مشاهدات ژيروسکوپ‌ها، شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. یکی از روش‌های محبوب در این زمینه، فیلتر کالمن است؛ هرچند این روش چالش‌هایی در زمینه حجم محاسبات، و نیز خطی‌سازی و پیچیدگی معادلات ایجاد می‌کند. روش ساده‌تر، استفاده از فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر روی مشاهده حسگرهاست. در همین راستا، در این پژوهش از یک فیلتر مکمل تلفیقی استفاده شد که هم‌زمان، مشاهده ژيروسکوپ‌ها را از یک فیلتر بالاگذر، و مشاهدات شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها را از یک فیلتر پایین‌گذر عبور داده و تلفیق می‌کند. همان‌طور که در آزمایش‌های میدانی نشان داده شد، جواب به دست آمده از این روش، هم‌زمان دقت کوتاه‌مدت مشاهدات ژيروسکوپ‌ها، و نیز دقت بلندمدت مشاهدات شتاب‌سنج‌ها و مغناطیس‌سنج‌ها را فراهم می‌نماید.

با وجود دقت‌های قابل قبول به دست آمده از این فیلتر مکمل، دقت زاویه‌آزیموت (یاو) در این روش به شکل قابل ملاحظه‌ای کمتر از دقت زوایای تراز (رول و پیچ) است. بنابراین مطالعه به منظور افزایش دقت این زاویه با روش‌هایی همچون برآورد اغتشاشات مغناطیسی می‌تواند در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد.

موضوع مهم دیگر، مطالعه رفتار آماری (استوکاستیک) نویز حسگرهای میکروالکترومکانیکی و تأثیر آن‌ها در انتخاب پارامترهای فیلتر تلفیقی است. برای این منظور می‌توان از روش‌های نوین همچون برآورد مؤلفه‌های واریانس به روش کمترین مربعات^{۲۲} استفاده کرده و خواص آماری نویزهای همبسته (سفید) و غیرهمبسته (رنگی) را تعیین و لحاظ نمود [۳۲].

- 2018 Jun;19(2):459-69.
- [19] Geiger W, Bartholomeyczik J, Breng U, Gutmann W, Hafen M, Handrich E, Huber M, Jackle A, Kempfer U, Kopmann H, Kunz J. MEMS IMU for ahrs applications. In Proceedings of IEEE/ION PLANS 2008 2008 May 8 (pp. 225-231).
- [20] Herberth U, Rende J, Lutz H. Development of Inertial Sensors for AHRS considering DO-254. In 2018 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS) 2018 Sep 11 (pp. 1-19). IEEE.
- [21] Yadav N, Bleakley C. Accurate orientation estimation using AHRS under conditions of magnetic distortion. *Sensors*. 2014 Nov;14(11):20008-24.
- [22] Farrell J. Aided navigation: GPS with high rate sensors. McGraw-Hill, Inc.; 2008 Mar 25.
- [23] Yang YC, inventor. Method and apparatus for adaptive filter based attitude updating. United States patent application US 11/107,085. 2005 Oct 27.
- [24] Maliňák P, Soták M, Kaňa Z, Baránek R, Duník J. Pure-inertial AHRS with adaptive elimination of non-gravitational vehicle acceleration. In 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS) 2018 Apr 23 (pp. 696-707). IEEE.
- [25] Finlay CC, Maus S, Beggan CD, Bondar TN, Chambodut A, Chernova TA, Chulliat A, Golovkov VP, Hamilton B, Hamoudi M, Holme R. International geomagnetic reference field: the eleventh generation. *Geophysical Journal International*. 2010 Dec 1;183(3):1216-30.
- [26] Jekeli C. Inertial navigation systems with geodetic applications. Walter de Gruyter; 2012 Oct 25.
- [27] Collinson RP. Introduction to avionics. Springer Science & Business Media; 2012 Dec 6.
- [28] Lai YC, Jan SS, Hsiao FB. Development of a low-cost attitude and heading reference system using a three-axis rotating platform. *Sensors*. 2010 Apr;10(4):2472-91.
- [29] Kok M, Hol JD, Schön TB. Using inertial sensors for position and orientation estimation. arXiv preprint arXiv:1704.06053. 2017 Apr 20.
- [30] Kok M, Schön TB. A fast and robust algorithm for orientation estimation using inertial sensors. *IEEE Signal Processing Letters*. 2019 Sep 26;26(11):1673-7.
- [31] Islam T, Islam MS, Shajid-Ul-Mahmud M, Hossam-E-Haider M. Comparison of complementary and Kalman filter based data (pp. 971-975). IEEE.
- [9] Wang K, Liu YH, Li L. A simple and parallel algorithm for real-time robot localization by fusing monocular vision and odometry/AHRS sensors. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*. 2014 Jan 23;19(4):1447-57.
- [10] Markov A. Autonomous Strapdown Attitude and Heading Reference System for a Small Agile UAV. In 2020 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS) 2020 May 25 (pp. 1-3). IEEE.
- [11] Euston M, Coote P, Mahony R, Kim J, Hamel T. A complementary filter for attitude estimation of a fixed-wing UAV. In 2008 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems 2008 Sep 22 (pp. 340-345). IEEE.
- [12] Oh AS. A Study on MTL Device Design and Motion Tracking in Virtual Reality Environments. *Journal of information and communication convergence engineering*. 2019;17(3):205-12.
- [13] Abbate N, Basile A, Brigante C, Faulisi A. Development of a MEMS based wearable motion capture system. In 2009 2nd Conference on Human System Interactions 2009 May 21 (pp. 255-259). IEEE.
- [14] Naeemabadi M, Dinesen B, Najafi S, Thøgersen M, Hansen J. Feasibility of employing AHRS algorithms in the real-time estimation of sensor orientation using low-cost and low sampling rate wearable sensors in IoT application. In 2018 IEEE 8th International Conference on Consumer Electronics-Berlin (ICCE-Berlin) 2018 Sep 2 (pp. 1-6). IEEE.
- [15] Li Y, Efatmaneshnik M, Dempster AG. Attitude determination by integration of MEMS inertial sensors and GPS for autonomous agriculture applications. *GPS solutions*. 2012 Jan 1;16(1):41-52.
- [16] Da R. Investigation of a low-cost and high-accuracy GPS/IMU system. In Proceedings of the 1997 National Technical Meeting of The Institute of Navigation 1997 Jan 16 (pp. 955-963).
- [17] Cohen CE, Parkinson BW, McNally BD. Flight tests of attitude determination using GPS compared against an inertial navigation unit. *Navigation*. 1994 Mar;41(1):83-97.
- [18] Lee B, Lee YJ, Sung S. Attitude Determination Algorithm based on Relative Quaternion Geometry of Velocity Incremental Vectors for Cost Efficient AHRS Design. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*.

fusion for attitude heading reference system. In: AIP Conference Proceedings 2017 Dec 28 (Vol. 1919, No. 1, p. 020002). AIP Publishing LLC.

[32] Amiri-Simkooei AR, Teunissen PJ, Tiberius CC. Application of least-squares variance component estimation to GPS observables. *Journal of Surveying Engineering*. 2009 Nov;135(4):149-60.

[33] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.sensorange.sensorange>

پی‌نوشت‌ها

1. Attitude and Heading Reference System (AHRS)
2. Roll
3. Pitch
4. Yaw
5. Global Navigation Satellite System (GNSS)
6. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
7. Wearable Motion Capture System
8. Inertial Measurement Unit (IMU)
9. Global Positioning System (GPS)
10. Inertial Navigation System (INS)
11. Micro Electro Mechanical System (MEMS)
12. Magnetic Dip Angle (*also known as* Magnetic Inclination)
13. First-Order Gauss-Markov Process (GM1)
14. State Vector
15. MATLAB
16. North-West-Up (NWU)
17. Magnetic Declination
18. Complementary Filter
19. Benchmark
20. Root Mean Square Error (RMSE)
21. Max Absolute Error (MaxAE)
22. Least-Squares Variance Component Estimation (LS-VCE)