مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۳، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸، صفحه ۵۶-۴۷

طراحی و ارزیابی تجربی الگوریتم تخمین وضعیت تلفیقی در رونده زیرآبی خودکار مبتنی بر فیلتر تکمیلی غیرمستقیم

سیدوحید ضیاء [۱]، جواد بابایی [۲]، ابراهیم علیزاده [۳]

[۱] کارشناسی ارشد سیستم هدایت و کنترل، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، zia_vahid_amol@yahoo.com

[۲] کارشناسی ارشد مکانیک ساخت و تولید، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، J.babaei@gmail.com

[۳] استادیار، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ealizadeh@mut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۱۶ ویرایش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۷ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۹

چکیده: هدف اصلی این مقاله طراحی یک سیستم ناوبری تلفیقی متشکل از سنسورهای اینرسی ارزان‌قیمت برای تخمین وضعیت نسبتا دقیق یک رونده زیرآبی خودکار در طول همه فازهای ماموریت زیرآبی و سطحی است. دستاورد پیشنهادی با تکیه بر سیستم موقعیت-یاب جهانی GPS، واحد اندازه‌گیری اینرسی (شتاب‌سنج و ژیروسکوب)، سنسور مغناطیس‌سنج و تکنیک فیلتر تکمیلی پایه‌گذاری شده است. فیلتر تکمیلی بر پایه فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر به ترتیب برای حذف خطاهای نویز و بایاس در داده‌های اندازه‌گیری موجود در ساختار ناوبری تلفیقی طراحی می‌شود. بدین ترتیب تخمین نسبتا دقیقی از وضعیت رونده در اختیار سیستم هدایت و کنترل قرار می‌دهد. مهمترین ویژگی دستاورد پیشنهادی سوئیچ بین GPS و مغناطیس‌سنج همگام با تغییر فاز حرکتی رونده زیرآبی خودکار است که منجر به تخمین دقیق‌تر زاویه سمت نسبت به سیستم ناوبری ژایرویی در فازهای حرکتی سطحی و زیر آبی می‌شود. عملکرد الگوریتم ناوبری تلفیقی پیشنهادی، در آزمون میدانی یک رونده زیرآبی خودکار تحقیقاتی و در مقایسه با فیلتر کالمن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: تخمین وضعیت، رونده زیرآبی خودگردان، واحد اندازه گیری اینرسی، فیلتر تکمیلی غیرمستقیم، سیستم موقعیت یاب جهانی.

Design and Experimental Evaluation of integrated orientation estimation algorithm Autonomous Underwater Vehicle Based on Indirect Complementary Filter

Seyed Vahid Zia, Javad Babaei, Ebrahim Alizadeh

Abstract: This paper aims is to design an integrated navigation system constituted by low-cost inertial sensors to estimate the orientation of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) during all phases of under water and surface missions. The proposed approach relied on global positioning system, inertial measurement unit (accelerometer & rate gyro), magnetometer and complementary filter technique. Complementary filter operates based on low pass filter and high pass filter to remove noise and bias error of measurement data in the integrated navigation structure, respectively. Consequently, a relatively accurate orientation estimation is provided for guidance/control system. The most important feature of the proposed approach is the ability of switching between GPS and magnetometer sensor consistent with phase-change in the AUV motion. This brings about more accurate estimation of heading angle in both the surface and

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.1.5.6]
[DOI: 10.29252/joc.13.1.47]

underwater phase compared to gyro-based navigation. The performance of the proposed algorithm is assessed in a field test executed on a research AUV and in comparison, with Kalman filter.

Keywords: Attitude Estimation, Autonomous Underwater Vehicle, Inertial Measurement Unit, Indirect Complementary Filter, Global Positioning System.

۱- مقدمه

گسترش محدوده کاربردی انواع ربات اعم از هوایی، آبی و زمینی و تلاش برای ساخت رونده‌های هوشمند ارزان و با قابلیت اطمینان بالا، منجر به توسعه الگوریتم‌های ساده و نیرومند ناوبری برای تخمین وضعیت شده است. ناوبری دقیق، یکی از توانایی‌های بسیار مهم و اثبات‌کننده کارایی ماموریتی رونده زیرآبی خودکار (AUV)[۱] در کاربردهای نظامی و غیرنظامی است. بسیاری از ماموریت‌های AUV به درجه بالایی از دقت در ناوبری نیازمند است. کارایی و اثربخشی هر یک از الگوریتم‌های تخمین وضعیت و در نهایت موقعیت‌یابی به دو عامل میزان دسترس‌پذیری و قابلیت اطمینان اندازه‌گیری‌ها بستگی دارد که منوط به انتخاب صحیح سنسورهای موجود متناسب با نوع کاربری است [۱].

سیستم‌های ناوبری برمبنای سنسورهای داخلی یا دریافت‌سیگنال خارجی دسته‌بندی می‌شوند. کارایی سیستم ناوبری مبتنی بر دریافت سیگنال خارجی مانند Loran, Omega, GPS به بازه زمانی محدود است که گیرنده سیگنال بیرونی را دریافت می‌کند. درحالیکه ناوبری مبتنی بر سنسورهای داخلی می‌تواند ترکیبی از انواع مختلف ابزارها مانند واحد اندازه‌گیری اینرسی[۲]، انحراف‌سنج[۳]، شمال‌یاب[۴]، سونار و ... باشد. با وجود محدودیت‌های کاربردی و خطاهای اندازه‌گیری، روش ناوبری داخلی به دلیل عدم نیاز به ارسال هرگونه سیگنال به محیط خارج، نسبت به ناوبری خارجی منفعت‌هایی دارد، بویژه در حوزه نظامی که می‌تواند منجر به شناسایی و آشکارسازی وسیله گردد [۲].

با بکارگیری سنسورهای دقیق در سیستم‌های ناوبری، موقعیت و وضعیت دقیق وسیله قابل استخراج است، ولی چنین سنسورهایی با کیفیت بسیار بالا، از نظر قیمت و ابعاد برای کاربردهای تجاری مناسب نخواهند بود. پیشرفت روزافزون سیستم‌های الکترومکانیکی در مقیاس میکرو[۵]، توسعه واحدهای اندازه‌گیری اینرسی ارزان‌قیمت با ابعاد کوچک را در پی داشته است. اما خروجی آنها از دو منبع خطای نویز و بایاس رنج می‌برند. در حقیقت در تولید سنسورهای جدید با کاربری تجاری، مصالحه‌ای بین قیمت، ابعاد سنسور و دقت اندازه‌گیری صورت گرفته است [۳و۴].

هر یک از سنسورهای مورد استفاده در سیستم‌های ناوبری دارای مزایا و معایبی هستند. بنابراین هدف از تلفیق سنسورها، پوشش نقاط ضعف یک سنسور توسط سنسور دیگر و تجمیع قابلیت‌های همه آنها برای افزایش کارایی سیستم ناوبری است. به عنوان یک ابزار الکترومکانیکی، ژیروسکوب[۶] در معرض خطاهای بسیاری ناشی از ناهم‌راستایی محور[۷]، بایاس ثابت[۸]، بایاس انحراف[۹]، خطای فاکتور مقیاس ثابت و نامتقارن[۱۰] است. بایاس انحراف، اصلی‌ترین منبع خطایی اثرگذار بر دقت ژیروسکوب است که در صورت عدم تصحیح با مرجع خارجی، به دلیل انتگرال‌گیری از نرخ‌های زاویه‌ای، منجر به انحراف فراوان از موقعیت صحیح خواهد شد. اندازه‌گیرهای حاصل از GPS بدون بایاس بوده و بدون نیاز به تنظیمات دقتی در حد سانتیمتر در اختیار کاربر قرار خواهد داد. در مقابل، نرخ بروزرسانی کند در قیاس با سنسورهای اینرسی، عدم کارایی در زیر آب به دلیل عدم انتشار امواج الکترومغنطیسی و زمان راه‌اندازی[۱۱] نسبتا طولانی برای برقراری ارتباط با ماهواره‌ها، از مهم‌ترین معایب GPS است. عدم واگرایی خروجی با گذشت زمان، شتاب‌سنج را به عنوان یک سنسور جبران‌کننده برای تصحیح انحراف ژیروسکوب مطرح کرده است. اما نکته منفی در عملکرد شتاب‌سنج، تاثیرپذیری آن از نویزهای فرکانس بالا و ارتعاشات محیطی است. مغناطیس‌سنج به عنوان عامل تصحیح‌کننده دیگر برای انحراف ژیروسکوب مطرح است اما تاثیرپذیری از میدان‌های مغناطیسی ناخواسته محیط (آهن نرم و سخت) و خطاهای ابزاری مانند فاکتور مقیاس، آفست و ... بر عملکرد آن تاثیر منفی خواهد داشت که البته این نوع خطاها را می‌توان با کالیبراسیون برطرف نمود [۲و۴-۸].

وجود نویز و بایاس در خروجی هر سنسور مانع بزرگی برای استفاده مستقیم از آنهاست. با توجه به متون مختلف، برای کاهش تاثیرات عوامل مزاحم و تصحیح عملکرد سنسورها، روش‌هایی مبتنی بر فیلتر مانند فیلتر کالمن (فیلتر کالمن ساده[۱۲] و توسعه‌یافته[۱۳]) و مشاهده‌گر حالت با بهره ثابت با نام فیلتر تکمیلی[۱۴]، ارائه شدند که بیشترین کاربرد را در زمینه تخمین وضعیت[۱۵] با تلفیق سنسورهای مختلف در الگوریتم‌های ناوبری دارند [۳و۴و۹]. فیلتر کالمن یک فرآیند تکرارشونده با ساختار تصحیح‌کننده پیش‌بین در حوزه زمان است که با تکیه بر دینامیک سیستم و دانش اولیه از نویز سیگنال، تخمین مناسبی از حالت سیستم ارائه می‌دهد. فیلتر کالمن با ساختار مستقیم و سرعت پردازش بالا، علاوه‌بر تخمین حالت‌های سیستم، همگرایی خطا را نیز حفظ می‌نماید اما

[۱] Autonomous Underwater Vehicle
[۲] Inertial Measurement Unit
[۳] Inclinometer
[۴] Compass
[۵] Micro Electrical-Mechanical System (MEMS)
[۶] Gyroscope
[۷] Axis misalignment
[۸] Fixed bias
[۹] Drift Bias
[۱۰] Fixed & Asymmetric Scale Factor Errors
[۱۱] Warm up
[۱۲] Simple Kalman Filter
[۱۳] Extended Kalman Filter
[۱۴] Complementary Filter
[۱۵] Attitude Estimation

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.1.5.6]
[DOI: 10.29252/joc.13.1.47]

مهمترین مسئله در پیاده‌سازی فیلتر کالمن، محاسبه ماتریس همگرایی، تعیین مناسب پارامترهای طراحی و بهره‌های کالمن است[۶و۹].

فیلتر تکمیلی به دلیل ساختار ساده، کارایی بالا و سهولت در پیاده‌سازی یک جایگزین متداول برای فیلتر کالمن است. فیلتر تکمیلی با فیلتر دوگانه (بالاگذر و پایین گذر) یک تحلیل فرکانسی همه‌گذر ارائه داده و از ترکیب چند منبع برای تخمین وضعیت بهره می‌گیرد. درکاربردهای هوایی به دلیل پیچیدگی در اجرا و همگرایی کندتر (به دلیل زمان‌بر بودن روند تکراری) فیلتر کالمن، استفاده از فیلتر تکمیلی تقدم دارد. در مقابل مهمترین مشکل فیلتر تکمیلی، بهره ثابت آن است که منجر به تخمین نادرست بویژه در مانورهایی با دینامیک بالا می‌گردد. [۴و۹و۱۰].

به منظور افزایش شناخت نسبت به ساختار و عملکرد فیلتر تکمیلی و غلبه بر موانع بکارگیری سنسورهای ارزان‌قیمت در سیستم ناوبری، به بررسی دستاوردهایی مبتنی بر فیلتر تکمیلی پرداخته شده است که در شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری و آزمون‌های میدانی موردارزیابی قرارگرفته است. در مرجع [۱] برای استخراج وضعیت صحیح و تخمین بایاس ژایرو، دو نوع فیلتر تکمیلی مستقیم و فیلتر تکمیلی غیرخطی غیرفعال پیشنهاد شده است که با فرم استاندارد چهارگان روی پرنده بدون سرنشین (UAV)[۱] پیاده‌سازی شده است و هدف آن آمیختن اندازه‌گیری‌های فرکانس پایین شتاب با اندازه‌گیری‌های فرکانس بالای نرخ زاویه‌ای برای دستیابی به یک تخمین مناسب وضعیت در محدوده وسیع فرکانسی است. در مرجع [۲] فیلتر تخمین موقعیت تکمیلی مبتنی بر اطلاعات نرخ پایین موقعیت حاصل از سیستم موقعیت‌یاب زیرآبی آکوستیک (USBL)[۲] و اطلاعات سرعت با نرخ بالا حاصل از سرعت‌سنج داپلری (DVL)[۳] برای تعیین موقعیت وسیله خودکار زیرآبی در آب‌های کم عمق ارائه و صحت عملکرد آن بصورت عملی در محیط‌های پر نویز مورد ارزیابی قرار داده است. مرجع [۳] کلاس جدیدی از فیلترهای تکمیلی پایدار مجانبی سراسری (GAS)[۴] را برای تخمین وضعیت مبتنی بر اندازه‌گیری‌های سنسور ارائه داده است. فیلتر پیشنهادی شامل تخمین بایاس‌های نرخ ژایرو و اندازه‌گیری‌های ناقص سنسوری با مشاهده‌گر چند برداری بوده که به منظور ارزیابی عملکرد روی میز ثابت با چرخش نامحدود روی همه محورها اجرا شده است.

مرجع [۴] عملکرد فیلتر کالمن و تکمیلی را برای تخمین وضعیت UAV کوچک و با ترکیب اندازه‌گیری‌های ابزار اینرسی MEMS مقایسه کرده است. آنها با پیاده‌سازی عملی نشان دادند که فیلتر کالمن، خروجی نویزی‌تری نسبت به فیلتر تکمیلی داشته اما عاری از بایاس است و برای کارکردهایی که به تخمین بلندمدت نیاز دارد، مناسب خواهد بود. به دلیل تاثیرپذیری فیلتر تکمیلی از خطای ناشی از بایاس سنسور، در مرجع [۵] برای حذف خطای ژیروسکوب، از دوربین استریو به عنوان مرجع خارجی استفاده شده است. از سوی دیگر به دلیل تاثیرپذیری مستقیم خطای حالت ماندگار پارامتر تخمین از فرکانس قطع فیلتر تکمیلی، از دستاورد منطق فازی برای تنظیم خودکار فرکانس قطع استفاده شده است. در مرجع [۶] تخمینگر فیلتر تکمیلی با بهره‌ها (فرکانس قطع) ثابت و مبتنی بر سنسورهای اینرسی ارزان‌قیمت و GPS با هدف کاهش بار محاسباتی الگوریتم ناوبری پرنده بدون سرنشین ارائه و کارایی آن در آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه مورد ارزیابی قرار گرفته است. بزرگترین نوآوری مرجع [۷] ترکیب تئوری فیلتر تکمیلی موجود با بیان وضعیت چهارگان است. تخمین‌گر وضعیت غیرمستقیم با سرعت بروزرسانی بالا برای یک وسیله زیرآبی کنترل از راه دور(ROV)[۵] پیشنهاد داده است. سادگی ساختار ارائه شده با نرخ بروزرسانی بسیار سریع، پیروی از چرخش‌های سریع وسیله را در کاربردهای زمان واقعی امکان‌پذیر می‌کند. دستاورد کلیدی مرجع [۸] ارائه سیستم ناوبری مبتنی بر سنسورهای سرعت، شتاب‌سنج و فیلتر تکمیلی غیرخطی برای تخمین وضعیت پرنده بدون سرنشین است. در این روش یک مدل مرتبه اول ساده از دینامیک‌های زاویه حمله برای تعقیب چرخش‌های سریع وسیله مورد استفاده قرار گرفته است که برای جبران خروجی شتاب‌سنج و دستیابی به تخمین بایاس صفر از راستای گرانش بر نیروی جانب مرکز و شتاب غیراینرسی بدنه تکیه دارد.

در مرجع [۹] سیستم تخمین وضعیت و تعیین سمت UAV با تکیه بر فیلتر تکمیلی با قابلیت تطبیق بهره فیلتر و ترکیبی از واحدهای اندازه‌گیری اینرسی ارائه شده است. با توجه به تاثیرگذاری فرکانس قطع فیلتر (فرکانس طبیعی) بر خطای حالت ماندگار پارامتر تخمین، دستیابی به کارایی بسیار مناسب فیلتر تخیمن با بهره ثابت در محدوده وسیع از شرایط دینامیک بسیار دشوار خواهد بود. برای رفع این مشکل منطق تعویض بهره‌ها با تکیه بر دینامیک سیستم که توسط شتاب‌سنج‌ها حس می‌گردد، رونمایی شده است. مرجع [۱۰] با معرفی شکل‌های مختلف فیلتر تکمیلی به مقایسه دو فیلتر تکمیلی و کالمن پرداخته است. در مرجع [۱۱] یک دستاورد تخمین وضعیت جدید با فرم مجزای چهارگان از مشاهدات میدان مغناطیسی و گرانش توصیف شده است. برای اجتناب از اثرات شدید اختلالات مغناطیسی در پارامترهای تخمینی غلتش و فراز، فرآیند یافتن چهارگان زاویه انحراف و چهارگان سمت به دوزیربخش در سیستم تفکیک شده است. صحت عملکرد فیلتر تکمیلی جدید با ترکیب اطلاعات ژیروسکوب، شتاب‌سنج و میدان مغناطیسی برای وسیله هوایی کوچک بصورت تحلیلی و شبیه‌سازی روی اطلاعات تجربی اثبات شده است. در مرجع [۱۲] الگوریتم جدید تخمین وضعیت و بایاس ژایرو یک جسم صلب مبتنی بر مشاهده‌گر غیرخطی مود لغزشی و قرائت سنسورهای ارزان‌قیمت ارائه و پایداری آن توسط روش پایداری لیاپانوف اثبات شده است. در مرجع [۱۳] برای جبران خطای سنسور اینرسی و تعیین وضعیت سه بعدی رونده‌های زمینی و پرنده، از تلفیق سنسورها در فیلتر تکمیلی مبتنی بر گرادیان نزولی (GDCA)[۶] و فیلتر تکمیلی ساده (ECA)[۷] ارائه شده است. ناوبری تلفیقی

[۱] Unmanned Aerial Vehicle
[۲] Ultra-short baseline
[۳] Doppler velocity logger
[۴] Globally Asymptotically Stable

[۵] remotely operated underwater vehicle
[۶] Gradient Descent based Complementary Algorithm
[۷] Explicit Complementary Algorithm

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.1.5.6]
[DOI: 10.29252/joc.13.1.47]

با استفاده از ژیروسکوب و GPS برای فازهای حرکتی سطحی و زیرسطحی وسیله خودکار زیرآبی مبتنی بر فیلتر تکمیلی در مرجع [۱۴] ارائه شده است. در مرجع [۱۵] کالیبراسیون مغناطیس‌سنج سه محوره مبتنی بر تخمینگر حداقل مربعات تطبیقی و با مدل خطای کامل شامل خطای ابزاری و انحرافات مغناطیسی ارائه شده است. در مرجع [۱۶] دستاورد تخمین و تصحیح تطبیقی وضعیت مبتنی بر فیلتر کالمن ارائه و از مقدار حدی شتاب دینامیکی به عنوان یک معیار تجربی برای تطبیق بهره‌های فیلتر کالمن استفاده شده است.

با توصیفات ارائه شده درخصوص ساختار فیلتر تکمیلی و با توجه به نوع ماموریت ربات زیرآبی خودکار که ترکیبی از فازهای سطحی و زیرسطحی است، هدف این پژوهش استفاده از فیلتر تکمیلی و مجموعه‌ای از سنسورهای ارزان قیمت با محدوده دقت متفاوت است. بطوریکه بتوان در مواقع ضرور و زمانی که یکی از سنسورها از دسترس خارج شده و فاقد کارایی است، سنسور دیگری را جایگزین آن نمود. به عنوان مثال در فاز حرکت زیرسطحی گیرنده GPS قادر به دریافت سیگنال ماهواره‌ها نخواهد بود و عملا فاقد کارایی است. در این حالت سنسور مغناطیس‌سنج به عنوان جایگزین برای تعیین مسیر حرکت مورد استفاده قرار خواهد گرفت. طراحی الگوریتم نرم‌افزاری سوئیچ بین GPS و مغناطیس‌سنج، پیاده‌سازی چنین سیستمی را برای یک AUV به چالش بزرگتری در مقایسه با همتای پرنده خود بدل خواهد کرد. سنسور مغناطیس‌سنج در مقایسه با سیستم موقعیت‌یاب GPS دقت کمتری دارد ولی نسبت به سیستم ناوبری اینرسی که خطای جمع شونده با زمان دارد، دقت ثابتی را در اختیار کاربر قرار خواهد داد. البته می‌توان تاثیر این خطای ثابت را در فاز حرکت سطحی و زمانی که سیگنال GPS در دسترس گیرنده قرار دارد، جبران نموده و به حداقل رساند و به اصلاح مسیر پرداخت. البته باید در نظر داشت که سنسور مغناطیس‌سنج از عوامل اغتشاش‌زای بیرونی و یا بدنه فلزی کپسول تاثیر خواهد پذیرفت. بنابراین باید برای حذف این تاثیرات منفی نیز فکری شود، برای این منظور دو راهکار مدنظر است. در روش اول می‌توان بدنه کپسول را از جنس کامپوزیت تهیه کرد که بر انحراف مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین بی تاثیر باشد. روش دوم در مواردی کارایی خواهد داشت که بدنه از جنس فلز باشد، در این حالت برای کاهش تاثیرپذیری، سنسور مغناطیس‌سنج را از بدنه فلزی کپسول دور خواهند نمود. البته باید در نظر داشت که سنسور مغناطیس‌سنج پس از نصب روی کپسول نیاز به کالیبراسیون خواهد داشت. سیستم ناوبری پیشنهادی با ارائه اصول ساده ریاضیاتی و پیاده‌سازی آسان، بدون اجرای یک روند تکراری، بار محاسباتی رایانه شناوری را کاهش خواهد داد. از سوی دیگر با توجه به بکارگیری مبانی ساده فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر، با بی نیازی از تخمین پارامترهای طراحی در فیلتر کالمن همچون ماتریس همگرایی، ماتریس‌های کواریانس خطای تخمین، نویز مدل و اندازه‌گیری که نیازمند دانش اولیه از دینامیک سیستم و نویز سیگنال خواهد بود، مشکلات مطرح در پیاده‌سازی فیلتر کالمن را برطرف می‌سازد. با توجه به اینکه AUV هدف از نظر سرعت و مانورپذیری، دینامیک کندی دارد، از فیلتر تکمیلی با بهره ثابت استفاده شده است. الگوریتم ناوبری پیشنهادی با ارائه ساختار تلفیقی، بر سنسورهای ارزان‌قیمت تکیه داشته و با کارایی نسبتا دقیق، نیاز به بکارگیری سنسورهای گران‌قیمت را مرتفع می‌سازد و برای کاربردهای تحقیقاتی-پژوهشی و تجاری پیشنهاد می‌گردد.

۲- تخمین وضعیت

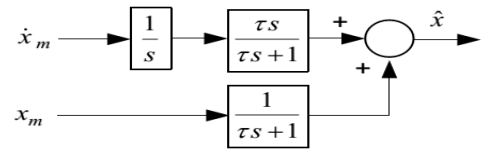
در سیستم ناوبری مبتنی بر سنسور اینرسی، وضعیت با انتگرال‌گیری از نرخ زاویه‌ای بدست می‌آید. به دلیل وجود بایاس در اندازه‌گیری و همچنین خطای تجمعی ناشی از انتگرال‌گیری، خطای تخمین به مرور زمان افزایش می‌یابد. با هدف کنترل و کاهش خطای تخمین ناشی از خطاهای اندازه‌گیری و اختلالات محیطی، الگوریتم ناوبری مبتنی بر فیلتر تکمیلی با ساختار ساده و ایده ترکیب سنسورهای اینرسی (شتاب و سرعت زاویه‌ای)، مغناطیس‌سنج و GPS ارائه خواهد شد که در ادامه به تشریح ساختار و ویژگی‌های آن پرداخته می‌شود [۵].

۲-۱- ساختار فیلتر تکمیلی

یک راه حل ساده و در عین حال کارآمد برای تخمین وضعیت، تجمیع فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر بترتیب برای تصحیح خروجی سنسورهای متأثر از نویز فرکانس بالا و بایاس فرکانس پایین است. از این ساختار مجتمع با ایده ترکیب چند سنسور به عنوان فیلتر تکمیلی یاد می‌شود. شکل ۱ ساختار فیلتر تکمیلی مستقیم را برای تخمین $\hat{x}(t)$ از $x(t)$ با استفاده از اندازه‌گیری $x_m(t)$ و $\dot{x}_m(t)$ نشان می‌دهد. مولفه $x_m(t)$ سیگنال اندازه‌گیری آمیخته با نویز فرکانس بالای $n_1(t)$ و پارامتر $\dot{x}_m(t)$ اندازه‌گیری نرخ تغییرات سیگنال آمیخته با نویز فرکانس پایین $n_2(t)$ است [۶و۱۰]:

$$x_m(t) = x(t) + n_1(t) \qquad and \qquad \dot{x}_m(t) = \dot{x}(t) + n_2(t) \qquad (۱)$$

بنابراین در سیگنال‌های اندازه‌گیری شده مولفه‌هایی از نویز و بایاس با دامنه و محدوده فرکانسی تصادفی وجود خواهند داشت که بر تخمین نهایی سیگنال تاثیرگذار خواهند بود. بنابراین باید به گونه‌ای اثر این عوامل مزاحم را حذف نمود. همانطور که بیان شد فیلتر تکمیلی تجمیع فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر را ارائه داده که در شکل ۱ قابل مشاهده است.



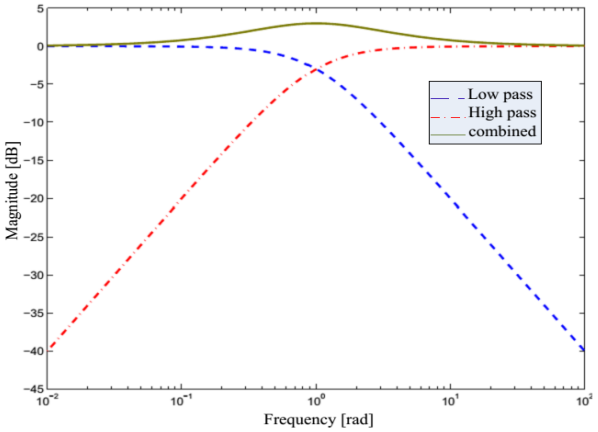
شکل ۱- فیلتر تکمیلی مستقیم

تبدیل لاپلاس تخمین $\hat{x}(t)$ را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\hat{x}(s) = \frac{1}{\tau s+1} X(s) + \frac{\tau s}{\tau s+1} X(s) + \frac{1}{\tau s+1} N_1(s) + \frac{\tau s}{\tau s+1} (\frac{1}{1} N_2(s)) \qquad (۲)$$

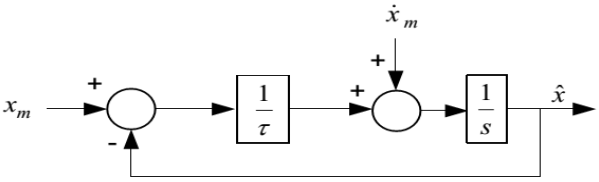
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.1.5.6]
[DOI: 10.29252/joc.13.1.47]

رابطه(۲) شامل عبارت‌هایی از نویز، بایاس و سیگنال اصلی است. جمله نویز در هر دو کانال با فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر مرتبه اول با ثابت زمانی τ خنثی می‌شوند. پاسخ فرکانسی فیلتر در شکل ۲ قابل مشاهده است [۶و۱۰].



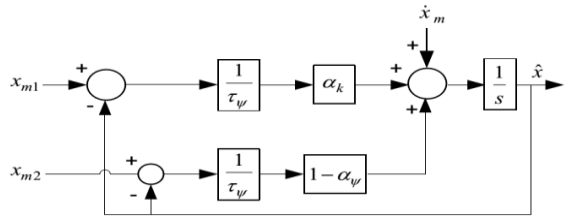
شکل ۲- منحنی دامنه-فرکانس فیلتر تکمیلی

در فرکانس‌های $\omega >> \frac{1}{\tau}$، تخمین $\hat{X}$ تحت تاثیر انتگرال $\dot{X}_m$ خواهد بود، درحالی‌که در بازه $\omega << \frac{1}{\tau}$، تخمین $\hat{x}$ مقدار x_m را دنبال خواهد کرد. در فرکانس‌های نزدیک $\frac{1}{\tau}$ خروجی تخمین‌گر ترکیبی از دو سیگنال است که بصورت برآمدگی در شکل ۲ قابل مشاهده است. در چنین ساختاری، در محدوده فرکانسی وسیع، مقدار تخمین به سیگنال واقعی نزدیک می‌شود. نمونه دیگری از فیلتر تکمیلی بدون تغییر تابع تبدیل فیلتر در شکل ۳ ارائه شده که بدلیل ساختار فیدبکی برای پیاده‌سازی روی میکروکنترلر مناسب است [۶و۱۰].



شکل ۳- فیلتر تکمیلی غیرمستقیم (۱و۲)

یک ویژگی فیلتر تکمیلی غیرمستقیم، بروزرسانی ساده آن برای دستیابی به کارایی قابل قبول در حضور سنسورهای ارزان‌قیمت است. شکل ۴ فیلتر تکمیلی غیرمستقیم با دو کانال فرکانسی را نشان می‌دهد. پارامتر $\alpha_k \in [0,1]$، تنظیم‌کننده وزن نسبی بین سیگنال‌های x_{m1} و x_{m2} است و از این طریق مزایای چندین اندازه‌گیری را برای حصول بهترین تخمین برمی‌گزینند. یک α_k یک فیلتر پایین‌گذر برای حذف نویز فرکانس بالای سیگنال x_{m1} است، بنابراین $1-\alpha_k$ یک فیلتر بالاگذر بوده و نویزهای فرکانس پایین یا بایاس x_{m2} را حذف می‌کند [۶و۱۰].



شکل ۴- اندازه‌گیری چندگانه در فیلتر تکمیلی غیرمستقیم (۱و۲)

با تجمیع فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر و تشکیل یک فیلتر همه‌گذر، تخمین وضعیت در یک محدوده فرکانسی گسترده فراهم می‌شود. فرکانس قطع فیلتر همه‌گذر، به‌عنوان مهم‌ترین عامل تاثیرگذار میانگین و واریانس خطای تخمین را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۴و۱۱و۱۲].

۲-۲- پیاده‌سازی فیلتر تکمیلی غیرمستقیم روی AUV

هدف از این پژوهش شبیه‌سازی فیلتر تکمیلی غیرمستقیم برای تخمین وضعیت در رونده زیرآبی خودکار است. ماموریت محوله به این AUV ایجاب می‌کند که وسیله برای استتار، ۹۰٪ مسیر را در زیر آب طی نماید. بنابراین تعیین راهبرد ناوبری برای رسیدن به نقطه هدف با دقت قابل قبول بسیار اهمیت دارد. عامل تعیین‌کننده در راهبرد ناوبری، انتخاب سنسورها با توجه به شرایط محیطی، قیمت، دقت و اندازه آنهاست. در ادامه به بررسی فیلتر پیشنهادی برای تخمین وضعیت با استفاده از سنسورهای اینرسی (شتاب و سرعت زاویه‌ای)، مغناطیس‌سنج و GPS پرداخته می‌شود.

۲-۲-۱- تخمین فراز

با توجه به ماهیت الگوریتم تکمیلی در مبحث تخمین وضعیت، پاسخ فرکانس بالای ژیروسکوب قابل اتکاست درحالیکه پاسخ فرکانس پایین آن به دلیل بایاس و انحراف منجر به رشد خطا خواهد شد. در مقابل تخمین موقعیت مبتنی بر اندازه‌گیری‌های فرکانس پایین شتاب‌سنج دارای قابلیت اطمینان بالاتری است [۱۳].

در نتیجه زاویه فراز با استفاده از اندازه‌گیری‌های شتاب و سرعت زاویه‌ای از سنسور AHRS در قالب فیلتر نمودار ۳ قابل تخمین است. مولفه فرکانس پایین زاویه فراز بطور مستقیم از خروجی شتاب‌سنج قابل استخراج است. شتاب‌سنج قادر به اندازه‌گیری بردار گرانش نسبت به محورهای بدنه است زیرا در یک حرکت حالت پایدار مانند کروز، به دلیل ناچیز بودن شتاب اینرسی، سنسور شتاب تنها بردار گرانش را اندازه می‌گیرد. اگر $\alpha = [\alpha_x \quad \alpha_y \quad \alpha_z]^T$ مولفه‌های سنسور شتاب در دستگاه بدنی باشند، آنگاه داریم [۶]:

$$\theta_L = -\sin^{-1}(\frac{\alpha_x}{g}) \qquad (۳)$$

مولفه فرکانس بالای زاویه فراز با جایگذاری نرخ‌های زاویه‌ای در معادله دینامیکی زاویه فراز محاسبه خواهد شد:

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.1.5.6]
[DOI: 10.29252/joc.13.1.47]

$$\dot{\theta} = q\cos(\hat{\varphi}) - r\sin(\hat{\varphi}) \quad (۴)$$

۲-۲-۲- تخمین غلتش

مولفه‌های فرکانس پایین و فرکانس بالای زاویه غلتش نیز همانند زاویه فراز، با استفاده از معادلات (۵) و (۶) و اندازه‌گیری‌های شتاب و سرعت زاویه‌ای سنسور اینرسی قابل استخراج است:

$$\varphi_L = a\tan 2(-\alpha_y, \alpha_x) \quad (۵)$$

$$\dot{\varphi} = p + q\sin(\hat{\varphi})\tan(\hat{\theta}) + r\cos(\hat{\varphi})\tan(\hat{\theta}) \quad (۶)$$

۳-۲-۲- تخمین سمت

برای تخمین زاویه سمت، از تلفیق سنسورهای اینرسی (استخراج مولفه فرکانس بالا)، مغناطیس‌سنج و GPS (استخراج مولفه فرکانس پایین) در قالب فیلتر نمودار ۴ استفاده می‌شود.

با توجه به دو منبع سنسوری در دسترس برای تعیین مولفه فرکانس پایین در ساختار پیشنهادی، یک راهبرد سوئیچینگ در انتخاب نوع سنسور طراحی شده است. با توجه به عدم دسترسی به سیگنال GPS در محیط زیرآب، سنسور مغناطیس‌سنج به عنوان مرجع خارجی تخمین زاویه سمت جایگزین GPS خواهد شد. خطای بایاس مغناطیس‌سنج که در مقایسه با ژیروسکوب بسیار کمتر و در دراز مدت تقریبا ثابت است، با عبور از فیلتر پایین‌گذر حذف نمی‌شود، بنابراین زاویه سمت تخمینی از مغناطیس‌سنج نیز همچنان با خطا همراه است. بنابراین در ماموریت رونده زیرآبی بازه‌های زمانی پیش‌بینی شده است که رونده با حرکت به سطح آب و برقراری ارتباط GPS بتواند خطای زاویه سمت را اصلاح نماید [۲].

بنابراین با توجه به مطالب فوق سمت حرکت بطور مستقیم از GPS با نرخ بروزرسانی کند و یا با استفاده از مغناطیس‌سنج با نرخ بروزرسانی سریع‌تر و مبتنی بر رابطه ۹ تخمین زده می‌شود:

$$\psi_L = \begin{cases} \pi - \tan^{-1}(\bar{m}_y / \bar{m}_x) \\ 2\pi - \tan^{-1}(\bar{m}_y / \bar{m}_x) \\ -\tan^{-1}(\bar{m}_y / \bar{m}_x) \\ \pi/2 \\ 3\pi/2 \end{cases} \quad (۹)$$

در رابطه (۹) $\bar{m}_x$ و $\bar{m}_y$ مولفه‌های میدان مغناطیسی در صفحه افقی هستند که از ضرب خروجی مغناطیس‌سنج در ماتریس دوران $C(\varphi,\theta) \square (C_1(\varphi)C_2(\theta))^T$ بدست می‌آیند:

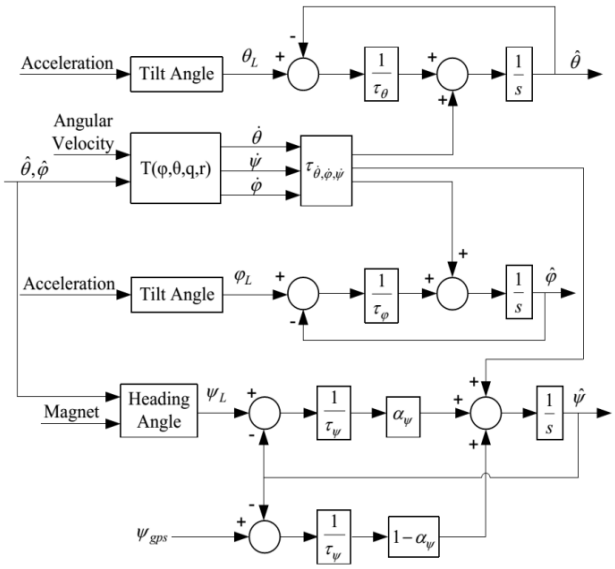
$$\begin{aligned} \bar{m}_x &= m_x\cos(\hat{\theta}) + m_y\sin(\hat{\varphi})\sin(\hat{\theta}) \\ \bar{m}_y &= m_y\cos(\hat{\varphi}) - m_z\sin(\hat{\varphi}) \end{aligned} \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق اگر زاویه فراز و غلتش بطور مستقیم در دسترس نباشد، می‌توان از مقدار تخمینی آنها استفاده نمود. لازم به ذکر است که خروجی مغناطیس‌سنج در محورهای سه‌گانه به روش حداقل مربعات[۱] کالیبره شده است [۱۴و۱۵].

مولفه فرکانس بالای زاویه سمت از خروجی ژایروسکوب مبتنی بر معادلات دینامیک سمت (۱۱) استنتاج می‌شود:

$$\dot{\varphi} = (q\cos(\hat{\varphi}) + r\cos(\hat{\varphi}))/\cos(\hat{\theta}) \quad (۱۱)$$

با توجه به مطالب فوق ساختار سیستم ناوبری مبتنی بر فیلتر تکمیلی و تلفیق چندین سنسور در شکل ۵ ارائه شده است [۶].



شکل ۵- ساختار کلی فیلتر تکمیلی

تخمین دقیق پارامترهای وضعیت با انتخاب مناسب پارامترهای $\tau_\theta, \tau_\psi, \alpha_\psi, \tau_\varphi, \tau_{\dot{\phi},\dot{\theta},\dot{\psi}}$ بدست خواهد آمد. به منظور تعیین پارامترهای طراحی، می‌توان از شتاب دینامیکی به عنوان یک مقیاس استفاده نمود. شتاب دینامیکی از رابطه زیر قابل استخراج است:

$$\alpha = \left|\sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2} - g\right| \quad (۱۲)$$

مقادیر حدی شتاب دینامیکی با در نظر گرفتن مشخصات فنی شتاب‌سنج، ژایرو و الزامات طراحی بصورت تجربی تعیین می‌گردد:

- حالت بدون شتاب ($\alpha < 0.015g$): در این حالت بدلیل مشاهده‌پذیر بودن تاثیر گرانش در اندازه‌گیری‌های شتاب‌سنج، تخمین خوبی از وضعیت بدست می‌آید. بنابراین برای تخصیص وزن بیشتر به شتاب‌سنج، فرکانس قطع کانال غلتش و فراز روی ۰٫۱ رادیان بر ثانیه تنظیم می‌شود.
- حالت شتاب کم ($0.015g < \alpha < 5g$): در این وضعیت عدم قطعیت و خطا باید در تخمین وضعیت لحاظ گردد. بنابراین فرکانس قطع کانال غلتش و فراز باید بترتیب روی ۰٫۰۵ و ۰٫۰۱ رادیان بر ثانیه تنظیم شود.

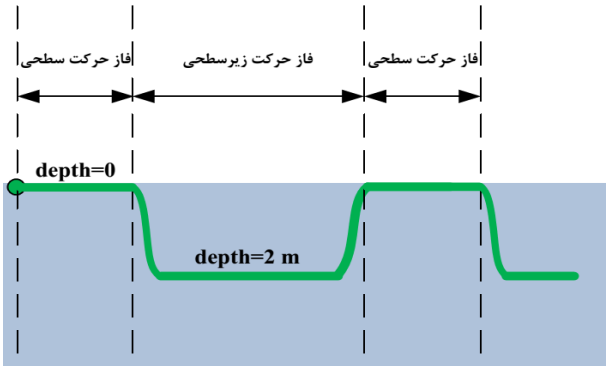
[۱] Least squares

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.1.5.6]
[DOI: 10.29252/joc.13.1.47]

- حالت شتاب بالا $\alpha > 5g$: در این حالت بدلیل دینامیک بالای سیستم، تخمین وضعیت شتاب‌سنجی به هیچ‌وجه دقیق نخواهد بود. با تنظیم فرکانس قطع فیلتر روی صفر، بازخورد شتاب‌سنج خاموش شده و تخمین وضعیت کاملا ژایرویی خواهد بود[۹و۱۶].

۳- پیاده‌سازی و تحلیل نتایج

دستاورد تخمین پیشنهادی روی اطلاعات آزمون میدانی یک AUV شبیه‌سازی شد. سناریوی حرکتی AUV شامل یک بازه زمانی حرکت زیرسطحی برای تلفیق اطلاعات سنسورهای مغناطیس‌سنج و ژیروسکوب برای تعیین سمت حرکت و وضعیت شناور و دو بازه زمانی حرکت سطحی برای استفاده از GPS برای تصحیح سمت حرکت و ژیروسکوب برای تعیین وضعیت است. در نمودار ۶ نمایی از سناریوی حرکتی وسیله ارائه شده است.



شکل ۶- سناریوی حرکتی وسیله زیرآبی

با توجه به فرکانس نمونه‌برداری سنسورها و قرارگیری رونده در دسته دینامیک کم شتاب، بهره‌های کنترلی و فرکانس قطع فیلتر بصورت $\tau_{\dot{\varphi},\dot{\theta},\dot{\psi}} = 0.001$ و $\tau_\theta = \tau_\psi = \alpha_\psi = 0.01, \tau_\varphi = 0.05$ انتخاب شده است. به منظور تصدیق عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصله از فیلتر تکمیلی با وضعیت تخمینی از فیلتر کالمن مقایسه خواهد شد.

در شکل‌های ۷ و ۸ بترتیب تخمین زوایای فراز و غلتش از طریق فیلتر تکمیلی، فیلتر کالمن و سیگنال مرجع فراز و غلتش قابل مشاهده و مقایسه است. با تغییر فاز حرکت از سطح به عمق و تغییرات زاویه فراز، تخمین مناسب فیلتر تکمیلی از زاویه فراز در بزرگنمایی‌های ارائه شده در نمودار ۷ مشاهده می‌گردد. با توجه به نمودار ۷، به دلیل ذات دینامیکی وسیله، سرعت حرکت و عوامل محیطی مانند جریان‌های سطحی و زیرسطحی و تاثیر امواج، نوساناتی حول مقادیر تریم زوایه فراز در دو فاز حرکت سطحی و زیرسطحی مشاهده می‌گردد که فیلتر تکمیلی پیشنهادی با دقت قابل قبولی قادر به تخمین آنها بوده است.

به دلیل طراحی پایدار دینامیکی رونده و عدم استفاده از سطوح کنترلی در کانال غلتش، نوسان ذاتی با دامنه و فرکانس وابسته به سرعت رونده و شرایط محیطی، در زاویه غلتش در نمودار ۸ مشاهده می‌گردد که فیلتر تکمیلی با قابلیت بسیار بالا قادر به تخمین مناسب آن بوده است که در بزرگنمایی ارائه شده بخوبی قابل مشاهده است.

لازم به ذکر است که برای مقایسه عملکرد فیلتر تکمیلی، نتایج تخمینگر وضعیت فیلتر کالمن نیز در نمودارهای ۸ و ۹ برای زوایای فراز و غلتش آورده شده است. شکل ۹ عملکرد فیلتر تلفیقی در تخمین زاویه سمت را نشان می‌دهد. خط تیره زاویه سمت حاصله از GPS، خط نقطه‌چین زاویه سمت تخمینی با فیلتر تکمیلی و خط توپر زاویه سمت حاصل از مغناطیس‌سنج است. هنگامی‌که AUV در فاز حرکت سطحی قرار دارد، با تصدیق برقراری ارتباط گیرنده GPS با ماهواره‌ها، برای حذف بایاس مغناطیس‌سنج، تصحیح تخمین زاویه سمت و قرار دادن رونده در جهت درست، سنسور GPS به عنوان مرجع سیستم ناوبری برگزیده می‌شود که این مسئله در بزرگنمایی‌های شکل ۹ قابل مشاهده است. بوضوح می‌توان مشاهده نمود که پس از قرارگیری رونده در فاز حرکت سطحی، با وجود دو منبع اطلاعاتی دردسترس، سیستم ناوبری GPS را به عنوان مرجع با اولویت بالاتر برای تخمین زاویه سمت در نظر گرفته و به اطلاعات GPS در فیلتر تکمیلی وزن بالاتری اختصاص داده است. با ورود رونده به زیرسطح آب برای اختفای بیشتر، بدلیل قطع بودن GPS، سیستم ناوبری با تکیه بر مغناطیس‌سنج به مسیر خود ادامه می‌دهد که در شکل ۱۰ سوئیچ سیگنال از مرجع GPS به مغناطیس‌سنج بخوبی قابل مشاهده است. با غوص رونده به زیرآب، سیگنال GPS برای مدت زمان معینی در آخرین مقدار دریافتی‌اش از ماهواره ثابت شده و سپس صفر می‌گردد. از این مسئله می‌توان به عنوان معیار سوئیچ بین مغناطیس‌سنج و GPS و انتخاب مرجع تخمین زاویه سمت بهره گرفت. لازم به ذکر است که محور افقی بیانگر مولفه زمان در واحد ثانیه است.

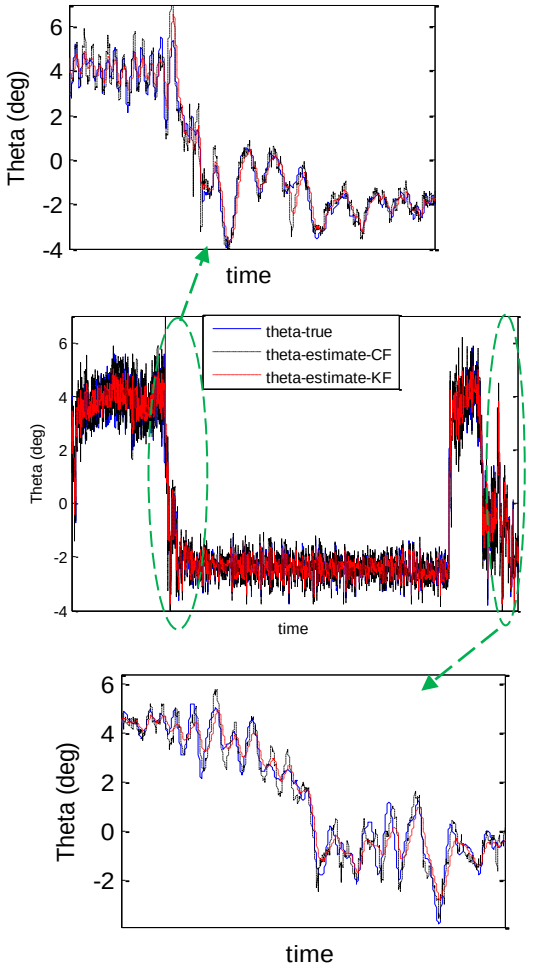
۳- نتیجه‌گیری

با توجه به نمودارهای ارائه شده نتایج حاصل از پیاده‌سازی فیلتر تکمیلی برای تخمین وضعیت AUV، بیانگر کارایی بالای این دستاورد مبتنی بر ترکیب سنسورهای ارزان قیمت و در حضور عوامل مزاحم همچون نویز و بایاس است. ساختار پیشنهادی مبتنی بر مغناطیس‌سنج و GPS برای تعیین سمت، امکان جهت‌یابی در مانور زیرآبی و سطحی را با دقت مناسبی فراهم کرده است. با وجود کالیبراسیون مغناطیس‌سنج در هنگام نصب روی AUV، زاویه سمت حاصله از آن در بازه مانور زیرآبی دارای بایاس است که این مشکل با استفاده از GPS هنگام صعود به سطح جبران خواهد شد.

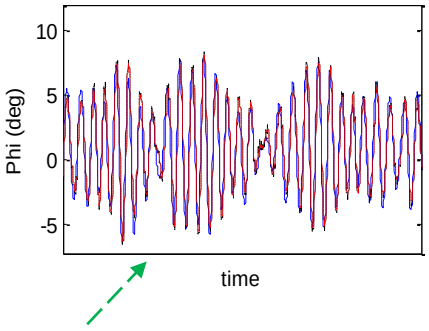
بهره‌های کنترلی ثابت در فیلتر ناوبری تکمیلی دستیابی به عملکرد نیرومند را در محدوده گسترده از شرایط دینامیکی دشوار می‌کند. این مسئله در نتایج حاصل از شبیه‌سازی فیلتر تکمیلی روی اطلاعات میدانی AUV نیز براحتی قابل مشاهده است، آنجاکه AUV با سرعت ثابت در حال طی مسیر است یا حرکت آن شتاب‌دار باشد بخصوص در زمان صعود به سطح یا غوص به زیر آب، فیلتر رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد که عوارض آن بصورت پرش دامنه یا اختلاف فاز در زاویه تخمینی ظهور کرده است. راه غلبه بر این

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.1.5.6]
[DOI: 10.29252/joc.13.1.47]

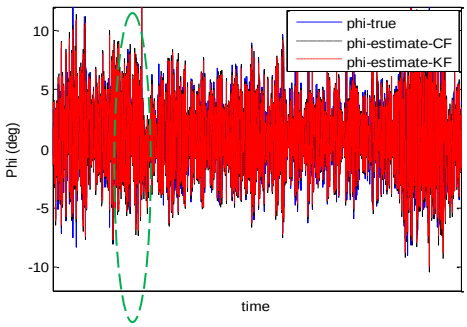
مشکل توسعه الگوریتم تخمین و ارائه تابع تطبیقی مناسب برای بروزرسانی بهره‌های کنترلی تحت شرایط دینامیکی متغیر است. به عبارت دیگر می‌توان برای بهبود نتایج فیلتر، سیستم جدول‌بندی بهره[۱] را با توجه به نوع مانور طراحی و پیاده‌سازی نمود. با این وجود ساختار ساده و پیاده‌سازی آسان، فیلتر تکمیلی را به انتخاب مناسب‌تری برای کاربردهای On-Board با توان محاسباتی پایین در مقایسه با فیلتر کالمن تبدیل کرده است.



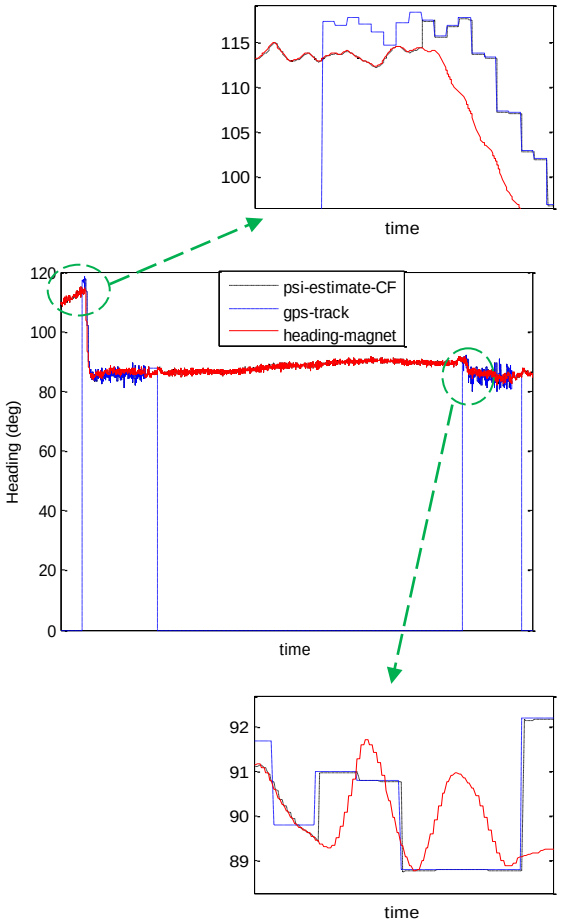
شکل ۷- مقدار واقعی زاویه فراز و تخمین آن با فیلتر تکمیلی و کالمن



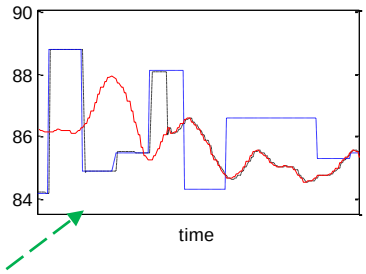
[۱] Gain-Scheduled



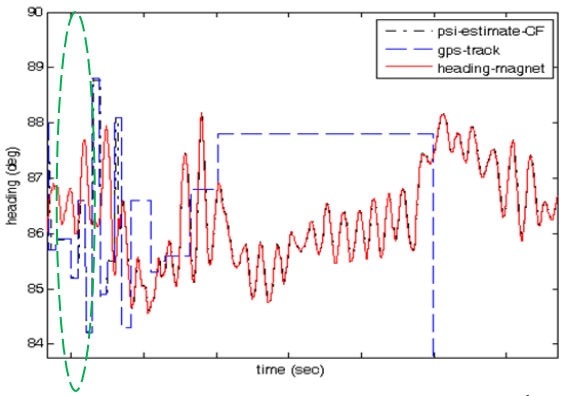
شکل ۸- مقدار واقعی زاویه غلتش و تخمین آن با فیلتر تکمیلی و کالمن



شکل ۹ - تخمین زاویه سمت با فیلتر تکمیلی، سوئیچ از مغناطیس‌سنج به GPS در فاز حرکت سطحی



[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.1.5.6]
[DOI: 10.29252/joc.13.1.47]



شکل ۱۰- تخمین زاویه سمت با سوئیچ از **GPS** به مغناطیس‌سنج در فاز حرکت زیرسطحی

به منظور مقایسه بهتر پارامترهای تخمین نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده و دریافت یک دید تحلیلی-آماری از نتایج شبیه‌سازی فیلتر تخمین با اطلاعات میدانی، مقادیر میانگین خطا و واریانس پارامترهای تخمینی از فیلتر تکمیلی و فیلتر کالمن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- میانگین خطای تخمین و واریانس خطای تخمین فیلتر تکمیلی و فیلتر کالمن

ردیف	پارامتر	میانگین خطای تخمین	واریانس خطای تخمین (σ^2)
۱	زاویه فراز ($theta_{Com}$)	-2.9257×10^{-5}	1.3974×10^{-4}
۲	زاویه غلتش ($roll_{Com}$)	-1.281×10^{-5}	3.7158×10^{-4}
۳	زاویه سمت ($heading_{Com}$)	1.864×10^{-4}	6.3455×10^{-5}
٤	زاویه فراز ($theta_{Kal}$)	-7.7762×10^{-6}	4.2436×10^{-5}
٥	زاویه غلتش ($roll_{Kal}$)	-1.0789×10^{-5}	4.0761×10^{-4}

مراجع

[1] Robert Mahony, Tarek Hamel, Jean-Michel P.flimlin “Complementary filter design on the special orthogonal group SO(3)” Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, Seville, Spain, December 12-15, 2005.

[2] Antonio Vasilijevic, Bruno Borovic, Zoran Vukic “Underwater Vehicle Localization with Complementary Filter: Performance Analysis in the Shallow Water Environment” J Intell Robot Syst (2012) 68:373–386.

[3] Pedro Batista, Carlos Silvestre, and Paulo Oliveira “Sensor-based Complementary Globally Asymptotically Stable Filters for Attitude Estimation” Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference Shanghai, P.R. China, December 16-18, 2009.

[4] G. Perez Paina, D. Gaydou, J. Redolfi, C. Paz, and L. Canali “Experimental comparison of Kalman and complementary filter for attitude estimation” Research Centre in Informatics for Engineering (CIII) National Technological University, Cordoba Regional Faculty (UTN-FRC), 09, August, 2016.

[5] Chan Gook Park, Chang Ho Kang, Sanghyun Hwang and Chul Joo Chung “An Adaptive Complementary Filter for Gyroscope/ Vision Integrated Attitude Estimation” Int’l J. of Aeronautical & Space Sci. 17(2), 214–221 (2016).

[6] Dongwon Jung and Panagiotis Tsiotras “Inertial Attitude and Position Reference System Development for a Small UAV” Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 30332-0150, 2013.

[7] Robert Smith a, b Andy Frostb, Penny Probert “Gyroscopic Data Fusion via a Quaternion Based Complementary Filter” university of Oxford, England. bSilsoe Research Institute, England, 2015.

[8] Mark Euston, Paul Coote, Robert Mahony, Jonghyuk Kim and Tarek Hamel “A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed-Wing UAV” Intelligent Robots and System, IROS 2008, IEEE/RSJ International Conference.

[9] Tae Suk Yoo, Sung Kyung Hong, Hyok Min Yoon and Sungsu Park “Gain-Scheduled Complementary Filter Design for a MEMS Based Attitude and Heading Reference System” Sensors 2011, 11, 3816-3830, 29 March 2011.

[10]Walter T.Higgins, JR “A Comparison of Complementary and Kalman Filtering” IEEE Tranactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. AES-1 1, NO. 3 MAY 1975.

[11] Roberto G. Valenti, Ivan Dryanovski and Jizhong Xiao “Keeping a Good Attitude: A Quaternion-Based Orientation Filter for IMUs and MARGs” Sensors 2015, 15, 19302-19330.

[12] El Hadri and A. Benallegue “Attitude estimation with gyros-bias compensation using low-cost sensors” Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference Shanghai, P.R. China, December 16-18, 2009.

[13] Dung Duong Quoc, Jinwei Sun, Van Nhu Le and Nguyen Ngoc Tan “Sensor Fusion based on Complementary Algorithms using MEMS IMU” International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition Vol. 8, No. 2 (2015), pp. 313-324.

[14] Roberts, Ricky L “Analysis, experimental evaluation, and software upgrade for attitude estimation by the Shallow-Water AUV Navigation System (SANS)” Naval Postgraduate School Monterey, California, March 1997.

[15] Val erie Renaudin, Muhammad Haris Afzal, and G´erard Lachapelle “Complete Tri-axis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain” Hindawi

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.1.5.6]
[DOI: 10.29252/joc.13.1.47]

Publishing Corporation Journal of Sensors, Volume 2010, Article ID 967245, 10 pages.

[16] li xing, yijum hang, zhi xiong, jianye liu and zhong wan, "accurate attitude estimation using ARS under conditions of vehicle movement based on disturbance acceleration adaptive estimation and correction" sensors 2016.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.1.5.6]

[DOI: 10.29252/joc.13.1.47]