طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم ناوبری AHRS/GPS/DR برای رونده‌های زیرسطحی خودگردان با برد بلند و ماندگاری بالا در زیر آب

ابراهیم علیزاده[۱]، حسین نورمحمدی[۲*]، محمدتقی ثابت[۳]، مصطفی زرینی لاریمی[۴]

[۱] دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده‌ی علوم و فناوری دفاعی شمال؛ Ealizadeh@mut.ac.ir
[۲] دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده‌ی علوم و فناوری دفاعی شمال؛ Hnourmohammadi@yahoo.com
[۳] دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده‌ی علوم و فناوری دفاعی شمال؛ Mohammadtaghi.sabet@gmail.com
[۴] کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده‌ی علوم و فناوری دفاعی شمال؛ Zarrini@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۱

کلمات کلیدی:
ناوبری رونده‌ی زیرسطحی خودگردان
تخمین وضعیت
قطع سامانه‌ی GPS
فیلتر تخمین حالت
خطای بلندمدت ناوبری اینرسی

چکیده

یکی از چالش‌های اساسی سامانه‌های ناوبری اینرسی ارزان قیمت، وجود خطاهای اجتناب‌ناپذیر در حسگرهای اینرسیِ نوع میکروالکترومکانیکی است که موجب رشد خطای ناوبری با زمان می‌شود. هدف از این مقاله، طراحی یک الگوریتم ناوبری تلفیقی AHRS/GPS/DR برای بکارگیری در رونده‌های زیرسطحی خودگردان با برد بلند است. مزیت اصلی الگوریتم پیشنهادی این است که با وجود استفاده از حسگرهای اینرسی ارزان‌قیمت، عملکرد مناسبی در مواقع قطع بلندمدت سامانه‌ی GPS دارد. تخمین برخط بایاس ژایرو نقش قابل ملاحظه‌ای در عملکرد الگوریتم حاضر دارد. بر مبنای روش محاسبات مرده با تکیه بر حسگر سرعت محوری الگوریتم کارآمد برای تخمین موقعیت در زمان قطع GPS ارائه می‌شود. ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، با پیاده‌سازی آن در یک رونده‌ی زیرسطحی خودگردان با برد بلند و ماندگاری بالا در زیر آب انجام می‌گیرد. نتایج آزمایشگاهی دلالت بر این دارد که خطای تخمین زاویه‌ی سمت با وجود قطعی ۵۰۰ ثانیه‌ای در داده‌برداری از GPS کمتر از ۵ درجه است.

Design and implementation of AHRS/GPS/DR Navigation algorithm applied to long-range AUVs with high underwater durability

Ebrahim Alizadeh[1], Hossein Nourmohammadi[2*], Mohammad Taghi Sabet[3], Mostafa Zarrini Larimi[4]

[1] Associate Professor, Malek Ashtar University of Technology, Ealizadeh@maut.ac.ir
[2] Ph.D, Malek Ashtar University of Technology, Hnourmohammadi@yahoo.com
[3] Ph.D, Malek Ashtar University of Technology, Mohammadtaghi.sabet@gmail.com
[4] MSc, Malek Ashtar University of Technology, Zarrini@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 15 Jul. 2017
Accepted: 12 Nov. 2017

Keywords:
Long-range AUV navigation
Orientation estimation
GPS outage
State estimation filter
Long-term inertial navigation error

ABSTRACT

One of the main challenges in low-cost inertial navigation systems (INSs) is inevitable errors of MEMS-grade inertial sensors which lead to time-growing navigation error. This paper aims to develop AHRS/GPS/DR integrated navigation algorithm for long-range autonomous underwater vehicle (AUV). Proper performance in deals with long-term GPS outage is the main advantage of the proposed algorithm. Online estimation of gyro biases plays noticeable role in the performance of the presented algorithm. Using Dead Reckoning (DR) method based on an axial speed sensor, an applied algorithm is developed for position estimation during the GPS outages. The algorithm is evaluated by field test executed on a long-range AUV with high underwater durability. Experimental results indicate that in spite of 500 seconds GPS outage, the estimation error in the heading angle does not exceed 5 degrees.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.11.9]

۱- مقدمه

رونده‌های زیرسطحی خودگردان[1] قابلیت‌های فراوانی را برای به انجام رساندن محدوده‌ی وسیع و متنوعی از ماموریت‌های آشکار یا پنهان دارند. از جمله‌ی این ماموریت‌ها می‌توان به عملیات جست‌وجو و بازرسی، نقشه‌برداری و جمع‌آوری اطلاعات اشاره کرد [۱]. با توجه به این ماموریت‌ها این مطلب به وضوح استنباط می‌شود که داشتن ناوبری دقیق یک مسأله‌ی کلیدی و حیاتی در این رونده‌های خودگردان است. ارائه‌ی الگوریتم‌های ناوبری کارآمد برای رونده‌های زیرسطحی کوچک و تحقیقاتی می‌تواند گامی موثر در راستای تحقق این اهداف و انجام ماموریت‌های مورد نظر باشد. در این مقاله بر سامانه‌های ناوبری کم‌هزینه و مناسب برای رونده‌های زیرسطحی خودگردان تحقیقاتی تمرکز می‌شود.

الگوریتم ناوبری سامانه‌ی تعیین سمت و تراز[2] یکی از روش‌های رایج و کارآمد در ناوبری رونده‌های زیرسطحی است. نکته‌ی حائز اهمیت این است که در صورت استفاده از حسگرهای اینرسی MEMS، دقت تخمین زوایای تراز و سمت از شمال به شدت تحت تاثیر بایاس و دریفت موجود در این حسگرها قرار می‌گیرد [۲ و ۳]. در چنین شرایطی لازم است که الگوریتم AHRS با یک سامانه‌ی کمک-ناوبری مناسب نظیر سامانه‌ی موقعیت‌یاب جهانی[3]، شمال‌یاب مغناطیسی و غیره تلفیق شود. در ادامه، به مروری بر فعالیت‌های پیشین انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود.

مارینز و همکارانش به ارائه‌ی یک الگوریتم ناوبری AHRS بر مبنای دینامیک کواترنیون پرداختند و در آن از فیلتر کالمن تعمیم یافته[4] به عنوان فیلتر تخمین‌زن استفاده نمودند [۴]. لازم به ذکر است که مزیت اصلی استفاده از دینامیک کواترنیون، خطی بودن مدل دینامیکی سیستم است. البته مدل اندازه‌گیری سیستم همچنان غیرخطی است [۵]. در مرجع [۶] به ارائه‌ی یک فیلتر تخمین‌زن کالمن تطبیقی در سامانه‌ی ناوبری AHRS پرداخته شده است. منطق اصلی بکار گرفته شده در این فیلترها، تنظیم تطبیقی ماتریس کواریانس نویزِ اندازه‌گیری در فیلتر کالمن بر اساس شرایط دینامیکی و مانورهای مختلف بوده است. در مرجع [۷] نیز برای تنظیم ماتریس‌های کواریانس فیلتر از الگوریتم فازی استفاده شده است. چالش اصلی این الگوریتم‌ها، امکان پیاده‌سازی بلادرنگ است. همتی و معصوم‌نیا الگوریتمی برای شمال‌یابی ژایرویی تحلیلی[5] با کاربری دریایی ارائه کردند، که در دسته‌ی الگوریتم‌های شمال‌یابی اینرسی قرار می‌گیرد [۸]. لی و همکارانش نیز بر پایه‌ی استفاده از فیلتر دیجیتالی پایین-گذر[6] الگوریتم جدیدی برای شمال‌یابی تحلیلی ارائه کردند که برای ناوبری کشتی‌ها و ناوهای دریایی مورد توجه قرار گرفته است [۹]. در مراجع [۱۰ و ۱۱] استفاده از شمال‌یاب مغناطیسی به عنوان یک روش ناوبری ارزان قیمت برای تعیین وضعیت سامانه‌ی مورد ناوبری مطرح شده است. با استفاده از شمال‌یاب مغناطیسی می‌توان زاویه‌ی سمت از شمال را با دقت چند میلی‌رادیان تعیین نمود. اما، این دقت به شدت تحت تاثیر تداخل‌های الکترومغناطیسی قرار دارد. به عنوان مثال مجاورت سامانه‌ی مورد ناوبری با یک بدنه‌ی فلزی، دقت تخمین زاویه‌ی سمت را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین چالش اصلی این الگوریتم‌ها، میزان قوام آنها در نواحی و شرایط مختلف است. در مرجع [۱۲] یک تخمین‌زن مقاوم بر اساس مشاهده‌گر مود لغزشی برای سامانه‌ی ناوبری AHRS ارائه شده است. با استفاده از فیلتر فازی مقاوم $H\infty$ نیز، یک الگوریتم تخمین‌زن مقاوم برای سامانه‌ی AHRS در [۱۳] طراحی شده است. در مرجع [۱۴] از فیلتر کالمن مکعبی فاکتوریزه شده برای بهبود عملکرد و دقت در سامانه‌ی ناوبری اینرسی تلفیقی استفاده شده است. در زمینه‌ی ترکیب فیلتر تخمین‌زن کالمن با روش‌های هوشمند به ویژه روش‌های فازی و شبکه عصبی نیز فعالیت‌هایی انجام شده است که از جمله‌ی آنها می‌توان به [۱۵] اشاره کرد. چالش اصلی روش‌ها و الگوریتم‌های هوشمند، پیاده‌سازی آنها برای کاربردهای عملی است که بسیار دشوار و پیچیده خواهد بود.

یک مساله‌ی کلیدی و بنیادی در طراحی الگوریتم ناوبری این است که قبل از هر چیزی ابتدا باید به این نکته توجه شود که الگوریتم ناوبریِ مورد نظر قرار است در چه سامانه‌ای و تحت چه شرایطی مورد استفاده قرار گیرد. دقت ناوبری، هزینه‌ی ناوبری و مانورهای حرکتی موجود در سامانه‌ی مورد ناوبری از مهم‌ترین عوامل موجود در انتخاب یک الگوریتم ناوبری مناسب هستند. دستاورد اصلی این تحقیق، طراحی یک الگوریتم ناوبری مناسب برای سامانه‌های کم‌هزینه است، که قابلیت بکارگیری در رونده‌های زیرسطحی خودگردان با برد بلند را داشته باشد. الگوریتم ناوبری پیشنهادی در این مقاله، متشکل از یک سامانه‌ی AHRS تلفیق شده با دو سامانه‌ی کمک-ناوبری شامل سامانه‌ی GPS و سرعت‌سنج محوری است. انتخاب سامانه‌های کمک-ناوبری متناسب با نوع کاربریِ مورد نظر و شرایط کارکردیِ موجود صورت گرفته است. به این صورت که در زمان‌های حرکت بدنه روی سطح از سامانه‌ی GPS به عنوان سامانه‌ی کمک-ناوبری استفاده شده و در زمان‌های حرکت بدنه در زیر سطح از سرعت بدنه صرفاً در راستای محوری به عنوان اندازه‌گیریِ کمک-ناوبری استفاده می‌شود. هدف اصلی این بوده است که یک الگوریتم ناوبری بهینه از لحاظ دقت و هزینه ارائه شود. قطع طولانی مدت سامانه‌ی GPS و تاثیر آن بر دقت و عملکرد ناوبری از مسائل مهمی مورد بحث در این تحقیق است. عملکرد و دقت الگوریتم ناوبری پیشنهادی در این مقاله با اجرای تست‌های میدانی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برتری اصلی الگوریتم پیشنهادی، عملکرد مطلوب آن در قطع بلند مدت GPS با وجود استفاده از حسگرهای ارزان‌قیمت MEMS است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.11.9]

۲- معرفی بدنه‌ی AUV

در این بخش به معرفی بدنه‌ی زیرسطحی خودگردان استفاده شده در این تحقیق برای اجرای تست‌های میدانی پرداخته می‌شود. بدنه‌ی AUV موردنظر، یک بدنه‌ی شبه استوانه‌ای مطابق شکل ۱ است که نسبت طول به قطر آن برابر با $L/D = 11$ بوده و دارای ضریب حجمی $4V/\pi D^2 L = 0.8$ است.



شکل ۱- نمایی از بدنه‌ی رونده‌ی زیرسطحی خودگردان

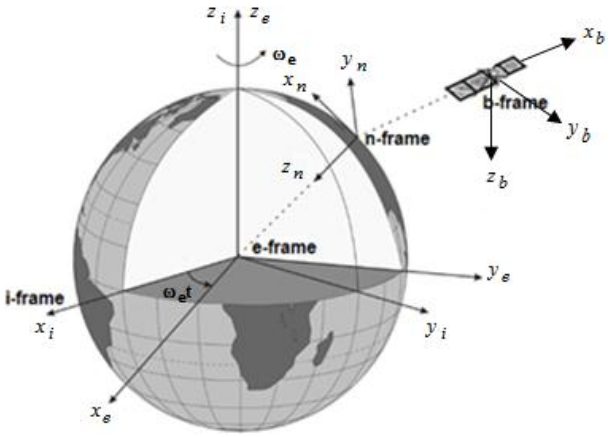
این بدنه از دو جفت سطوح کنترلی در دو صفحه‌ی x-y و x-z تشکیل شده است که به ترتیب در کنترل زاویه‌ی فراز و سمت بدنه نقش ایفا می‌کنند. کنترل عمق بدنه نیز به واسطه‌ی سطوح کنترل صفحه‌ی x-y انجام می‌گیرد. برای حرکت بدنه از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر، با توجه به کنترل زوایای سمت و فراز بدنه و همچنین برای محدود ماندن خطای ناوبری، لازم است بدنه در فواصل زمانی مشخص در سطح حضور یابد و دسترسی به سامانه‌ی GPS برقرار شود. با بکارگیری فیلتر تخمین‌زن مناسب و استفاده از خروجی سامانه‌ی GPS به عنوان متغیر اندازه‌گیری به تصحیح موقعیت و خطای ناوبری پرداخته می‌شود. کنترل حرکت بدنه در سطح با استفاده از کنترل زاویه‌ی پیچ و در زیر سطح با استفاده از کنترل عمق صورت می‌گیرد. ناوبری بدنه در فازهای سطحی و زیرسطحی باید قادر به تعیین موقعیت و وضعیت بدنه به نحوی باشد که حداکثر درصد پیمایش ممکن در زیر سطح فراهم شود. در هنگام حرکت بدنه در سطح، نه تنها محاسبات ناوبری موقعیت و وضعیت تصحیح می‌شوند، بلکه بایاس ژایرو نیز برای ارائه‌ی ناوبری بهتر از بدنه در زیر سطح تخمین زده می‌شود.

مدت‌زمان حضور در سطح و زیر سطح نسبت به زمان پیمایش کل مسیر، یک پارامتر مهم برای افزایش کارآمدی یک AUV است. استفاده از ناوبری دقیق‌تر بدنه، در عین حال با توجه به بکارگیری حسگرهای ارزان قیمت و الگوریتم‌های کارآمد، منجر به درصد خطای ناوبری حداقل و درصد حضور در زیر سطح حداکثر می‌شود.

۳- معادلات دینامیکی تعیین وضعیت

سه روش اصلی برای تعیین وضعیت (زوایای تراز و سمت از شمال) یک سامانه شامل روش زوایای اویلر، روش کواترنیون و روش ماتریس کسینوسی سمت است. اگرچه به لحاظ دقت نتایج تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای در خروجی هر یک از این سه روش وجود ندارد، اما یک سری مزایا و معایب نسبی برای استفاده از هر کدام وجود دارد. معادلات دینامیکی سیستم در روش زوایای اویلر غیرخطی است، در حالی که در روش‌های کواترنیون و ماتریس کسینوسی سمت، این معادلات خطی هستند. از طرف دیگر، حجم محاسبات در روش زوایای اویلر نسبت به روش‌های کواترنیون و ماتریس کسینوسی سمت کمتر است. نکته‌ی دیگر این است که در روش زوایای اویلر در شرایطی که زاویه‌ی فراز برابر با ۹۰+ یا ۹۰- درجه باشد، تکینگی ریاضی به وجود می‌آید. البته در ناوبری سامانه‌ی مورد نظر که یک سامانه‌ی زیرسطحی AUV است، چنین شرایطی به وجود نخواهد آمد. در این مقاله، با توجه به این مزایا و معایب و همچنین شرایط دینامیکی موجود در حرکت سامانه‌ی مورد نظر، از روش زوایای اویلر استفاده می‌شود.

در شکل ۲ دستگاه‌های مختصات اصلی در ناوبری اینرسی نشان داده شده‌اند، که شامل دستگاه اینرسی، دستگاه زمینی، دستگاه ناوبری و دستگاه بدنه هستند [۱۶].



شکل ۲- دستگاه‌های مختصات مختلف در ناوبری اینرسی [۱۶]

خروجی حسگرهای اینرسی شامل شتاب‌سنج‌ها و ژایروها در دستگاه بدنه بوده و معادلات ناوبری در دستگاه ناوبری بیان می‌شوند. دستگاه ناوبری در واقع دستگاه جغرافیایی محلی است که محورهای آن در سه راستای شمال، شرق و عمود محلی به سمت پایین تعریف می‌شوند. مبدا دستگاه ناوبری در مرکز سامانه‌ی مورد ناوبری در نظر گرفته می‌شود.

فلسفه‌ی اصلی روش زوایای اویلر این است که انتقال از یک دستگاه مختصات به دستگاه دیگر (به عنوان مثال از دستگاه بدنه به دستگاه ناوبری) از طریق سه دوران قابل بیان است که زوایای اویلر نامیده می‌شوند. ترتیب‌های مختلفی برای این سه دوران وجود دارد. در این مقاله از ترتیب دوران اول حول محور z با زاویه‌ی ψ، دوران دوم حول محور y با زاویه‌ی θ و دوران سوم حول محور x با زاویه‌ی φ استفاده می‌شود. مولفه‌های بردار سرعت زاویه‌ای دستگاه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.11.9]

بدنه نسبت به دستگاه ناوبری $\boldsymbol{\omega}_{nb}^{b}=\begin{bmatrix}\omega_x & \omega_y & \omega_z\end{bmatrix}^T$ به صورت رابطه‌ی (۱) بر حسب نرخ تغییرات زوایای اویلر بیان می‌شوند.

$$\begin{bmatrix}\omega_x\\ \omega_y\\ \omega_z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{\varphi}\\ 0\\ 0\end{bmatrix}+\boldsymbol{C}_{\varphi}\begin{bmatrix}0\\ \dot{\theta}\\ 0\end{bmatrix}+\boldsymbol{C}_{\varphi}\boldsymbol{C}_{\theta}\begin{bmatrix}0\\ 0\\ \dot{\psi}\end{bmatrix} \quad (۱)$$

ماتریس‌های $\boldsymbol{C}_{\varphi}$ و $\boldsymbol{C}_{\theta}$، به ترتیب ماتریس‌های دوران حول محورهای x و y هستند که در روابط (۲) و (۳) بیان شده‌اند.

$$\boldsymbol{C}_{\varphi}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi\\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi\end{bmatrix} \quad (۲)$$

$$\boldsymbol{C}_{\theta}=\begin{bmatrix}\cos\theta & 0 & -\sin\theta\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\theta & 0 & \cos\theta\end{bmatrix} \quad (۳)$$

با استفاده از روابط (۳)-(۱)، نرخ تغییرات زوایای اویلر به صورت زیر قابل استخراج است.

$$\begin{aligned}\dot{\varphi}&=\left(\omega_y\sin\varphi+\omega_z\cos\varphi\right)\tan\theta+\omega_x\\ \dot{\theta}&=\omega_y\cos\varphi-\omega_z\sin\varphi\\ \dot{\psi}&=\left(\omega_y\sin\varphi+\omega_z\cos\varphi\right)\sec\theta\end{aligned} \quad (۴)$$

که مقادیر ω_x، ω_y و ω_z به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\begin{bmatrix}\omega_x & \omega_y & \omega_z\end{bmatrix}^T=\boldsymbol{\omega}_{nb}^{b}=\boldsymbol{\omega}_{ib}^{b}-\boldsymbol{C}_{n}^{b}\left[\boldsymbol{\omega}_{ie}^{n}+\boldsymbol{\omega}_{en}^{n}\right] \quad (۵)$$

در رابطه‌ی (۵)، بردار $\boldsymbol{\omega}_{ib}^{b}$ بردار سرعت زاویه‌ای اندازه‌گیری شده توسط ژایرو در سه محور است. ماتریس $\boldsymbol{C}_{n}^{b}$ ماتریس انتقال از دستگاه ناوبری به دستگاه بدنه می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷].

$$\boldsymbol{C}_{n}^{b}=\begin{bmatrix}C\theta C\psi & C\theta S\psi & -S\theta\\ -C\varphi S\psi+S\varphi S\theta C\psi & C\varphi C\psi+S\varphi S\theta S\psi & S\varphi C\theta\\ S\varphi S\psi+C\varphi S\theta C\psi & -S\varphi C\psi+C\varphi S\theta S\psi & C\varphi C\theta\end{bmatrix} \quad (۶)$$

در رابطه‌ی فوق، C و S به ترتیب بیانگر توابع سینوس و کسینوس هستند. بردار $\boldsymbol{\omega}_{ie}^{n}$ بردار سرعت زاویه‌ای دستگاه زمینی نسبت به دستگاه اینرسی است که در دستگاه ناوبری به صورت زیر تصویر می‌شود.

$$\boldsymbol{\omega}_{ie}^{n}=\begin{bmatrix}\omega_e\cos L & 0 & -\omega_e\sin L\end{bmatrix}^T \quad (۷)$$

که ω_e بیانگر نرخ دوران زمین است. همچنین، بردار $\boldsymbol{\omega}_{en}^{n}$، بردار سرعت زاویه‌ای دستگاه ناوبری نسبت به دستگاه زمینی است که در دستگاه ناوبری به صورت رابطه‌ی (۸) بیان می‌شود.

$$\boldsymbol{\omega}_{en}^{n}=\begin{bmatrix}\dot{l}\cos L & -\dot{L} & -\dot{l}\sin L\end{bmatrix}^T \quad (۸)$$

که L و l به ترتیب بیانگر عرض جغرافیایی و طول جغرافیایی بوده و معادلات دینامیکی آنها به صورت زیر قابل بیان است.

$$\begin{aligned}\dot{L}&=\frac{v_N}{R_N+h}\\ \dot{l}&=\frac{v_E}{(R_E+h)\cos L}\end{aligned} \quad (۹)$$

که در رابطه‌ی (۹)، h ارتفاع محلی بوده و v_N، v_E به ترتیب مولفه‌های سرعت سامانه‌ی مورد ناوبری در امتدادهای شمال و شرق هستند. همچنین R_N و R_E به ترتیب شعاع انحنای نصف النهاری[۷] و شعاع انحنای عرضی[۸] هستند [۱۷]. با توجه به مقادیر ناچیز $\boldsymbol{\omega}_{ie}^{n}$ و $\boldsymbol{\omega}_{en}^{n}$ در مقایسه با $\boldsymbol{\omega}_{ib}^{b}$ می‌توان از این عبارت‌ها در رابطه‌ی (۵) صرف نظر نمود. بنابراین، برای مقادیر ω_x، ω_y و ω_z در رابطه‌ی (۴) می‌توان از خروجی ژایرو در سه محور استفاده نمود. از حل معادلات دینامیکی (۴)، زوایای اویلر در هر لحظه محاسبه شده و وضعیت سامانه‌ی مورد ناوبری تعیین می‌شود.

۴- الگوریتم ناوبری تلفیقی AHRS/GPS/DR

الگوریتم AHRS، یکی از کاربردی‌ترین روش‌های تخمین وضعیت یک سامانه یعنی زوایای تراز و سمت از شمال است. ویژگی اصلی الگوریتم ناوبری AHRS، استفاده از داده‌های حسگرهای شتاب‌سنج به عنوان متغیرهای اندازه‌گیری در فیلتر تخمین‌زن است. در حالت کلی، در الگوریتم ناوبری AHRS ابتدا با بکارگیری روابط مربوط به سینماتیک وضعیت یک جسم صلب در فضا و استفاده از داده‌های حسگرهای ژایرو، تخمین اولیه‌ی زوایای تراز و سمت از شمال یا به عبارت دیگر زوایای غلت، فراز و سمت بدست خواهد آمد. با توجه به خطاهای اجتناب ناپذیر موجود در حسگرهای اینرسی و همچنین رشد خطا به دلیل وجود محاسبات انتگرالی، تخمین اولیه‌ی زوایای تراز و سمت از شمال در بلندمدت با خطای زیادی همراه خواهد بود. بنابراین لازم است با طراحی فیلتر تخمین‌زن مناسب، خروجی الگوریتم AHRS با سامانه‌ی کمک-ناوبری مناسب تلفیق شده و این خطاها تا حد امکان جبران شود. در این مقاله، از سامانه‌ی GPS به عنوان سامانه‌ی کمک-ناوبری استفاده می‌شود و تلفیق آن با خروجی الگوریتم AHRS از طریق فیلتر تخمین‌زن کالمن صورت می‌گیرد. در واقع، از زاویه‌ی سمت از شمال بدست آمده از سامانه‌ی GPS به عنوان متغیر اندازه‌گیری در فیلتر تخمین‌زن استفاده می‌شود.

۴-۱- فیلتر تخمین حالت

مزیت اصلی الگوریتم پیشنهادی، تخمین برخط بایاس موجود در ژایروها در حین پروسه‌ی تخمین وضعیت است. علاوه بر سه زاویه‌ی غلت، فراز و سمت در بردار حالت سیستم از سه متغیر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.11.9]

اضافی که بیانگر مولفه‌های بایاس ژایرو در سه محور هستند، استفاده می‌شود. در رابطه‌ی (۴)، معادلات دینامیکی تعیین وضعیت به روش زوایای اویلر ارائه شده است. با در نظر گرفتن بایاس برای هر یک از ژایروهای بکار رفته در سه محور x، y و z این معادلات به صورت رابطه‌ی (۱۰) تغییر می‌یابند.

$$\begin{aligned}\dot{\varphi} &= \left((\omega_y - B_{\omega y})\sin\varphi + (\omega_z - B_{\omega z})\cos\varphi\right)\tan\theta + (\omega_x - B_{\omega x}) \\ \dot{\theta} &= (\omega_y - B_{\omega y})\cos\varphi - (\omega_z - B_{\omega z})\sin\varphi \\ \dot{\psi} &= \left((\omega_y - B_{\omega y})\sin\varphi + (\omega_z - B_{\omega z})\cos\varphi\right)\sec\theta\end{aligned} \qquad (۱۰)$$

که در رابطه‌ی (۱۰)، $B_{\omega x}$، $B_{\omega y}$ و $B_{\omega z}$ به ترتیب بیانگر بایاس‌های موجود در خروجی ژایروهای ω_x، ω_y و ω_z هستند. برای هر یک از بایاس‌ها، دینامیک صفر در نظر گرفته می‌شود و این انتخاب با توجه به نرخ پایین تغییرات بایاس بعد از همگرایی به مقدار درست است.

$$\begin{aligned}\dot{B}_{\omega x} &= 0 \\ \dot{B}_{\omega y} &= 0 \\ \dot{B}_{\omega z} &= 0\end{aligned} \qquad (۱۱)$$

ذکر این نکته ضروری است که انتخاب مدل دینامیکی مناسب برای بایاس ژایرو که باید در تطابق با ماهیت فیزیکی/ریاضی و مدل تغییرات آن باشد، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در تخمین درست بایاس و متعاقب آن در عملکرد کلی سامانه‌ی ناوبری پیشنهادی در تخمین وضعیت خواهد داشت.

بدین ترتیب، مدل دینامیکی سیستم در الگوریتم پیشنهادی به فرم کلی زیر قابل بیان است.

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},t) + \boldsymbol{w}(t) \qquad (۱۲)$$

که $\boldsymbol{w}(t)$ بردار نویز سیستم بوده و فرض می‌شود که نویز سفید، ناهمبسته و با میانگین صفر باشد. $\boldsymbol{x}$ و $\boldsymbol{u}$ به ترتیب بردار حالت و بردار ورودی سیستم هستند و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\boldsymbol{x} = \left[\varphi \;\; \theta \;\; \psi \;\; B_{\omega x} \;\; B_{\omega y} \;\; B_{\omega z}\right]^T \qquad (۱۳)$$

$$\boldsymbol{u} = \left[\omega_x \;\; \omega_y \;\; \omega_z\right]^T \qquad (۱۴)$$

با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱)، تابع برداری $\boldsymbol{f}$ به صورت رابطه‌ی (۱۵) بیان می‌شود.

$$\boldsymbol{f} = \begin{bmatrix} \left((u_2 - x_5)\sin x_1 + (u_3 - x_6)\cos x_1\right)\tan x_2 + u_1 - x_4 \\ (u_2 - x_5)\cos x_1 - (u_3 - x_6)\sin x_1 \\ \left((u_2 - x_5)\sin x_1 + (u_3 - x_6)\cos x_1\right)\sec x_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (۱۵)$$

مدل دینامیکی (۱۲) را می‌توان به فرم خطی زیر نوشت.

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\,\boldsymbol{x} + \boldsymbol{w}(t) \qquad (۱۶)$$

که در آن ماتریس ژاکوبین $\boldsymbol{A}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\boldsymbol{A} = \frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{x}} \qquad (۱۷)$$

به عنوان نمونه، سطر اول ماتریس ژاکوبین $\boldsymbol{A}$ به صورت زیر استخراج می‌شود.

$$\boldsymbol{A}_{1,1} = \left((u_2 - x_5)\cos x_1 - (u_3 - x_6)\sin x_1\right)\tan x_2 \qquad (۱۸)$$

$$\boldsymbol{A}_{1,2} = \left((u_2 - x_5)\sin x_1 + (u_3 - x_6)\cos x_1\right)(1 + \tan^2 x_2) \qquad (۱۹)$$

$$\boldsymbol{A}_{1,3} = 0 \qquad (۲۰)$$

$$\boldsymbol{A}_{1,4} = -1 \qquad (۲۱)$$

$$\boldsymbol{A}_{1,5} = -\sin x_1 \tan x_2 \qquad (۲۲)$$

$$\boldsymbol{A}_{1,6} = -\cos x_1 \tan x_2 \qquad (۲۳)$$

با توجه به اینکه، عموماً زمان نمونه‌برداری در حسگرهای اینرسی به اندازه‌ی کافی کوچک است، می‌توان از فرم گسسته-زمان معادل با رابطه‌ی (۱۶) استفاده نمود.

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{\Phi}_k\,\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{w}_k \qquad (۲۴)$$

که $\boldsymbol{\Phi}_k$ بیانگر ماتریس انتقال حالت است و به صورت زیر تقریب زده می‌شود.

$$\boldsymbol{\Phi}_k = \left(\boldsymbol{I} + \boldsymbol{A}_k\right)\Delta t \qquad (۲۵)$$

و Δt بیانگر زمان نمونه‌برداری است.

در ادامه، به تشریح معادلات اندازه‌گیری پرداخته می‌شود. بردار اندازه‌گیری شامل سه متغیر است که دو متغیر اول مربوط به زوایای غلت و فراز بدست آمده از شتاب‌سنج‌ها بوده و متغیر سوم از زاویه‌ی سمت GPS (در صورت دسترسی به سامانه‌ی GPS) تامین می‌شود. این متغیرها به ترتیب با φ_{acc}، θ_{acc} و ψ_G مشخص می‌شوند. زوایای φ_{acc} و θ_{acc} که زوایای تراز جاذبه‌ای نامیده می‌شوند، از طریق معادل‌سازی خروجی شتاب‌سنج‌ها با شتاب جاذبه محاسبه می‌شوند.

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}^b = \boldsymbol{C}_n^{\,b} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}^n \qquad (۲۶)$$

که a_x، a_y و a_z شتاب‌های اندازه‌گیری شده توسط شتاب‌سنج‌ها در دستگاه بدنه بوده و g بیانگر شتاب جاذبه است و ماتریس $\boldsymbol{C}_n^{\,b}$ در رابطه‌ی (۶) تعریف شده است. در نهایت با استفاده از روابط (۶) و (۲۶)، زوایای تراز جاذبه‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.11.9]

$$\varphi_{acc} = \tan^{-1}\left(\frac{-a_y}{-a_z}\right)$$
$$\theta_{acc} = \sin^{-1}\left(\frac{a_x}{g}\right) \quad (۲۷)$$

توجه شود که رابطه‌ی (۲۷) با فرض ناچیز بودن شتاب‌های غیرجاذبه‌ای است. بدین ترتیب، بردار اندازه‌گیری فیلتر تخمین‌زن در الگوریتم پیشنهادی AHRS/GPS به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} \varphi_{acc} \\ \theta_{acc} \\ \psi_G \end{bmatrix} \quad (۲۸)$$

معادله‌ی اندازه‌گیری سیستم به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\boldsymbol{y}_k = \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{v}_k \quad (۲۹)$$

که $\boldsymbol{v}_k$ بیانگر نویز اندازه‌گیری بوده که فرض می‌شود نویز سفید، ناهمبسته و با میانگین صفر باشد. همچنین، ماتریس اندازه‌گیری $\boldsymbol{H}$ به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{3,3} & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & 0_{3,3} \end{bmatrix} \quad (۳۰)$$

بدین ترتیب، مدل دینامیکی سیستم (رابطه‌ی (۲۴)) و مدل اندازه‌گیری (رابطه‌ی (۲۹)) در فضای گسسته-زمان برای الگوریتم تلفیقی AHRS/GPS ارائه می‌شود. در ادامه، به پیاده‌سازی فیلتر تخمین‌زن کالمن در الگوریتم پیشنهادی پرداخته می‌شود. تخمین حالت در فیلتر کالمن در دو مرحله‌ی بروز رسانی زمانی[۹] و بروز رسانی اندازه‌گیری[۱۰] انجام می‌گیرد [۱۸]. در مرحله‌ی بروز رسانی زمانی، مقادیر پیش‌بینیِ ماتریس کواریانس خطای سیستم و همچنین بردار حالت سیستم محاسبه می‌شوند.

$$\boldsymbol{P}_k^- = \boldsymbol{\Phi}_{k-1}\boldsymbol{P}_{k-1}\boldsymbol{\Phi}_{k-1}^T + \boldsymbol{Q}_{k-1} \quad (۳۱)$$
$$\hat{\boldsymbol{x}}_k^- = \boldsymbol{\Phi}_{k-1}\boldsymbol{x}_{k-1} \quad (۳۲)$$

که $\boldsymbol{P}_k^-$ و $\hat{\boldsymbol{x}}_k^-$ به ترتیب مقادیر پیش‌بینیِ ماتریس کواریانس خطای تخمین و بردار حالت سیستم هستند. همچنین، $\boldsymbol{Q}$ بیانگر ماتریس کواریانس نویز مدل دینامیکی سیستم است. نکته‌ی حائز اهمیت این است که بهتر است در محاسبه‌ی مقدار پیش‌بینیِ بردار حالت از همان مدل غیرخطی رابطه‌ی (۱۲) استفاده شود. در واقع، به جای رابطه‌ی (۳۲) از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود.

$$\hat{\boldsymbol{x}}_k^- = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_{k-1}, \boldsymbol{u}_{k-1})\Delta t + \boldsymbol{x}_{k-1} \quad (۳۳)$$

در صورت استفاده از رابطه‌ی (۳۳)، خطاهای ناشی از خطی‌سازی مدل دینامیکی در محاسبه‌ی مقدار پیش‌بینیِ بردار حالت حذف می‌شود.

در مرحله‌ی بروز رسانی اندازه‌گیری نیز، ماتریس بهره‌ی کالمن محاسبه شده و سپس ماتریس کواریانس خطا و بردار حالت سیستم بروز رسانی می‌شوند.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{K}_k &= \boldsymbol{P}_k^T \boldsymbol{H}_k^T \left(\boldsymbol{H}_k \boldsymbol{P}_k^- \boldsymbol{H}_k^T + \boldsymbol{R}_k\right)^{-1} \\ \hat{\boldsymbol{x}}_k &= \hat{\boldsymbol{x}}_k^- + \boldsymbol{K}_k\left(\mathbf{z}_k - \boldsymbol{H}_k \hat{\boldsymbol{x}}_k^-\right) \\ \boldsymbol{P}_k &= \left(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{H}_k\right)\boldsymbol{P}_k^- \end{aligned} \quad (۳۴)$$

که $\boldsymbol{R}$ و $\boldsymbol{K}$ به ترتیب ماتریس کواریانس نویز اندازه‌گیری و ماتریس بهره‌ی کالمن هستند. ماتریس کواریانس $\mathbf{P}$ با توجه به دقت تعیین شرایط اولیه مقداردهی اولیه می‌شود. در صورتی که دقت تعیین شرایط اولیه بالا باشد، مقدار اولیه‌ی ماتریس $\mathbf{P}$، مقدار کوچکی (نزدیک به صفر) در نظر گرفته می‌شود و در غیر این صورت برای مقداردهی اولیه‌ی ماتریس $\mathbf{P}$ از مقادیر بزرگتری استفاده می‌شود. عموماً، برای مقداردهی اولیه‌ی ماتریس $\mathbf{P}$، از یک ماتریس قطری استفاده می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که تنظیم دقیق ماتریس‌های کواریانس نویز فرآیند و اندازه‌گیری، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در عملکرد فیلتر کالمن خواهد داشت. البته، عملکرد این فیلترها در شرایط واقعی اندکی ضعیف‌تر از عملکردی است که از بسط تئوری آنها انتظار می‌رود. وقتی ماتریس کواریانس تولید شده در فیلتر کالمن مشخصه‌ی منطقی از خطای تخمین را منعکس نکند، واگرایی تخمین رخ می‌دهد.

بدین ترتیب زوایای غلت، فراز و سمت تخمین زده می‌شوند. مزیت اصلی استفاده از زوایای تراز جاذبه‌ای به عنوان متغیرهای اندازه‌گیری در فیلتر پیشنهادی این است که از رشد خطای تخمین وضعیت با زمان جلوگیری می‌شود. در صورت عدم استفاده از این متغیرهای اندازه‌گیری، خطای محاسبه‌ی وضعیت به شدت با زمان افزایش می‌یابد و آن، ناشی از خطای موجود در ژایروی ارزان قیمت MEMS و همچنین خطای تجمعی انتگرال‌گیری است. در فیلتر پیشنهادی علاوه بر تخمین وضعیت، مولفه‌های بایاس ژایرو نیز تخمین زده می‌شوند و به صورت برخط از نرخ‌های زاویه‌ای اندازه‌گیری شده توسط ژایرو حذف می‌شوند.

۴-۲- قطع داده‌برداری GPS

یکی از مسائل بسیار مهم در الگوریتم ناوبری تلفیقی AHRS/GPS تخمین زاویه‌ی سمت در زمان قطع داده‌برداری GPS است. مطلب کلیدی در این مساله توجه به این نکته است که در زمان قطع GPS روند تخمین بایاس ژایروی سمت باید به چه صورتی تغییر داده شود. بدیهی است در صورتی که در زمان‌های قطع GPS نیز بایاس ژایروی سمت مطابق گذشته تخمین زده شود، منجر به خطای زیادی در تخمین زاویه‌ی سمت خواهد شد. چرا که در این

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.11.9]

زمان‌ها اندازه‌گیری معتبری از زاویه‌ی سمت وجود ندارد و متعاقب آن تخمین بایاس ژایروی سمت نیز نامعتبر خواهد بود.

راهکار در نظر گرفته شده در الگوریتم ناوبری پیشنهادی در این مقاله در دو گام اجرا می‌شود. در گام اول به اصلاح بردار اندازه‌گیری سیستم پرداخته می‌شود. همان طوری که گفته شد، در زمان قطع داده‌برداری GPS متغیری برای اندازه‌گیری زاویه‌ی سمت از شمال وجود ندارد. در چنین شرایطی بردار اندازه‌گیری رابطه‌ی (۲۸) به صورت زیر تغییر داده می‌شود.

$$\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} \varphi_{acc} \\ \theta_{acc} \\ \psi \end{bmatrix} \qquad (۳۵)$$

این کار منجر به صفر شدن درایه‌ی مربوط به بروز رسانی زاویه‌ی سمت در بردار سیگنال تغییر[11] می‌شود. در واقع درایه‌ی سوم بردار $\left(\mathbf{z}_k - \boldsymbol{H}_k \hat{\boldsymbol{x}}_k^-\right)$ در محاسبه‌ی $\hat{\boldsymbol{x}}_k$ برابر صفر می‌شود.

در گام دوم به اصلاح روند تخمین بایاس ژایروی سمت در شرایط قطع داده‌برداری GPS پرداخته می‌شود. به این صورت که در زمان‌های عدم دسترسی به سامانه‌ی GPS، بایاس ژایروی سمت ثابت شده و از آخرین بایاسی که به هنگام دسترسی به GPS تخمین زده شد، در کل مدت زمان قطع داده‌برداری GPS استفاده می‌شود. برای این کار لازم است که درایه‌های مربوطه در سیگنال $\boldsymbol{K}_k \left(\mathbf{z}_k - \boldsymbol{H}_k \hat{\boldsymbol{x}}_k^-\right)$ در تخمین بردار حالت $\hat{\boldsymbol{x}}_k$ به صفر بازنشانی شود. این عمل نقش قابل توجهی در بهبود عملکرد الگوریتم ناوبری در تخمین بایاس ژایروی سمت در زمان‌های قطع داده‌برداری GPS خواهد داشت. در مجموع، راهکار پیشنهادی به خوبی مانع از رشد خطای تخمین زاویه‌ی سمت در شرایط عدم دسترسی به سامانه‌ی GPS به ویژه در قطعی‌های بلند مدت می‌شود و منجر به یک تخمین بدون رانش[12] خواهد شد.

۴-۳- تخمین موقعیت به روش محاسبات مرده[13]

در این بخش، به ارائه‌ی الگوریتمی برای تخمین موقعیت سامانه‌ی مورد ناوبری که یک سامانه‌ی AUV است، پرداخته می‌شود. در صورت دسترسی به داده‌های سامانه‌ی GPS به راحتی می‌توان طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع را در هر لحظه دریافت نمود. اما، مساله این است که در صورت عدم دسترسی به داده‌های GPS، به عنوان مثال زمانی که سامانه‌ی AUV در زیر آب حرکت می‌کند، چه راهکاری باید برای تخمین موقعیت در پیش گرفته شود. در چنین شرایطی لازم است از اندازه‌گیری‌های کمک-ناوبری استفاده شود. الگوریتم پیشنهادی در این مقاله بر مبنای روش محاسبات مرده است که تنها متکی به یک حسگر سرعت تک-محوره است. با استفاده از سرعت‌سنج محوری می‌توان سرعت محوری سامانه‌ی AUV را اندازه‌گیری نمود. با توجه به ناچیز بودن زاویه‌ی حمله‌ی حرکت بدنه در دو صفحه و همچنین اینکه مولفه‌های سرعت در دو راستای y و z در مقایسه با مولفه‌ی محوری بدنه قابل صرف نظر هستند، سرعت حرکت رونده‌ی AUV، عمدتاً همان سرعت محوری بدنه است. بنابراین، با انتقال خروجی سرعت‌سنج از دستگاه بدنه به دستگاه ناوبری می‌توان مولفه‌های سرعت سامانه را در دستگاه ناوبری مطابق رابطه‌ی (۳۶) تقریب زد.

$$\begin{bmatrix} v_N \\ v_E \\ v_D \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_b^n \begin{bmatrix} v_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (۳۶)$$

که v_s بیانگر خروجی سرعت‌سنج محوری است. با استفاده از مولفه‌های بردار سرعت در دستگاه ناوبری، می‌توان مقادیر طول و عرض جغرافیایی را از حل معادلات دینامیکیِ ارائه شده در رابطه‌ی (۹) به صورت زیر محاسبه نمود.

$$\begin{aligned} L_k &= \frac{v_N}{R_N}\Delta t + L_{k-1} \\ l_k &= \frac{v_E}{R_E \cos(L_{k-1})}\Delta t + l_{k-1} \end{aligned} \qquad (۳۷)$$

که اندیس k مربوط به گام جاری و اندیس $k\text{-}1$ مربوط به گام ماقبل است و Δt، بیانگر زمان نمونه‌برداری است. بدیهی است که در صورت وجود جریان‌های زیرسطحی، این تقریب با خطا همراه خواهد بود. بنابراین، استفاده از مقدار تقریبیِ سرعت بدنه، بخشی از خطای ناوبری در زیر سطح را به خود اختصاص می‌دهد. اگرچه با بکارگیری حسگرهای گران‌قیمت نظیر DVL[14] می‌توان مولفه‌های سرعت بدنه را در هر سه محور محاسبه نمود، اما الگوریتم پیشنهادی در این مقاله بر پایه‌ی استفاده از حسگرهای ارزان‌قیمت استوار است. رابطه‌ی (۳۷) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود و مولفه‌های حرکت سامانه‌ی مورد ناوبری را در راستاهای شمال و شرق در هر لحظه از زمان محاسبه نمود.

$$\begin{aligned} N_i &= R_N \left(L_i - L_{i-1}\right) + N_{i-1} \\ E_i &= R_E \left(l_i - l_{i-1}\right)\cos(L_{i-1}) + E_{i-1} \end{aligned} \qquad (۳۸)$$

بدین ترتیب با اعمال شرایط اولیه برای مقادیر L، l، N و E می‌توان موقعیت سامانه‌ی مورد ناوبری را در هر لحظه تخمین زد. تنها نکته‌ی حائز اهمیت این است که تا زمانی که دسترسی به سامانه‌ی GPS وجود دارد، از مولفه‌های سرعت GPS استفاده می‌شود و در غیر این صورت با استفاده از خروجی سرعت‌سنج محوری، مولفه‌های سرعت در دستگاه ناوبری با تقریب قابل قبولی محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است عمق حرکتی رونده در هر لحظه با استفاده از یک حسگر عمق قابل اندازه‌گیری است و محدودیت خاصی در این مورد وجود ندارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.11.9]

۵- پیاده‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش، عملکرد الگوریتم ناوبری پیشنهادی در این مقاله با پیاده‌سازی در تست واقعی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور چندین تست اجرا شده است و نتایج حاصل از این تست‌ها در ادامه تشریح خواهند شد. در ابتدا به معرفی تجهیزات آزمایشگاهیِ بکار رفته در تست پرداخته می‌شود. حسگرهای در نظر گرفته شده برای سامانه‌ی ناوبری پیشنهادی، شامل یک واحد اندازه‌گیری اینرسی[۱۵] با مدل 3DM-GX3-25 و سرعت‌سنج محوری با مدل CS4500 است. این واحد IMU دارای مجموعه‌ای از حسگرهای شتاب‌سنج و ژایروی سه محوره از نوع حسگرهای ارزان قیمت از کلاس MEMS هستند. همچنین از یک گیرنده‌ی GPS با مدل Garmin 16-HVS استفاده می‌شود. عمق حرکتی رونده نیز با استفاده از حسگر عمق‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۳، نمایی از تجهیزات مربوطه نشان داده شده و در جدول‌های ۱ و ۲ مشخصات کامل حسگرها آورده شده است. لازم به ذکر است که در تست‌های میدانیِ اجرا شده، نرخ داده‌برداری از حسگرهای اینرسی برابر با ۱۰۰ هرتز و برای حسگر سرعت و همچنین سامانه‌ی GPS برابر با ۱ هرتز در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- تجهیزات بکار رفته (الف: واحد IMU، ب: حسگر سرعت، ج: گیرنده‌ی [۲۰-۱۸]

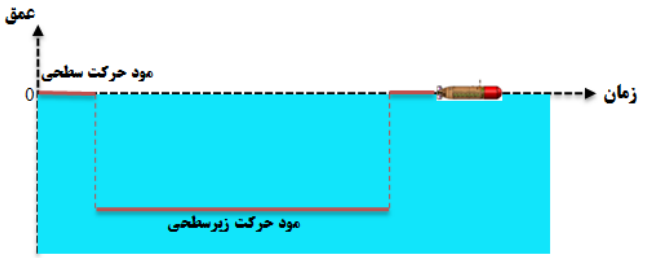
جدول ۱- مشخصات حسگرهای اینرسی 3DM-GX3-25

نوع حسگر	مشخصات	اندازه
شتاب‌سنج	نرخ داده‌برداری	1 ~ 1000 Hz
	محدوده‌ی شتاب	±5g
	خطای پایداری بایاس	±0.003g
	بازه‌ی دمایی کارکرد	-40 ~ +70 °C
ژایرو	نرخ داده‌برداری	1 ~ 1000 Hz
	محدوده‌ی نرخ زاویه‌ای	±300 °/sec
	خطای پایداری بایاس	0.2 °/sec
	بازه‌ی دمایی کارکرد	-40 ~ 70 °C

جدول ۲- مشخصات حسگر سرعت CS4500

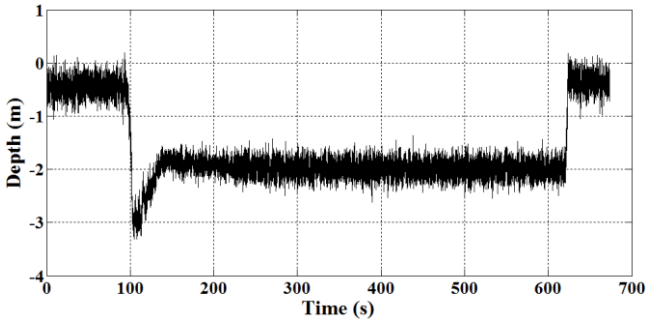
مشخصات	اندازه
نرخ داده‌برداری	1 ~ 2 Hz
بازه سرعت	0.1 ~ 40 knot
بازه‌ی دمایی کارکرد	0 ~ +40 °C
دقت اندازه‌گیری	0.1 knot

در تستِ اجرا شده، رونده دارای هر دو مود حرکتی سطحی و زیرسطحی است. سناریوی حرکتی رونده در شکل ۴ نشان داده شده است. در این سناریو، با ورود به ناحیه‌ی زیر سطح، با استفاده از مقدار بایاسی که در مود سطحی ماقبل آن برای ژایروی سمت تخمین زده شده است، زاویه‌ی سمت بدنه تعیین می‌شود. در واقع تخمین زاویه‌ی سمت بدنه، بدون دسترسی به خروجی GPS انجام می‌گیرد. بعد از اتمام مود زیرسطحی، بدنه مجدداً به سطح حرکت می‌کند. با حضور در سطح و دسترسی به خروجی GPS، موقعیت و وضعیت بدنه در قالب الگوریتم تخمین تصحیح می‌شود.



شکل ۴- سناریوی حرکتی رونده در تست میدانی

ارزیابی دقت و عملکرد الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، در دو تست مورد بررسی قرار می‌گیرد، که نتایج حاصل از آنها در ادامه ارائه خواهد شد. در شکل ۵، عمق حرکتی رونده‌ی خودگردان در تست اول نشان داده شده است.

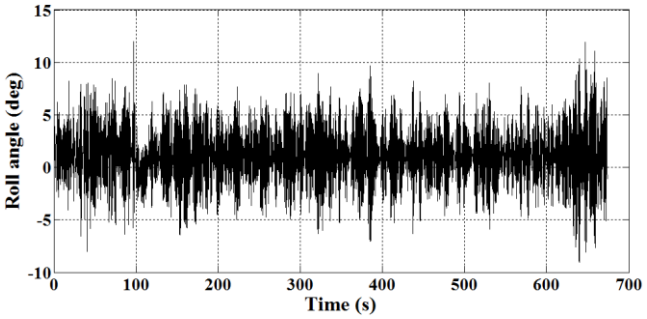


شکل ۵- عمق حرکتی رونده در تست اول

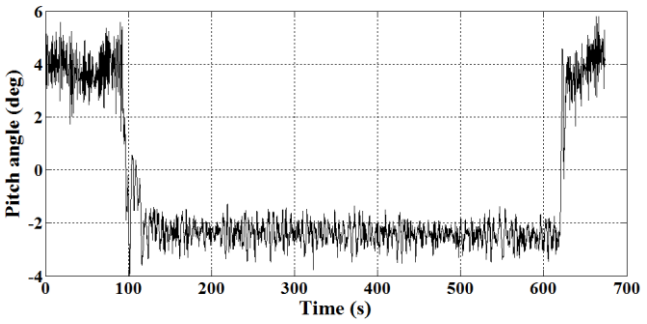
در تست اول، رونده‌ی AUV بعد از شروع تست ابتدا به مدت ۱۰۰ ثانیه روی سطح حرکت می‌کند، که دسترسی به داده‌های سامانه‌ی GPS وجود دارد. سپس رونده به داخل آب غوص نموده و به مدت ۵۲۰ ثانیه در مود زیرسطحی حرکت می‌کند. بنابراین درصد مود

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.11.9]

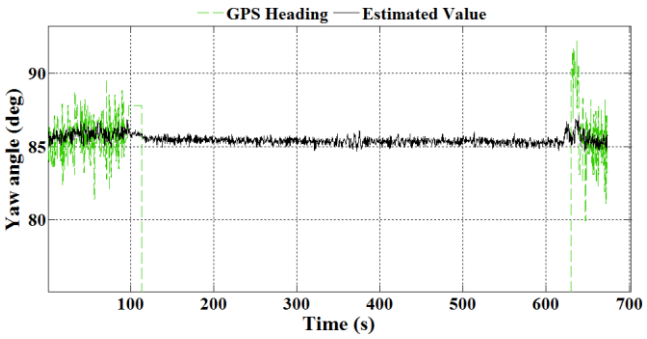
حرکتی زیرسطحی در حدود ۸۴ درصد است. در شکل‌های ۶ تا ۸ نتایج مربوط به تخمین زوایای تراز و سمت از شمال در تست اول نشان داده شده‌اند.



شکل ۶- تخمین زاویه‌ی غلت در تست اول

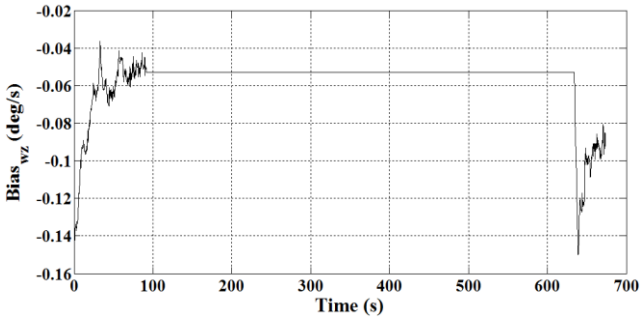


شکل ۷- تخمین زاویه‌ی فراز در تست اول



شکل ۸- تخمین زاویه‌ی سمت در تست اول

شرایط هیدروستاتیکی و هیدرودینامیکی بدنه به نحوی می‌باشد که باید در زاویه‌ی غلت در تعادل حول مقدار صفر قرار داشته باشد. نتیجه‌ی تخمین برای زاویه‌ی غلت، عدم واگرایی را برای الگوریتم پیشنهادی نشان می‌دهد که حول مقدار میانگین صفر همگرا شده است. با توجه به اینکه با گذشت زمان، تخمین زاویه‌ی رول در معرض دریفت قرار نمی‌گیرد، این مطلب استنباط می‌شود که خطای موجود در حسگرهای اینرسی به خوبی در الگوریتم تخمین جبران شده و تخمین درستی از زاویه‌ی غلت ارائه شده است. لازم به ذکر است زمانی که بدنه در سطح قرار دارد، اثرات ناشی از اغتشاشات و امواج سطحی به مراتب بیشتر است. به همین خاطر، مقدار زاویه‌ی غلت در مود حرکت سطحی با نوسانات بیشتری همراه است. همین مساله در ارزیابی تخمین زاویه‌ی پیچ نیز برقرار است. در شکل ۸، زاویه‌ی سمتِ تخمین زده شده با الگوریتم ناوبریِ پیشنهادی با مقدار بدست آمده از سامانه‌ی GPS مقایسه شده است. با وجود قطعی بلندمدت در دسترسی به داده‌های GPS، الگوریتم ناوبری پیشنهادی عملکرد بسیار مناسبی در تخمین زاویه‌ی سمت داشته است. نکته‌ی دیگری که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، این است که زاویه‌ی سمت بدست آمده از GPS با نوسانات زیادی همراه است و علت آن، سرعت پایین حرکت بدنه است. با استفاده از الگوریتم تخمین ارائه شده در این مقاله، این نوسانات به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. در شکل ۹، مقدار تخمین زده شده برای بایاس ژایروی سمت نشان داده شده است.



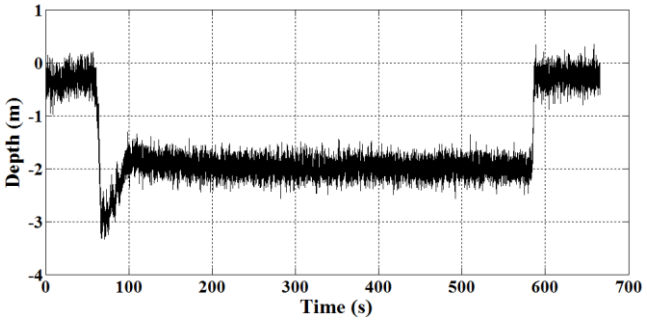
شکل ۹- تخمین بایاس ژایروی سمت در تست اول

در زمان‌های عدم دسترسی به سامانه‌ی GPS، بایاس ژایروی سمت ثابت شده و از آخرین بایاسی که به هنگام دسترسی به GPS تخمین زده شد، در کل مدت زمان قطع داده‌برداری GPS استفاده می‌شود. مقدار بایاس تخمین زده شده برای ژایروی سمت در این تست در حدود ۰/۰۵۳- درجه بر ثانیه است. تخمین درست بایاس ژایروی سمت، نقش اساسی در بهبود دقت تخمین زاویه‌ی سمت در الگوریتم پیشنهادی داشته است. همان طوری که در شکل ۸ مشهود است، در حرکت زیرسطحی بعد از گذشت ۵۲۰ ثانیه از قطع شدن GPS خطایی در حدود ۵ درجه در تخمین زاویه‌ی سمت مشاهده می‌شود.

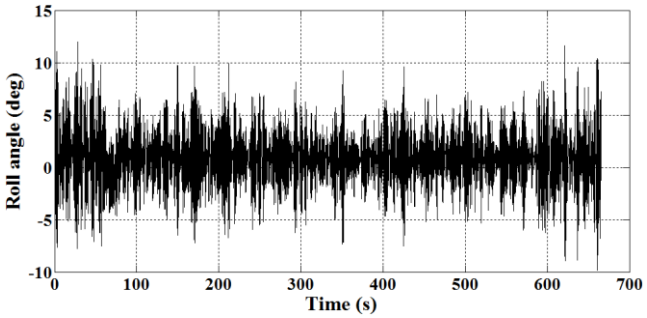
به منظور ارزیابی بهتر الگوریتم پیشنهادی و همچنین بررسی تکرارپذیری و اعتبارسنجی نتایج، تست دیگری نیز اجرا شده است. در شکل ۱۰، عمق حرکتی رونده در تست دوم نشان داده شده است. نتایج مربوط تخمین زوایای تراز و سمت از شمال نیز در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ ارایه شده است. در تست دوم، رونده‌ی AUV بعد از شروع تست ابتدا به مدت ۶۲ ثانیه روی سطح حرکت می‌کند، که دسترسی به داده‌های سامانه‌ی GPS وجود دارد. سپس رونده به داخل آب غوص نموده و به مدت ۵۲۳ ثانیه در مود زیرسطحی حرکت می‌کند. بنابراین درصد مود حرکتی زیرسطحی در حدود ۸۹ درصد است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

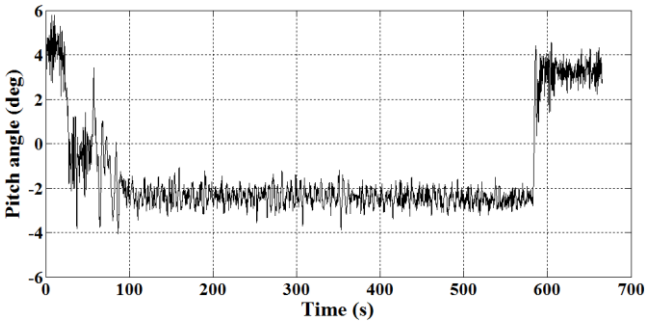
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.11.9]



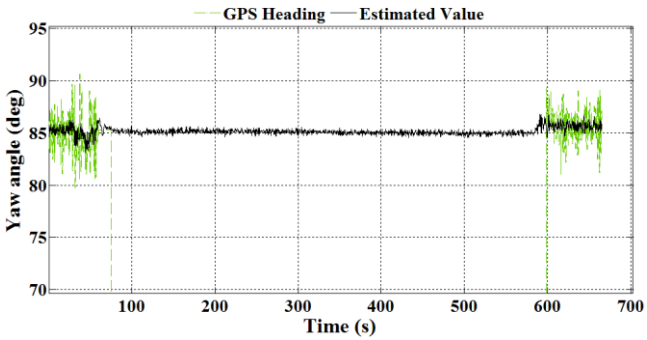
شکل ۱۰- عمق حرکتی رونده در تست دوم



شکل ۱۱- تخمین زاویه‌ی غلت در تست دوم

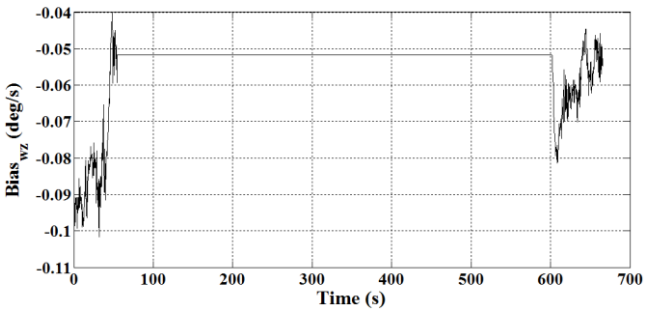


شکل ۱۲- تخمین زاویه‌ی فراز در تست دوم



شکل ۱۳- تخمین زاویه‌ی سمت در تست دوم

بعد از اتمام مود زیرسطحی و وصل مجدد سامانه‌ی GPS خطایی در حدود ۳ درجه در تخمین زاویه‌ی سمت مشاهده می‌شود. مقدار تخمین زده شده برای بایاس ژایروی سمت در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مقدار بایاس تخمین زده شده برای ژایروی سمت در تست میدانی دوم در حدود ۰/۰۵۲- درجه بر ثانیه است.



شکل ۱۴- تخمین بایاس ژایروی سمت در تست دوم

در انتها، به ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در خطای تخمین موقعیت پرداخته می‌شود. همان طوری که گفته شد، در زمان‌های قطع داده‌برداری GPS از خروجی سرعت‌سنج محوری با باند خطای کمتر از ۲ درصد، طبق الگوریتم ارائه شده در بخش قبل برای تخمین موقعیت استفاده می‌شود. جزئیات مربوط به تخمین موقعیت و خطای ناوبری در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- خطای تخمین موقعیت بعد از اتمام مود زیرسطحی در تست‌های میدانی اول و دوم

مشخصه	تست	
	اول	دوم
مدت قطع GPS [*sec*]	1040	1045
موقعیت تخمینی [*deg*]	l = 52.6513 L = 36.7301	l = 52.7037 L = 36.7330
موقعیت واقعی [*deg*]	l = 52.6551 L = 36.729	l = 52.7077 L = 36.7335
خطای تخمین موقعیت [*m*]	340	360

لازم به ذکر است بخشی از خطای تخمین موقعیت، ناشی از وجود جریان‌های زیرسطحی است که با استفاده از حسگر سرعت محوری قابل مشاهده نیست. دستیابی به این دقت از تخمین موقعیت با وجود استفاده از حسگرهای ارزان‌قیمت و همچنین قطعی ۵۲۰ ثانیه‌ای در داده‌برداری از GPS، عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۶- نتیجه گیری

داشتن ناوبری دقیق یک مساله‌ی کلیدی و حیاتی در انواع سامانه‌های خودگردان است. در این مقاله، به ارائه‌ی یک الگوریتم ناوبری تلفیقی AHRS/GPS/DR برای استفاده در یک سامانه‌ی زیرسطحی خودگردان پرداخته شده است. با استفاده از فیلتر تخمین‌زن کالمن، الگوریتم کارآمدی برای تلفیق سامانه‌ی AHRS با سامانه‌ی GPS طراحی شده است و از این طریق، خطاهای اجتناب‌ناپذیر موجود در حسگرهای اینرسی ارزان قیمت MEMS تا حد قابل ملاحظه‌ای جبران شده است. از نتایج مهم بدست آمده در تست میدانی، تخمین زاویه‌ی سمت با خطای کمتر از ۵ درجه در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.11.9]

طول ۵۰۰ ثانیه قطع داده‌برداری از سامانه‌ی GPS بوده است. با توجه به استفاده از حسگرهای اینرسی ارزان‌قیمت که شامل ژایروی با خطای قابل ملاحظه است، دستیابی به این دقت از تخمین زاویه‌ی سمت در طول ۵۰۰ ثانیه قطع داده‌برداری از سامانه‌ی GPS دستاورد قابل قبول و ارزشمندی بوده است. به طور خلاصه، پیاده‌سازی الگوریتم ناوبریِ پیشنهادی در یک سامانه‌ی AUV با برد بلند و تضمین عملکرد مناسب آن در قطعی‌های بلندمدت داده‌برداری از GPS از نقاط قوت الگوریتم ارائه شده در این مقاله هستند.

کلید واژگان

1- Autonomous Underwater Vehicles (AUVs)
2- Attitude-Heading Reference System (AHRS)
3- Global Positioning System (GPS)
4- Extended Kalman filter (EKF)
5- Strap-down gyro compassing
6- Low-Pass Digital Filter
7- Meridian Radius of Curvature
8- Transverse Radius of Curvature
9- Time Update
10- Measurement Update
11- Innovation signal
12- Drift-free
13- Dead Reckoning (DR)
14- Doppler Velocity Logger (DVL)
15- Inertial Measurement Unit (IMU)

۷- مراجع

1- Yuh, J., (1995), *Underwater Robotic Vehicles: Design and Control*, TSI Press, Albuqurque, NM.

2- Ho-Sung, K., Hyeung-Sik, C., Jong-Su, Y., Ro, P.L., (2011), *Study on AHRS sensors for unmanned underwater vehicle*, International Journal of Ocean System Engineering, Vol. 1, pp. 165-170.

3- Geiger, W., Bartholomeyczik, J., Breng, U., et al., (2008), *MEMS IMU for AHRS applications*, Proceedings of the IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Monterey, CA.

4- Marins, J. L., Yun, X. P., Bachmann, E. R. and McGhee, R. B., (2001), *An extended Kalman filter for quaternion-based orientation estimation using MARG sensors*, Proceeding of 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots Systems, Maui, Hawaii, USA, Oct.29 –Nov. 03,.

5- Markley, F. L., Crassidis, J. and Cheng, Y., (2005), *Nonlinear attitude filtering methods*, Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, San Francisco, CA.

6- Wang, M., Yang, Y., Hatch, R and Zhang, Y., (2004), *Adaptive filter for a miniature MEMS based attitude and heading reference system*, Proceedings of the Position Location and Navigation Symposium, Monterey, CA.

7- Qin, W., Yuan, W., Chang, H., Xue, L. and Yuan, G., (2009), *Fuzzy adaptive extended Kalman filter for miniature attitude and heading reference system*, Proceeding of the 4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Shenzhen, China.

8- Hemmati, M and Massoumnia, M., (2012), *Processing algorithm for a strapdown gyrocompass*, Journal of Scientia Iranica, Vol. 19, pp. 774-781.

9- Li, Q., et al., (2013), *A novel algorithm for marine strapdown gyrocompass based on digital filter*, Measurement, Vol. 46, pp. 563-571.

10- Li, W. and Wang, J., (2011), *Dynamic modelling for MEMS-IMU/magnetometer integrated attitude and heading reference system*, Proceedings of the 2011 IGNSS Symposium, Sydney, Australia.

11- Milanchian, H., Keighobadi, J., and Nourmohammadi, H., (2015), *Magnetic calibration of three-axis strapdown magnetometers for applications in MEMS attitude-heading reference systems.* Amirkabir International Journal of Modeling, Identification, Simulation & Control, Vol. 47(1), p. 55-65.

12- Doostdar, P., and Keighobadi, J., (2012), *Design and implementation of SMO for a nonlinear MIMO AHRS*, Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 32, pp. 1973-1987,.

13- Keighobadi, J., Yazdanpanah, M.J., and Kabganian, M., (2011), "*An enhanced fuzzy H∞ estimator applied to low-cost attitude heading reference system*", Journal of Kybernetes, Vol. 40, pp. 300-326.

14- Nourmohammadi, H., and Keighobadi, J., (2017), *Decentralized INS/GNSS system with MEMS-grade inertial sensors using QR-factorized CKF*. IEEE Sensors Journal, Vol. 17(11), pp. 3278-3287.

15- Noureldin, A., Shafie, A. E., and Bayoumi, M., (2011), *GPS/INS integration utilizing dynamic neural networks for vehicular navigation*, J. Sci. Information Fusion, pp. 48-57.

16- Nourmohammadi, H. and Keighobadi J., (2018), Fuzzy adaptive integration scheme for low-cost SINS/GPS navigation system, Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 99, pp. 434-449.

17- Nourmohammadi, H. and Keighobadi J., (2017), Integration scheme for SINS/GPS system based on vertical channel decomposition and in-motion alignment, AUT Journal of Modeling and Simulation, DOI:10.22060/MISCJ.2017.12483.5036.

18- Miniature Attitude Heading Reference System, 3DM-GX3-25 Datasheet, (2014).

19- Airmar Technology Corporation, Ultrasonic Speed Sensor, CS4500 Datasheet, (2010).

20- Garmin 16-Hvs GPS Receiver, CAMPBELL SCIENTIFIC, INC, Datasheet, (2008).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.11.9]