

علمی - پژوهشی

سامانه ناوبری اینرسی به کمک مدل دینامیکی برای

زیردریایی ریموس ۱۰۰

سعید نصرالهی^۱، آیلار خوشه مهری^۲، محمدرضا پیامی نیا^۳

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۴)

چکیده

استفاده از وسایل نقلیه زیرآب خودگردان برای اکتشاف و علوم اقیانوس‌شناسی در دهه گذشته مورد توجه مراکز تحقیقاتی در سراسر جهان بوده است. ناوبری اینرسی معمولاً به‌عنوان اصلی‌ترین وسیله موقعیت‌یابی برای وسایل نقلیه زیرآب مورد استفاده قرار می‌گیرد. اشکال اصلی در استفاده تنها از سامانه ناوبری اینرسی خطای رو به رشد در موقعیت‌ها و وضعیت‌های برآورد شده به دلیل خطا در خروجی واحد اندازه‌گیر اینرسی و انتگرال‌گیری از آن‌ها است. به‌طور سنتی حسگرهای خارجی مانند سامانه موقعیت‌یاب جهانی، گیرنده‌های صوتی، سرعت‌سنج داپلری و یا یک دوربین برای کمک به راه‌حل ناوبری اینرسی جهت محدود کردن خطاهای تخمین استفاده شده‌اند. این حسگرهای کمکی چندین معایب عملی دارند که اساساً مربوط به اتکا به اطلاعات خارجی است. یکی از منابع اطلاعاتی که می‌تواند بدون نیاز به سنجش خارجی اضافی در ناوبری زیردریایی کمک کند، استفاده از مدل دینامیکی آن است. مدل وسیله قادر است حالت سامانه را مطابق با ورودی‌های کنترلی و نیروهای خارجی که روی آن عمل می‌کنند، نشان دهد. در این مقاله یک سامانه ناوبری اینرسی به کمک مدل برای زیردریایی ریموس ۱۰۰ بر اساس یک مدل دینامیکی غیرخطی ۶ درجه آزادی ارائه شده است. سامانه ناوبری ارائه‌شده از دانش دینامیک وسیله از طریق یک مدل ریاضی که به‌صورت تجربی تأیید شده است بهره گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که سامانه ناوبری پیشنهادی قابلیت‌های ناوبری زیرآب را برای سامانه‌های فاقد وسایل کمکی مرسوم بهبود می‌بخشد.

واژه‌های کلیدی: وسیله زیرآب خودگردان، مدل دینامیکی غیرخطی، ناوبری اینرسی به کمک مدل، فیلتر کالمن توسعه‌یافته، تلفیق اطلاعات

A Model-Aided Inertial Navigation System for the Remus 100 AUV

S. Nasrollahi¹, A. Khooshehmehri², M. R. Payaminia³

Department of Electrical and Computer Engineering Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 19/January/2021; Accepted: 25/May/2021)

ABSTRACT

The use of autonomous underwater vehicles (AUV) for the exploration and oceanology science has been a field of interest of several research centers around the world in the last decade. The inertial navigation system (INS) has commonly been used as the principal means of localization for autonomous underwater vehicles. The main drawback of using only the inertia navigation system is the escalating error in the estimated position and attitude due to the error in the output of the inertia measurement unit and its integration. Traditionally external sensors such as: GPS, acoustic transponders, Doppler velocity logs (DVL), or cameras have been used to aid the solution of the inertial navigator by constraining the errors in the estimated positions. These external sensors have several practical disadvantages, basically related to their reliance on external information. One source of information that can assist in the localization of the vehicle, without the need for extra additional external sensing, is the vehicle's dynamic model. The model of the vehicle is capable of representing the attitude of the system according to the control inputs and the external forces acting on it. In this work, we follow a model-aided inertial navigation system (MA-INS) for Remus 100 AUV based on a 6-DOF nonlinear dynamic model. The proposed navigation system utilizes the knowledge of the device dynamics through an experimentally validated mathematical model. The results show that the proposed navigation system improves underwater navigation capabilities for the systems that lack conventional aiding equipment.

Keywords: Autonomous Underwater Vehicle, Nonlinear Dynamic Model, Model-Aided Inertial Navigation, Extended Kalman Filter, Data Fusion.

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): Nasrollahi@mut.ac.ir

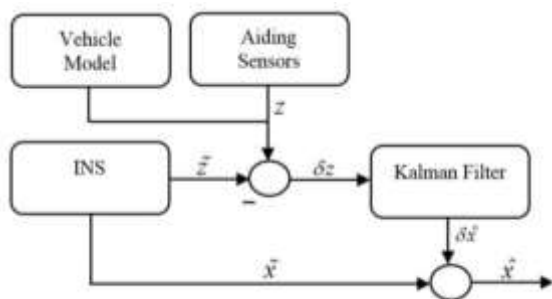
۲- دکتری: khooshehmehri@mut.ac.ir

۳- کارشناس ارشد: Mrpayami@yahoo.com

۱- مقدمه

مطابقت دارد وجود داشته باشد، می‌تواند به‌عنوان یک حسگر مجازی در راهکار ناوبری گنجانده شود. چنین سامانه‌هایی را ناوبری اینرسی به کمک مدل می‌نامند [۱].

مفهوم استفاده از یک مدل وسیله نقلیه برای کمک به ناوبری اینرسی در شکل ۱ نشان داده شده است، که در آن با خروجی حاصل از مدل سینتیکی به‌طور مشابه با خروجی یک حسگر کمکی خارجی رفتار می‌شود. فیلتر کالمن توسعه‌یافته اطلاعات حسگر کمکی را با خروجی ناوبری اینرسی به شکل باقیمانده اندازه‌گیری مقایسه می‌کند و خطاهای واحد اینرسی را با استفاده از پیکربندی بازخورد مستقیم جبران می‌کند.



شکل (۱): طرح کلی INS به کمک مدل [۱]

از یک سو ساختار سامانه کویفمن و بار - ایتراک [۲ و ۳] با استفاده از مدل وسیله به‌عنوان یک حسگر مجازی خارجی و از سوی دیگر، ساختار سامانه واسکونسولوس^۵ [۴] که در آن مدل وسیله با معادلات فیلتر کالمن توسعه‌یافته یکپارچه شده است. در اولین معماری دینامیک وسیله نقلیه توسط یک شبیه‌ساز دینامیک وسیله‌ی خارجی بر اساس اطلاعات در دسترس ورودی تراسترها محاسبه می‌شود. کویفمن و بار - ایتراک نشان دادند که می‌توان یک سامانه ناوبری اینرسی و یک مدل دینامیکی کامل هواپیما را باهم ترکیب کرد و این باعث افزایش مشاهده‌پذیری خطاهای سامانه ناوبری اینرسی مانند بایاس‌های واحد اندازه‌گیری اینرسی می‌شود [۲]. نویسندگان متعددی در این تحقیق مشارکت داشته‌اند. ژولیر و دورانت - وایت^۶ با استفاده از تئوری، ساختار فیلتر ترکیبی مورد استفاده کویفمن و بار - ایتراک را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و تأیید کردند که آن ساختار به‌صورت بهینه اطلاعات هر دو مدل را ترکیب می‌کند [۵]. علاوه بر

در مأموریت‌های دریایی جهت انجام وظایف محوله، برای هر سامانه خودکار یک برآورد دقیق از موقعیت مکانی و وضعیتی خود در تمام لحظات لازم است. ناوبری مبتنی بر اینرسی^۱ تنها یک راه‌حل برآورد موقعیت و وضعیت است که دارای مشکلات افزایش خطا در طول زمان است. برای غلبه بر این مشکل چندین منبع موقعیت‌یابی شامل روش‌های ناوبری صوتی، سرعت‌سنج داپلری، سونار، دوربین و سامانه موقعیت‌یاب جهانی در سطح آب ممکن است در دسترس باشد. ترکیبی از ناوبری اینرسی با چنین حسگرهایی به ناوبری کمک گرفته‌شده اشاره دارد که نیاز به ادغام حسگرهای چندگانه برای اندازه‌گیری‌های اینرسی، وضعیت، سرعت و موقعیت دارد. به‌منظور پیاده‌سازی الگوریتم ادغام اطلاعات، معمولاً فیلتر کالمن و خانواده آن شامل کالمن توسعه‌یافته^۲ استفاده می‌شود. مدل انتقال سامانه به‌طور کلی بر اساس داده‌های اینرسی (شتاب خطی و سرعت دوران) فرمول‌بندی شده و برای کار تخمین واقعی با اندازه‌گیری‌های مختلف به‌کار گرفته می‌شود. اکثر سامانه‌های سطح بالا به‌منظور محدود کردن دریافت، یک سرعت‌سنج داپلری را در مجموعه حسگر خود جای می‌دهند ولی این هزینه اضافی همیشه برای سامانه‌های کم‌هزینه امکان‌پذیر نیست. همچنین قابلیت استفاده از سامانه موقعیت‌یابی جهانی برای سامانه‌های زیردریایی با توجه به تضعیف سیگنال‌های الکترومغناطیسی در داخل آب وجود ندارد.

اخیراً استفاده از مدل‌های ریاضی توصیف‌کننده دینامیک وسیله نقلیه به‌عنوان وسیله‌ای برای کمک به ناوبری به‌کار گرفته شده است. این یک مدل سامانه به‌صورت معادلات دیفرانسیل است که ایجاد ارتباط بین فناوری فعال‌کننده^۳ (سرعت موتور و زاویه فرمان) و شتاب، سرعت و موقعیت فعلی وسیله نقلیه زیر آب^۴ را با در نظر گرفتن تأثیرات هیدرودینامیکی متعدد که نقش مهمی را ایفا می‌کنند، برقرار می‌کند. اگر پارامترهای دقیقی از مدل حرکت که با رفتار حرکتی واقعی وسیله نقلیه زیر آب

¹ Inertial Navigation System (INS)

² Extended Kalman Filter (EKF)

³ Actuator

⁴ Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

⁵ Vasconcelos

⁶ Julier & Durrant-White

می‌گیرد [۱ و ۱۰]. مقاله حاضر در اصل می‌تواند به‌عنوان توسعه و تکمیل کار انجام‌گرفته توسط هگرنائس^۳ در مورد ناوبری به کمک مدل برای وسیله‌های نقلیه زیر آب در نظر گرفته شود. اساس کار او در این مقاله برای تجزیه و تحلیل امکان‌سنجی این فن در کاربردهای زیرآب و به‌طور خاص برای زیردریایی ریموس ۱۰۰ با استفاده از تعمیم‌های زیر استفاده شده است: ۱- استفاده از یک مدل کامل غیرخطی ۶ درجه آزادی بر خلاف مدل ۳ درجه آزادی استفاده شده در [۱۰]. ۲- وارد کردن یک اندازه‌گیری سرعت مجازی ۳ درجه آزادی به‌جای ۲ درجه آزادی موجود در [۱۱]. ۳- استفاده از نتایج وضعیت و موقعیت حاصل از مدل دینامیکی وسیله در پیاده‌سازی ناوبری به کمک مدل. در مرجع [۱۲]، یک ناوبری تلفیقی مبتنی بر مدل سرعت جهت جایگزینی داده‌های اندازه‌گیر سرعت‌سنج داپلری برای یک وسیله نقلیه زیرآب ارائه شده است. پایین بودن دقت حسگر سرعت‌سنج داپلری در مأموریت‌های پیچیده موجب شده است برای داشتن ناوبری دقیق از مدل سرعت استفاده شود. در مرجع [۱۳]، الگوریتم تلفیق اطلاعات ناوبری اینرسی، سرعت‌سنج داپلری و مدل دینامیکی سامانه نقلیه زیرآب برای افزایش دقت ناوبری ارائه شده است. در این مرجع از دو فیلتر یکی به‌منظور افزایش دقت خروجی ژایروسکوپ‌ها و دیگری به‌منظور تلفیق اطلاعات استفاده شده است. در مرجع [۱۴]، ناوبری مبتنی بر مدل دینامیکی یک وسیله نقلیه زیر آب به همراه کالیبراسیون برخط مدل دینامیکی ارائه شده است. در این مرجع از حسگر ممز در کنار سرعت‌سنج داپلری برای ناوبری در عمق بیش از ۵۰۰۰ متر از سطح دریا انجام شده است. از مزایای استفاده ناوبری به کمک مدل می‌توان به عدم نیاز به هزینه برای خرید حسگر کمکی و همچنین در اختیار داشتن تمام اطلاعات موقعیتی و وضعیتی با فرکانس بالا از مدل دینامیکی به‌عنوان مشاهدات نام برد. اما، از معایب این رویکرد می‌توان به وابسته بودن دقت تلفیق اطلاعات به دقت مدل‌سازی اشاره کرد. در این مقاله با هدف ارائه اندازه‌گیری‌های مبتنی بر مدل، یک مدل سینتیکی از

آن، ساختارهای فیلتر جدیدی پیشنهاد شده بود که تمام آن‌ها بردارهای حالتی با اندازه کمتر در مقایسه با [۲] دارند. برایسون و سوکاریه [۶] رویکرد کویفمن و بار - ایتزاک را با یک ساختار فیلتر که در آن فقط خطاهای شتاب و خطاهای سرعت زاویه‌ای سامانه ناوبری اینرسی و مدل دینامیک وسیله^۱ تخمین زده می‌شوند، مقایسه کردند. با این حال معلوم شد که این کاهش بردار حالت همچنین منجر به نتایج تخمین با دقت کمتر می‌گردد. سندوبری^۲ با استفاده از تنها مدل دینامیکی وسیله نقلیه برای انتشار موقعیت، سرعت و سرعت‌های زاویه‌ای، کاملاً از حالت‌های تکراری جلوگیری می‌کند [۷]. اندازه‌گیری‌های واحد اندازه‌گیر اینرسی برای انتشار استفاده نمی‌شود، اما در مرحله تصحیح فیلتر کالمن به‌کار گرفته شده است. در معماری دوم اطلاعات دینامیک وسیله با استفاده از حالت‌های یک سامانه ناوبری اینرسی برای محاسبه دینامیک وسیله نقلیه، در مدل حالت فیلتر کالمن توسعه‌یافته ادغام می‌شوند. واسکونسولوس و همکارانش حالت‌های تکراری [۲] را با موفقیت از بردار حالت حذف کرد [۴]. دینامیک چرخشی وسیله نقلیه در یک فیلتر کالمن توسعه‌یافته تعبیه شده است و دینامیک انتقالی وسیله نقلیه با یک اندازه‌گیری ساختگی فیلتر کالمن گنجانده شده است. نتایج تخمین بسیار شبیه به نتایج کویفمن و بار - ایتزاک است. با این حال اجرای ساختار فیلتر پیشنهادی نسبتاً پیچیده است.

مهم‌ترین کار مرتبط و منبع تأثیرگذار بر رفتار کلی و درک مدل دینامیکی وسیله نقلیه زیر آب توسط فوسن در [۸ و ۹] ارائه شده است. اولین گزارش در مورد پیاده‌سازی ناوبری به کمک مدل برای یک وسیله نقلیه زیرآب در کار هگرنائس و همکارانش [۱] ارائه شده است. این کاربر روی زیردریایی خودگردان هوگین ۴۵۰۰ صورت گرفته که در آن بر اساس یک روش غیرمستقیم پیشرو، خروجی‌های یک مدل دینامیکی غیرخطی ۳ درجه آزادی به‌طور مشابه با یک حسگر کمکی سرعت خارجی مورد استفاده قرار

¹ Vehicle Dynamic Modelling (VDM)² Sendobry³ Hegrenaes

شکل (۲): واحد اندازه‌گیر اینرسی سری ADIS16490

[۱۵]

با استفاده از زوایای چرخ، فراز^۲ و سمت^۳، موقعیت شمال-شرق و جنوب، وضعیت و سرعت‌های بدنی وسیله نقلیه زیر آب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \vec{p}_{b/n}^n &= (x, y, z)^T, & \vec{\Theta}_{b/n}^n &= (\varphi, \theta, \psi)^T \\ \vec{v}_{b/n}^b &= (u, v, w)^T, & \vec{\omega}_{b/n}^b &= (p, q, r)^T \end{aligned} \quad (۱)$$

جایی که u, v, w سرعت‌ها در سه کانال هستند و p, q, r نرخ تغییرات چرخ، فراز و سمت نام‌برده می‌شود. همچنین، اندیس b ، به معنای بیان بردار در دستگاه بدنی و اندیس n ، به معنای بیان بردار در دستگاه جغرافیایی است. برای اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای چرخش و شتاب‌های خطی که توسط ژيروسکوپ و شتاب‌سنج‌های خطی انجام شده است، فرض می‌شود که سرعت زاویه‌ای اندازه‌گیری شده $\vec{\omega}_{ib}^b$ و نیروی ویژه اندازه‌گیری شده \vec{f}_{ib}^b توسط واحد اندازه‌گیر اینرسی به صورت فیزیکی به این شکل تولید می‌گردد [۱۶]:

$$\begin{aligned} \vec{\omega}_{ib}^b &= \vec{\omega}_{ib}^b + \vec{b}_\omega + \vec{n}_\omega \\ \vec{f}_{ib}^b &= \vec{f}_{ib}^b + \vec{b}_a + \vec{n}_a \end{aligned} \quad (۲)$$

جایی که $\vec{\omega}_{ib}^b$ سرعت چرخش واقعی، \vec{b}_ω بایاس حسگر و \vec{n}_ω نویز حسگر را نشان می‌دهد. نویز به صورت نویز سفید گاوسی فرض می‌شود که معمولاً ماتریس کوواریانس ساده شده آن $\sigma_\omega^2 \mathbf{I}_{3 \times 3}$ و به طور مشابه برای نیروی ویژه $\sigma_a^2 \mathbf{I}_{3 \times 3}$ می‌باشد. اندازه‌گیری سرعت‌های دوران از طریق یک واحد اندازه‌گیر اینرسی به صورت فیزیکی توسط معادله زیر تعیین می‌شود [۱۶]:

$$\vec{\omega}_{nb}^b = \vec{\omega}_{ib}^b - \mathbf{R}_n^b (\vec{\omega}_{ie}^n + \vec{\omega}_{en}^n) \quad (۳)$$

در بیشتر کاربردهای دریایی یا زیردریایی، سرعت چرخش زمین $\vec{\omega}_{ie}^n$ و سرعت انتقال $\vec{\omega}_{en}^n$ همان‌گونه که از این به بعد فرض خواهد شد، می‌تواند حذف شود. همچنین، بروز رسانی ماتریس دوران بدین صورت توصیف می‌گردد:

وسيله نقلیه زیردریایی ریموس ۱۰۰ که به صورت تجربی تأیید گشته، ارائه شده و سپس استفاده از چنین مدلی به صورت یک اندازه‌گیری مجازی برای کمک به سامانه ناوبری اینرسی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل حرکت وسیله نقلیه زیر آب و یک طرح دقیق که از آن برای راه‌حل ناوبری استفاده می‌شود در نرم‌افزار متلب ارائه شده است.

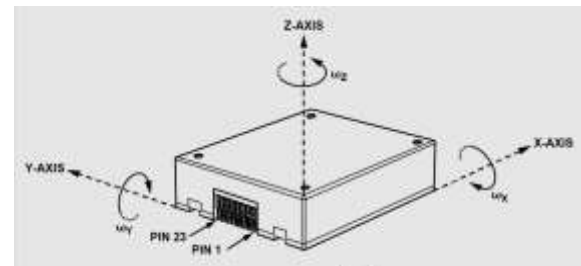
در بخش دوم این مقاله به بیان مسئله پرداخته است. در بخش سوم روابط ریاضی موردنیاز در ناوبری به کمک مدل بیان شده است. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است و در انتها نیز جمع‌بندی بیان شده است.

۲- بیان مسئله

۲-۱- مدل‌سازی خطاهای INS

هنگام سروکار داشتن با حسگرهایی مانند واحد اندازه‌گیر اینرسی، توجه به اثر بایاس حسگر بسیار مهم است. در برخی موارد دریافت بایاس ناچیز است و تنها آفست بایاس مهم است که می‌تواند قبل از فیلتر کردن کالیبره شود. نویز حسگر می‌تواند در عمل با فرض معمول یک مؤلفه نویز بایاس شده به‌اضافه یک منبع نویز بایاس نشده (به‌عنوان مثال نویز سفید) مدل‌سازی شود.

برای دیدن تأثیر این خطاها بر روی پارامترهای خروجی ناوبری (موقعیت، سرعت و وضعیت) شناختن انتشار آن‌ها از طریق معادلات ناوبری بسیار مهم است. خطاهای سامانه‌های دینامیکی در زمان متغیر هستند و به همین دلیل توسط معادلات دیفرانسیل توصیف می‌شوند. در شکل ۲ یک واحد اندازه‌گیری اینرسی سری ADIS16490 محصول کمپانی آنالوگ دیوایس^۱ [۱۵] که در شبیه‌سازی‌های این کار مورد استفاده قرار گرفته، نشان داده شده است و در ادامه جزئیات نحوه مدل‌سازی این حسگر بیان شده است.



² Roll
³ Pitch
⁴ Yaw

¹ Analog Devices

نسبت به \mathbf{v} می‌باشند که روابط آن‌ها در زیر بیان شده است.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{[i,j]} &= \frac{\partial \mathbf{f}_{[i]}}{\partial \mathbf{x}_{[j]}}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}, 0) \\ \mathbf{W}_{[i,j]} &= \frac{\partial \mathbf{f}_{[i]}}{\partial \mathbf{w}_{[j]}}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}, 0) \\ \mathbf{H}_{[i,j]} &= \frac{\partial \mathbf{h}_{[i]}}{\partial \mathbf{x}_{[j]}}(\tilde{\mathbf{x}}_k, 0) \\ \mathbf{V}_{[i,j]} &= \frac{\partial \mathbf{h}_{[i]}}{\partial \mathbf{v}_{[j]}}(\tilde{\mathbf{x}}_k, 0) \end{aligned} \quad (9)$$

۲-۳- مدل ۶ درجه آزادی برای زیردریایی ریموس ۱۰۰

به‌منظور ایجاد یک سامانه ناوبری دقیق و مقاوم، ابتدا باید یک مدل ریاضی کلی برای وسیله نقلیه زیر آب استخراج کنیم. در این بخش توسعه یک مدل شبیه‌سازی غیرخطی شش درجه آزادی برای زیردریایی ریموس ۱۰۰ شرح داده شده است. در این مدل نیروها و گشتاورهای خارجی ناشی از هیدرواستاتیک، بالابری و کشش هیدرودینامیکی، جرم اضافه‌شده و ورودی‌های کنترلی پروانه زیردریایی و باله‌ها، همگی از نظر ضرایب وسیله نقلیه تعریف شده‌اند. فرضیات در نظر گرفته‌شده به این است که وسیله نقلیه مانند یک جسم صلب رفتار می‌کند، چرخش زمین قابل صرف‌نظر است و ضرایب یا پارامترهای هیدرودینامیکی ثابت هستند. فرضیات اشاره‌شده در بالا، در نظر گرفتن نیروهای عمل‌کننده بین تک‌تک عناصر جرم را رفع می‌کند و نیروهای ناشی از حرکت زمین را حذف می‌نماید [۱۸]. همچنین یک واکنش فوری برای باله‌ها فرض می‌گردد، به این معنی که پاسخ زمانی محرک وسیله نسبت به پاسخ زمانی وضعیت وسیله بسیار کوچک است. از یک مدل نیروی محرکه ساده استفاده خواهد شد، که پروانه وسیله را به‌عنوان یک منبع نیروی محرکه و گشتاور ثابت مدنظر قرار می‌دهد. حرکت دستگاه مرجع بدنی نسبت به یک دستگاه مرجع اینرسی یا ثابت‌شده به زمین توصیف شده است. حرکت عمومی وسیله در شش درجه آزادی می‌تواند توسط بردارهای زیر توصیف شود:

$$\dot{\mathbf{R}}_b^n = \mathbf{R}_b^n \cdot \left[\vec{\omega}_{b/n}^b \times \right] \quad (4)$$

۲-۲- فیلتر و تخمین حالت

فیلتر کالمن به مسئله تلاش برای تخمین حالت \mathbf{x} از یک فرآیند کنترل‌شده با زمان گسسته که معادله دیفرانسیل تصادفی خطی زیر بر آن حاکم است، می‌پردازد [۱۷].

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \Phi_{k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}_{k-1} \mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{G}_{k-1} \mathbf{w}_{k-1} \\ y_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + v_k \end{aligned} \quad (5)$$

معادلات فیلتر کالمن زمان گسسته در زیر خلاصه شده است.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k^- &= \Phi_{k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+ + \mathbf{G}_{k-1} \mathbf{u}_{k-1} \\ \mathbf{P}_k^- &= \Phi_{k-1} \mathbf{P}_{k-1}^+ \Phi_{k-1}^T + \mathbf{Qd}_{k-1} \\ \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{R}_k + \mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T)^{-1} \\ \mathbf{P}_k^+ &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_k^- [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k]^T + \mathbf{K}_k \mathbf{R}_k \mathbf{K}_k^T \\ \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^+ &= \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{z}_{k+1} - \hat{y}_{k+1}) \end{aligned} \quad (6)$$

به‌طوری‌که، $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^+$ بردار حالت پسین، $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ بردار حالت پیشین، \mathbf{K}_k بهره فیلتر کالمن، \mathbf{P}_k^+ کواریانس پسین و \mathbf{P}_k^- کواریانس پیشین است. در مورد فیلتر کالمن توسعه‌یافته که معادله دیفرانسیل تصادفی غیرخطی طبق رابطه (۷) بر فرایند حاکم است، بعد از خطی‌سازی به رابطه (۸) خواهیم رسید.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}, \mathbf{w}_{k-1}) \\ \mathbf{z}_k &= \mathbf{h}(\mathbf{x}_k, \mathbf{v}_k) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &\approx \tilde{\mathbf{x}}_k + \mathbf{A}(\mathbf{x}_{k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k-1}) + \mathbf{W}w_{k-1} \\ \mathbf{z}_k &\approx \tilde{\mathbf{z}}_k + \mathbf{H}(\mathbf{x}_k - \tilde{\mathbf{x}}_k) + \mathbf{V}v_k \end{aligned} \quad (8)$$

جایی که \mathbf{x}_k و \mathbf{z}_k بردارهای واقعی حالت و اندازه‌گیری هستند و $\tilde{\mathbf{x}}_k$ و $\tilde{\mathbf{z}}_k$ بردارهای تقریبی حالت و اندازه‌گیری می‌باشند. در معادلات فوق \mathbf{A} ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی \mathbf{f} نسبت به \mathbf{x} ، \mathbf{W} ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی \mathbf{f} نسبت به \mathbf{w} ، \mathbf{H} ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی \mathbf{h} نسبت به \mathbf{x} ، \mathbf{V} ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی \mathbf{h}

$$\mathbf{r}_G = [x_g \ y_g \ z_g]^T, \quad \mathbf{r}_B = [x_b \ y_b \ z_b]^T \quad (۱۲)$$

همچنین، برای مشاهده فهرستی از ضرایب مربوط به نیروها و گشتاورهای زیردریایی ریموس ۱۰۰ به مرجع [۱۹] مراجعه کنید. با توجه به ماهیت غیرخطی این معادلات، از انتگرال‌گیری عددی برای حل سرعت، موقعیت و وضعیت وسیله در زمان استفاده خواهیم کرد. در هر گام زمانی می‌توان معادله (۱۱) را به فرم کلی زیر بیان کرد جایی که بردار حالت وسیله و بردار ورودی است.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_n &= \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{u}_n) \\ \mathbf{x} &= [u \ v \ w \ p \ q \ r \ x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]^T \quad (۱۳) \\ \mathbf{u}_n &= [\delta_s \ \delta_r \ X_{prop} \ K_{prop}]^T \end{aligned}$$

۳- سامانه ناوبری اینرسی به کمک مدل

برای تلفیق اطلاعات سامانه ناوبری اینرسی و مدل دینامیکی از مدل ناوبری شامل مدل دینامیکی موقعیت، سرعت و وضعیت است [۱۶]. معادلات دینامیکی موقعیت، سرعت و وضعیت به‌صورت زیر است [۱۶]:

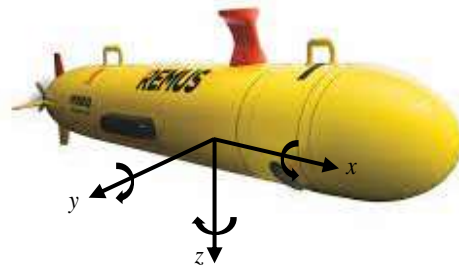
$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{p}}_{b/n}^n &= \mathbf{R}_b^n \cdot \dot{\mathbf{v}}_{b/n}^b \\ \dot{\mathbf{v}}_{b/n}^b &= \tilde{\mathbf{f}}_{ib}^b - (\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{b/n}^b \times \mathbf{v}_{b/n}^b) \\ &+ \mathbf{R}_n^b \tilde{\mathbf{g}}^n - \tilde{\mathbf{n}}_a - (\mathbf{v}_{b/n}^b \times \tilde{\mathbf{n}}_\omega) \quad (۱۴) \\ \dot{\mathbf{q}}_b^n &= \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{q}}_b^n \bullet \begin{pmatrix} 0 \\ \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{b/n}^b \end{pmatrix} - \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{q}}_b^n \bullet \begin{pmatrix} 0 \\ \tilde{\mathbf{n}}_\omega \end{pmatrix} \end{aligned}$$

معادلات دینامیکی زمان پیوسته ناوبری شامل موقعیت، سرعت و وضعیت به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود [۱۶]:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(t) &= \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{R}_b^n(\tilde{\mathbf{q}}) & \mathbf{0}_{3 \times 4} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -[(\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{b/n}^b) \times] & \mathbf{0}_{3 \times 4} \\ \mathbf{0}_{4 \times 3} & \mathbf{0}_{4 \times 3} & \frac{1}{2} \mathbf{Q}_m^r(\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{b/n}^b) \end{pmatrix} \quad (۱۵) \\ \mathbf{B}(t) &= \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{R}_b^{n,T}(\tilde{\mathbf{q}}) \\ \mathbf{0}_{4 \times 3} & \mathbf{0}_{4 \times 3} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\eta}_1 &= [x \ y \ z]^T & \boldsymbol{\eta}_2 &= [\varphi \ \theta \ \psi]^T \\ \mathbf{v}_1 &= [u \ v \ w]^T & \mathbf{v}_2 &= [p \ q \ r]^T \quad (۱۰) \\ \boldsymbol{\tau}_1 &= [X \ Y \ Z]^T & \boldsymbol{\tau}_2 &= [K \ M \ N]^T \end{aligned}$$

که در روابط (۱۰)، $\boldsymbol{\eta}$ موقعیت و وضعیت وسیله را با توجه به دستگاه مرجع اینرسی یا ثابت‌شده به زمین مشخص می‌کند، \mathbf{v} سرعت انتقالی و دورانی وسیله با توجه به دستگاه مرجع بدنی و $\boldsymbol{\tau}$ نیروها و گشتاورهای کل عمل‌کننده بر روی وسیله با توجه به دستگاه مرجع بدنی می‌باشند. شکل ۳ دستگاه بدنی و نام‌گذاری برای سرعت‌های خطی و زاویه‌ای مربوط به ریموس ۱۰۰ را نشان می‌دهد.



شکل (۳): دستگاه مختصات بدنی ریموس ۱۰۰ [۱۹]

معادلات شش درجه آزادی ریموس ۱۰۰ به فرم زیر بیان می‌شود [۱۹]:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v & 0 & -mz_g \\ 0 & 0 & m - Z_w & my_g \\ 0 & -mz_g & my_g & I_{xx} - K_p \\ mz_g & 0 & -mx_g - M_w & 0 \\ -my_g & mx_g - N_v & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma X \\ \Sigma Y \\ \Sigma Z \\ \Sigma K \\ \Sigma M \\ \Sigma N \end{bmatrix} \quad (۱۱) \\ &+ \begin{bmatrix} mz_g & -my_g \\ 0 & mx_g - Y_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Sigma X \\ \Sigma Y \\ \Sigma Z \\ \Sigma K \\ \Sigma M \\ \Sigma N \end{bmatrix} \end{aligned}$$

به‌طوری‌که m جرم وسیله، $i = \{x, y\}$ ، $j = \{x, y\}$ ضرایب ممان اینرسی است. موقعیت مراکز گرانش و شناوری وسیله از نظر سامانه مختصات بدنی به شرح زیر است.

$$\mathbf{Q}_{IMU} = \begin{pmatrix} \sigma_a^2 \cdot I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \sigma_\omega^2 \cdot I_{3 \times 3} \end{pmatrix}$$

برای محاسبه عددی، سامانه پیوسته باید به یک هم‌تای زمان گسسته تبدیل شود. با توجه به فرمول‌بندی فضای حالت، معادلات به شکل زیر در حالت گسسته تبدیل می‌گردند [۲۱].

$$\bar{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{\Phi}_k \bar{\mathbf{x}}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k + \bar{\mathbf{w}}_k \quad (19)$$

$$\bar{\mathbf{w}}_k \sim N(0, \mathbf{Q}_k)$$

در شبیه‌سازی، وسیله نقلیه زیر آب در یک مسیر مرجع حرکت می‌کند؛ شامل یک حرکت فرورفتن در عمق آب تا فاصله کوتاهی قبل از کف دریا و به دنبال آن یک حرکت رفت‌وبرگشت افقی معمولی در پایین دریا که زیردریایی حوالی آن به حرکت خود ادامه می‌دهد. نرخ بروز رسانی مشاهدات در تمام شبیه‌سازی‌های این کار برابر با ۱ Hz در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این کار از موقعیت، سرعت خطی و وضعیت مدل دینامیکی زیردریایی به‌عنوان مشاهده برای فیلتر ناوبری استفاده شده است و ماتریس مشاهده H به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$\mathbf{H} = \mathbf{I}_{10 \times 10} \quad (20)$$

$$\mathbf{Z} = (x, y, z, u, v, w, q_1, q_2, q_3, q_4)^T$$

به‌منظور تعیین ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری R_{MA} یک روش برای تعیین واریانس کلی مدل (بر اساس الگوریتم حداکثر سازی انتظار) در مرجع [۲۲] ارائه شده است. در حالتی که مشاهدات صورت گرفته شامل موقعیت، سرعت و وضعیت زیردریایی باشد، ماتریس کوواریانس حاصل‌شده به شکل زیر است.

$$\mathbf{R}_{MA} = \begin{pmatrix} \sigma_{NED}^2 \cdot I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 4} \\ 0_{3 \times 3} & \sigma_v^2 \cdot I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 4} \\ 0_{4 \times 3} & 0_{4 \times 3} & \sigma_q^2 \cdot I_{4 \times 4} \end{pmatrix} \quad (21)$$

در شبیه‌سازی‌های این کار، برای تشکیل ماتریس‌های کوواریانس نویز اندازه‌گیری از مقادیر $\sigma_{NED} = 0.3 \text{ m}$ ، $\sigma_v = 0.02 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ و $\sigma_q = 0.5 \times \frac{\pi}{180}$ استفاده شده است و ماتریس کوواریانس خطای تخمین اولیه P_{init} نیز در

$$\mathbf{u}(t) = \begin{pmatrix} \tilde{f}_{ib}^b \\ \tilde{g}^n \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{G}(t) = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ -I_{3 \times 3} & -[v_{b/n}^b \times] \\ 0_{4 \times 3} & -\frac{1}{2} Q_m^c(\bar{q}_b^n) \end{pmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{w}} = \begin{pmatrix} \bar{n}_a \\ \bar{n}_\omega \end{pmatrix}$$

به‌طوری‌که $\mathbf{F}(t)$ ماتریس سامانه، $\mathbf{B}(t)$ ماتریس ورودی، $\mathbf{u}(t)$ بردار ورودی، $\mathbf{G}(t)$ ماتریس توزیع نویز و $\bar{\mathbf{w}}$ بردار نویز است. همچنین، برای یک کوآنزین داده‌شده $\bar{\mathbf{q}} = (q_1, q_2, q_3, q_4)^T$ به‌اصطلاح ماتریس ضرب کوآنزین $\mathbf{Q}_m(\bar{q})$ و ماتریس ضرب کوآنزین معکوس $\mathbf{Q}_m^r(\bar{q})$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{Q}_m(\bar{q}) := \begin{bmatrix} q_1 & -q_2 & -q_3 & -q_4 \\ q_2 & q_1 & -q_4 & q_3 \\ q_3 & q_4 & q_1 & -q_2 \\ q_4 & -q_3 & q_2 & q_1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

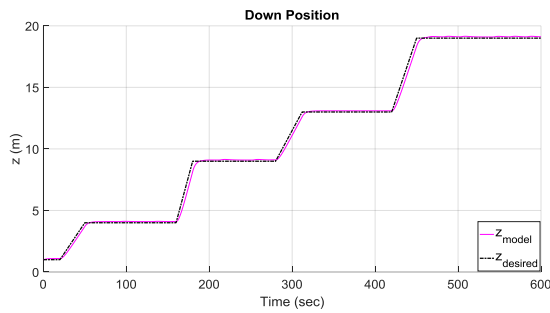
$$\mathbf{Q}_m^r(\bar{q}) := \begin{bmatrix} q_1 & -q_2 & -q_3 & -q_4 \\ q_2 & q_1 & q_4 & -q_3 \\ q_3 & -q_4 & q_1 & q_2 \\ q_4 & -q_3 & -q_2 & q_1 \end{bmatrix}$$

درنهایت، ماتریس ضرب کوآنزین بریده شده $\mathbf{Q}_m^c(\bar{q})$ ، با حذف ستون اول $\mathbf{Q}_m(\bar{q})$ تعریف می‌گردد. با استفاده از ماتریس‌های فوق، معادلات سامانه را می‌توان در فرم ماتریسی با یک مدل فضای حالت زمان پیوسته نوشت.

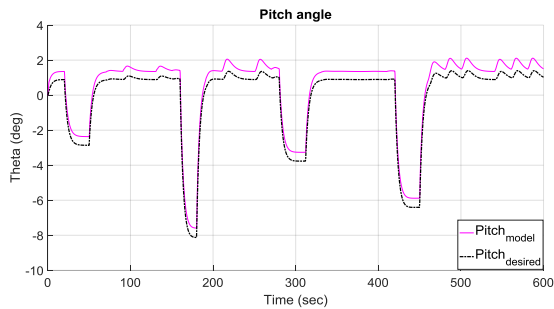
$$\dot{\bar{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{F}(t)\bar{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{G}(t)\bar{\mathbf{w}} \quad (17)$$

همچنین، فرض می‌گردد که بردار نویز دارای یک توزیع گاوسی سفید مستقل است [۲۰]:

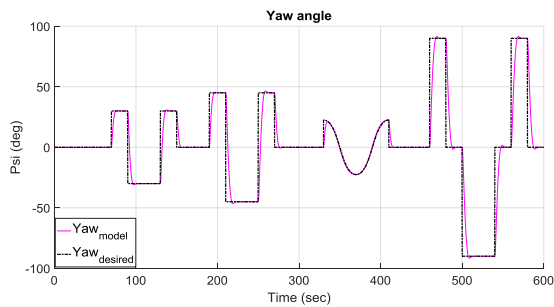
$$\bar{\mathbf{w}} \sim N(0_{6 \times 1}, \mathbf{Q}_{IMU}) \quad (18)$$



شکل (۴): موقعیت‌های مطلوب و واقعی در راستای عمق
(D)

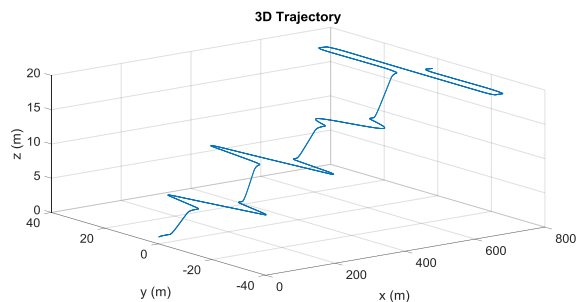


شکل (۵): زاویه فراز مطلوب و واقعی زیردریایی



شکل (۶): زاویه سمت مطلوب فرمان داده شده و زاویه واقعی سمت

مسیر حرکت زیردریایی در فضای سه‌بعدی، در دستگاه جغرافیایی، در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل (۷): مسیر حرکت زیردریایی در فضای سه‌بعدی (NED)

محدوده کوواریانس نویز اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است. در تمام شبیه‌سازی‌ها انحراف معیار اولیه برای موقعیت‌ها در سه راستای شمال، شرق و عمق برابر با $\sigma_{0,NED} = 0.7 \text{ m}$ ، انحراف معیار اولیه برای سرعت‌های خطی در راستای محورهای دستگاه بدنی برابر با $\sigma_{0,v} = 0.02 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ و انحراف معیار اولیه برای درایه‌های بردار کواترنین $\sigma_{0,q} = 0.5 \times \frac{\pi}{180}$ خواهد بود. بنابراین ماتریس کوواریانس خطای تخمین اولیه به شکل زیر در نظر گرفته شده است.

$$P_{init} = \begin{pmatrix} 0.49 \cdot I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 4} \\ 0_{3 \times 3} & 0.0004 \cdot I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 4} \\ 0_{4 \times 3} & 0_{4 \times 3} & 0.25 \times \left(\frac{\pi}{180}\right)^2 \cdot I_{4 \times 4} \end{pmatrix} \quad (22)$$

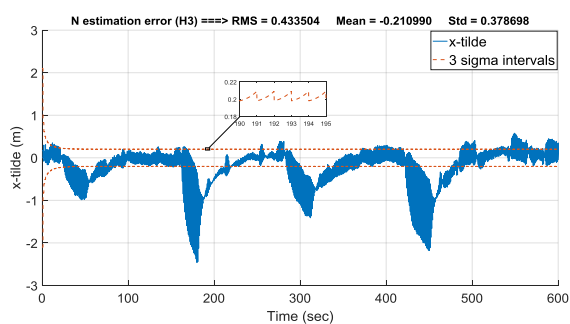
مقادیر انحراف معیار شتاب‌سنج‌ها و ژيروسکوپ‌های واحد اندازه‌گیر اینرسی برابر با $\sigma_a = 3.5 \text{ mg}$ و $\sigma_\omega = 0.05\%$ در نظر گرفته شده است. لذا کوواریانس نویز حسگر اینرسی برابر است با:

$$Q_{IMU} = \begin{pmatrix} (0.035)^2 \cdot I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & (0.05 \times \frac{\pi}{180})^2 \cdot I_{3 \times 3} \end{pmatrix} \quad (23)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله خواهیم پرداخت. در ابتدا خروجی‌های مربوط به شبیه‌سازی مدل دینامیکی زیردریایی در حالت نامی پس از اعمال فرمان‌ها مربوط به عمق و زاویه سمت زیردریایی، نشان داده می‌شود. در شکل ۴ موقعیت‌های مطلوب و واقعی زیردریایی در راستای عمق و در شکل ۵ زاویه فراز مطلوب زیردریایی که در حلقه درونی کنترل‌کننده عمق به دست آمده، به همراه مقدار واقعی این زاویه در نتیجه شبیه‌سازی مدل نشان داده شده است. همچنین زاویه سمت مطلوب فرمان داده شده و زاویه واقعی سمت زیردریایی در شکل ۶ نمایش داده شده است.

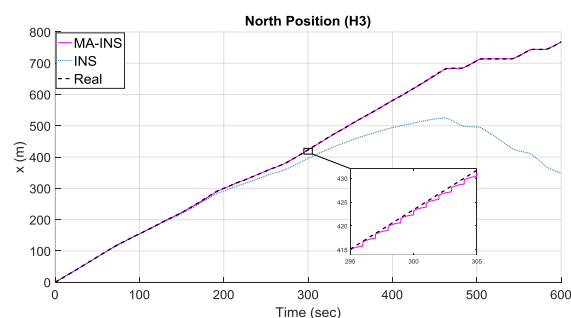
در شکل‌های ۱۱ الی **Error! Reference source not found.** خطای تخمین موقعیت وسیله در سه راستای ذکر شده حاصل از MA-INS به همراه محدوده تطابقی $\pm 3\sigma$ مربوط به کوواریانس خطای تخمین نمایش داده شده است. محدوده تطابقی $\pm \sigma$ خطای تخمین همان جذر مقادیر روی قطر اصلی ماتریس **P** است که در ضریب ۳ ضرب می‌شود. همان‌گونه که در ۱۱ ملاحظه می‌شود خطای تخمین موقعیت در راستای شمال، غیر از مواقعی که زیردریایی در صفحه عمق جابجایی داشته است کاملاً درون محدوده کوواریانسی قرار گرفته است.



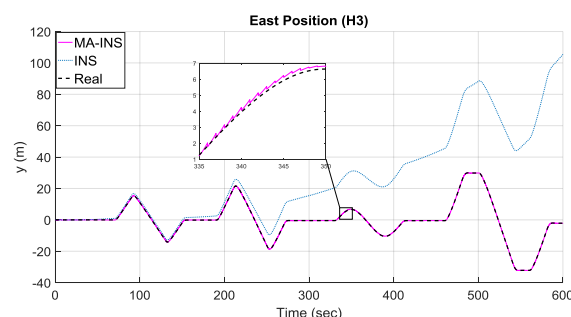
شکل (۱۱): خطای تخمین موقعیت در راستای شمال (N) حاصل از MA-INS

در مورد خطای تخمین موقعیت در دو راستای شرق و عمق نیز با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌گردد خطای تخمین در داخل محدوده کوواریانسی $\pm 3\sigma$ قرار گرفته و فیلتر عملکرد مناسبی را از خود نشان داده است و نتیجه حاصل از تخمین در تمام لحظات بهبود قابل توجهی را نسبت به خروجی ناوبری اینرسی نشان می‌دهد. در شکل‌های ۱۴ الی ۱۶ تخمین سرعت وسیله در ۳ راستا با استفاده از طرح ناوبری به کمک مدل نمایش داده شده و نمودار آن‌ها با نتیجه حاصل از به‌کارگیری ناوبری اینرسی مقایسه شده است.

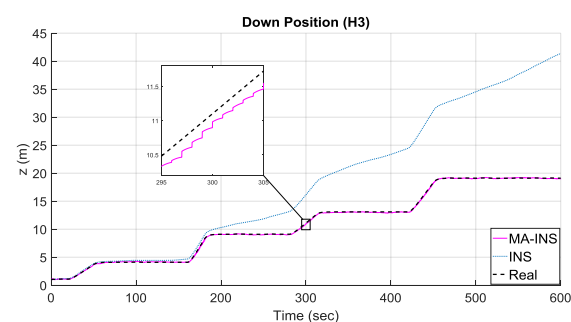
در شکل‌های (۹ - ۱۰) تخمین موقعیت وسیله در سه راستای شمال، شرق و عمق در طول مسیر طراحی شده با استفاده از طرح ناوبری به کمک مدل (MA-INS^۱) نشان داده شده است.



شکل (۸): موقعیت در راستای شمال (N) با استفاده از INS و MA-INS

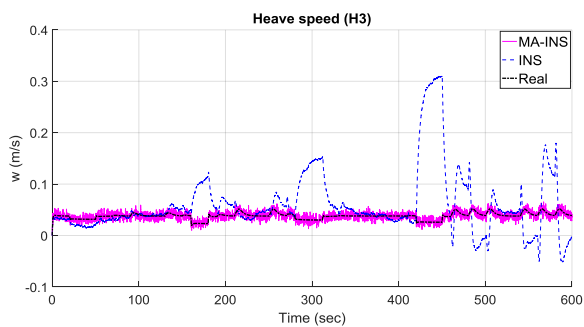


شکل (۹): موقعیت در راستای شرق (E) با استفاده از INS و MA-INS



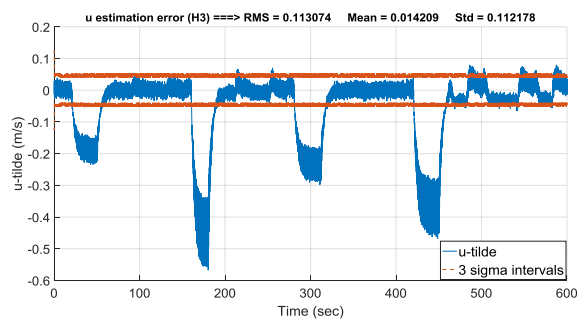
شکل (۱۰): موقعیت در راستای عمق (D) با استفاده از INS و MA-INS

^۱ Model Aided (MA)

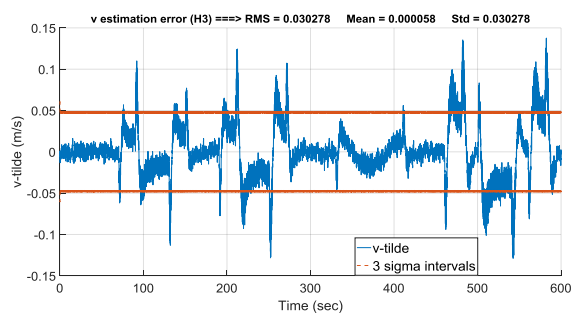


شکل (۱۶): سرعت Heave با استفاده از INS و MA-INS

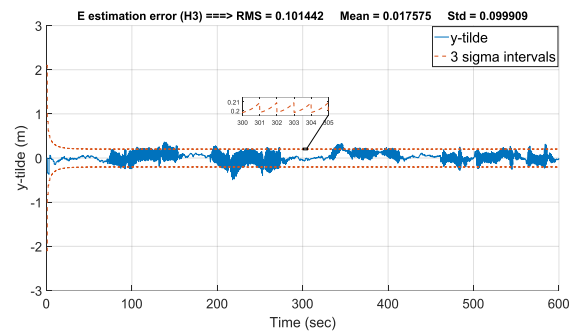
همان گونه که در نمودارهای فوق نیز مشهود است از آنجاکه در شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته در این بخش مشاهدات مربوط به سرعت‌های خطی حاصل از مدل دینامیکی زیردریایی به فیلتر ناوبری اعمال شده است، خطای تخمین سرعت‌ها خیلی کوچک است و می‌توان نتیجه گرفت فیلتر مورد نظر در مورد تخمین سرعت‌های خطی عملکرد مناسبی داشته است. در شکل‌های ۱۷ الی ۱۹ خطای تخمین سرعت خطی وسیله حاصل از طرح MA-INS به همراه محدوده تطابقی $\pm 3\sigma$ مربوط به کوواریانس خطای تخمین نمایش داده شده است.



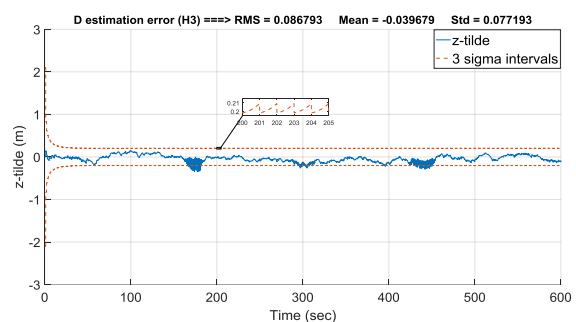
شکل (۱۷): خطای تخمین سرعت Surge حاصل از MA-INS



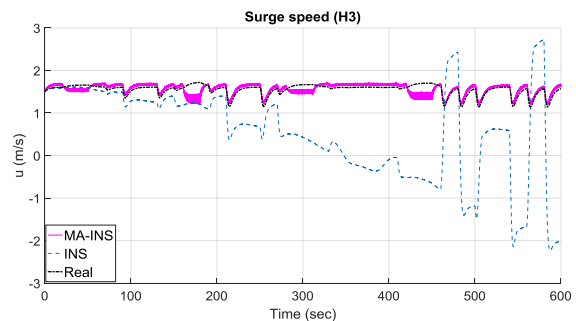
شکل (۱۸): خطای تخمین سرعت Sway حاصل از MA-INS



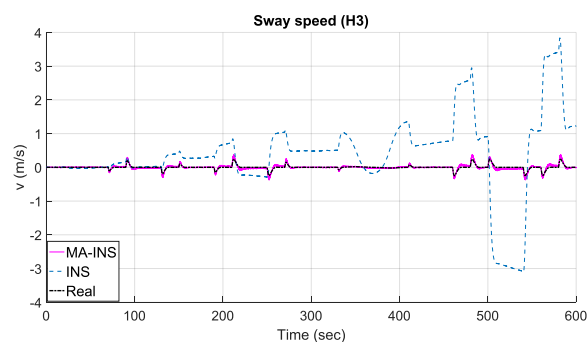
شکل (۱۹): خطای تخمین موقعیت در راستای شرق حاصل از MA-INS



شکل (۲۰): خطای تخمین موقعیت در راستای عمق حاصل از MA-INS



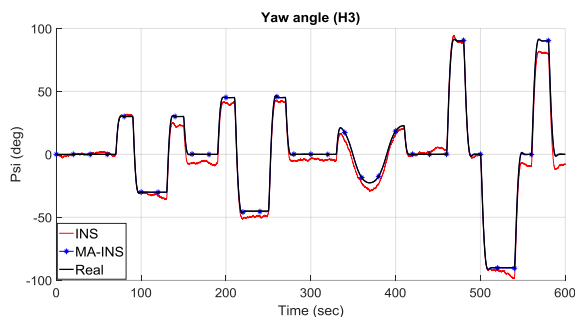
شکل (۲۱): سرعت Surge با استفاده از INS و MA-INS



شکل (۲۲): سرعت Sway با استفاده از INS و MA-INS

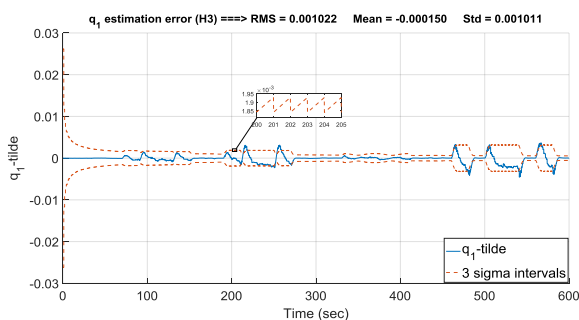
شکل (۲۱): زاویه فراز با استفاده از INS و MA-INS

از آنجاکه در شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته مشاهدات مربوط به بردار کواترنین بیان‌کننده وضعیت وسیله که از مدل دینامیکی حاصل گشته به فیلتر ناوبری اعمال شده است، لذا همان‌گونه که در نمودارهای فوق نیز مشهود است خطای تخمین وضعیت‌ها ناچیز بوده و می‌توان نتیجه گرفت فیلتر موردنظر در مورد تخمین زوایای اوپلر عملکرد مناسبی داشته و نتایج به‌دست‌آمده نسبت به خروجی‌های حاصل از ناوبری اینرسی دقیق‌تر می‌باشند.

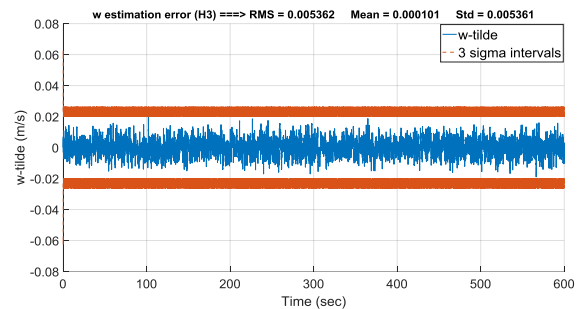


شکل (۲۲): زاویه سمت با استفاده از INS و MA-INS

در شکل‌های ۲۳ الی ۲۶ خطای تخمین درایه‌های بردار کواترنین بیان‌کننده وضعیت وسیله حاصل از طرح MA-INS به همراه محدوده تطابقی $\pm 3\sigma$ مربوط به کوواریانس خطای تخمین نمایش داده شده است. همان‌طور که در این نمودارها ملاحظه می‌شود خطای تخمین کاملاً درون محدوده تطابقی قرار گرفته است و باندهای کوواریانسی باگذشت زمان به یکدیگر نزدیک شده‌اند که نشان‌دهنده این است که فیلتر عملکرد بسیار خوبی داشته و به همگرایی در خطای تخمین منجر شده است.

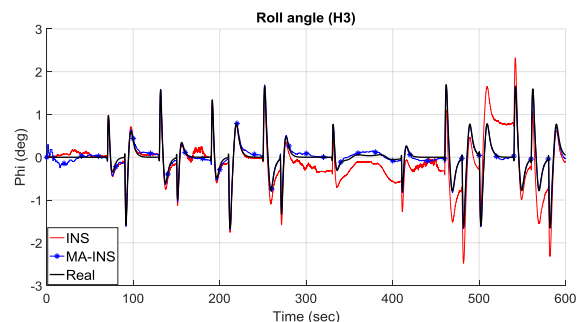


همان‌گونه که در نتایج مشاهده می‌شود خطای تخمین سرعت‌های خطی در سه محور غیر از مواقعی که زیردریایی در صفحات افقی و یا عمق جابجایی زیادی داشته، کاملاً درون محدوده کوواریانسی قرار گرفته‌است. علت افزایش خطای تخمین در هنگام جابجایی وسیله در صفحات افقی و یا عمق را می‌توان به عملکرد کنترل‌کننده مرتبط دانست.

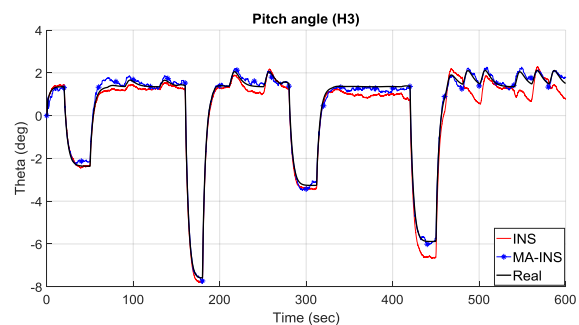


شکل (۱۹): خطای تخمین سرعت Heave حاصل از MA-INS

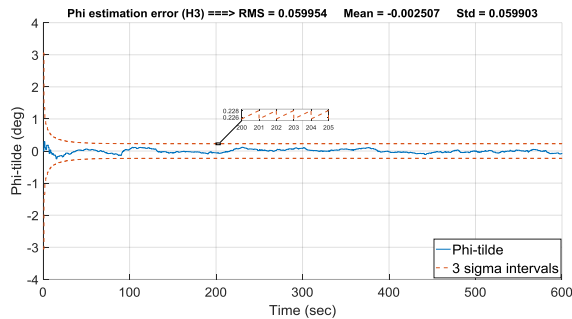
در شکل‌های ۲۰ الی ۲۲ تخمین وضعیت وسیله (زوایای اوپلر) در طول مسیر طراحی‌شده با استفاده از طرح ناوبری به کمک مدل نشان داده شده است و نمودار آن‌ها با نتیجه حاصل از به‌کارگیری سامانه ناوبری اینرسی به‌تنهایی، مقایسه شده است.



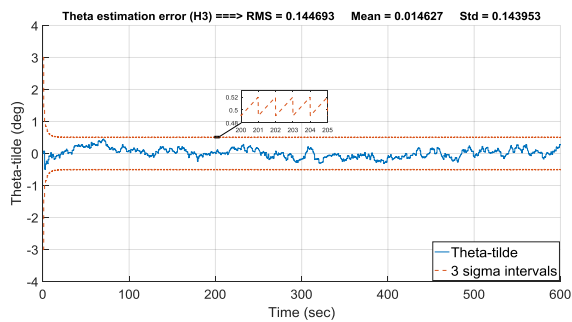
شکل (۲۰): زاویه چرخ با استفاده از INS و MA-INS



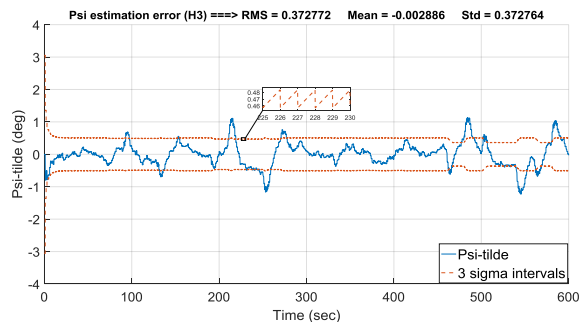
به وضعیت وسیله، در زمینه تخمین زوایای اوپلر نیز عملکرد خوبی داشته است.



شکل (۲۷): خطای تخمین زاویه رول حاصل از MA-INS



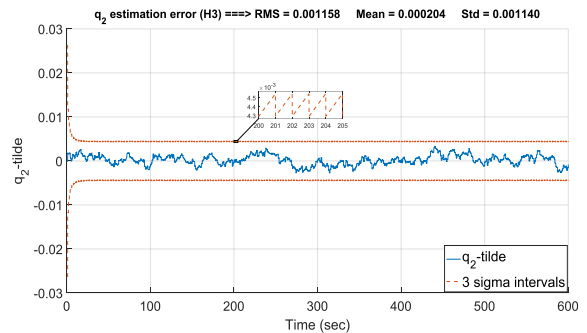
شکل (۲۸): خطای تخمین زاویه فراز حاصل از MA-INS



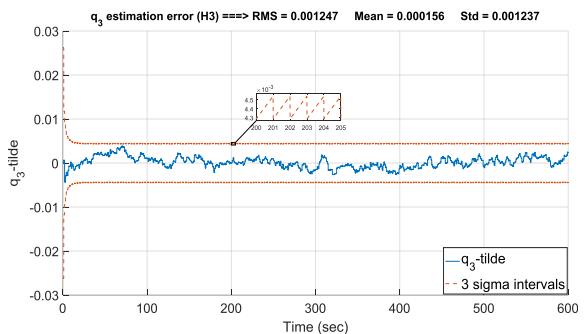
شکل (۲۹): خطای تخمین زاویه سمت حاصل از MA-INS

در ادامه برای بررسی عملکرد فیلتر طراحی شده، نتایج حاصل از سامانه ناوبری اینرسی به کمک مدل دینامیکی با فرض ۲۰ درصد عدم قطعیت در ضرایب هیدرودینامیکی مدل زیردریایی نمایش داده می‌شود. در شکل‌های ۳۰ الی ۳۲ نتایج تخمین موقعیت در سه محور نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که فیلتر با وجود نامعینی در ضرایب نیز عملکرد قابل قبولی دارد. اما، مقدار خطا در مقایسه با حالتی که نامعینی در ضرایب وجود ندارد افزایش

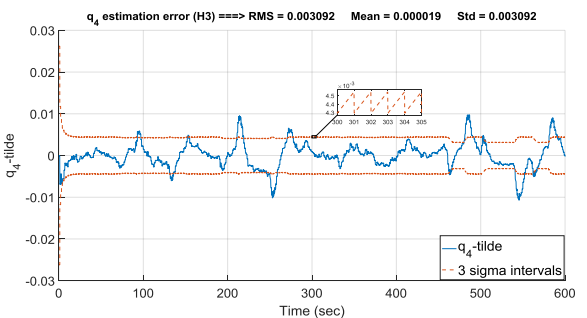
شکل (۲۳): خطای تخمین درایه q_1 کوتاهترین حاصل از MA-INS



شکل (۲۴): خطای تخمین درایه q_2 کوتاهترین حاصل از MA-INS

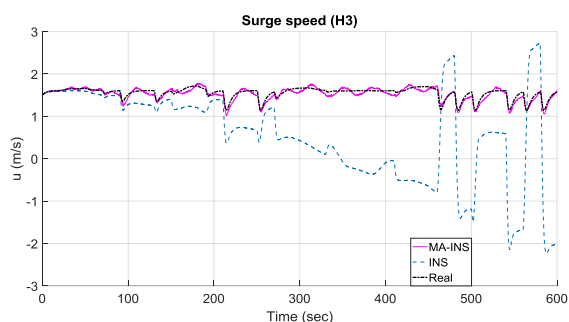


شکل (۲۵): خطای تخمین درایه q_3 کوتاهترین حاصل از MA-INS

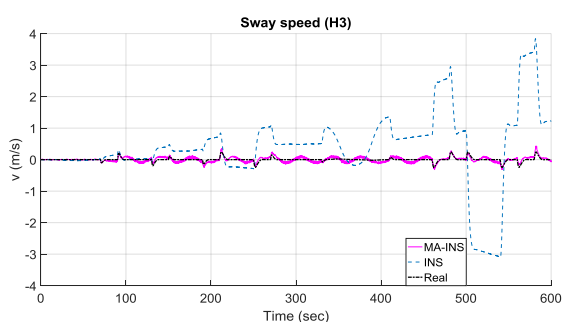


شکل (۲۶): خطای تخمین درایه q_4 کوتاهترین حاصل از MA-INS

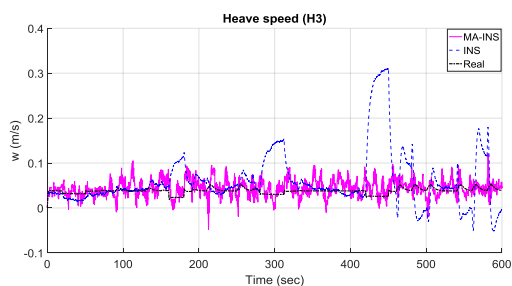
همچنین خطای تخمین زوایای اوپلر زیردریایی نیز به همراه محدوده کوواریانسی $\pm 3\sigma$ در شکل‌های ۲۷ الی ۲۹ نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای زیر مشاهده می‌شود که خطای تخمین این زوایا درون محدوده کوواریانسی قرار گرفته و فیلتر موردنظر به دلیل وجود مشاهدات مربوط



شکل (۳۳): سرعت Surge با استفاده از INS و MA-INS با وجود عدم قطعیت ضرایب.



شکل (۳۴): سرعت Sway در راستای عمق (D) با استفاده از INS و MA-INS با وجود عدم قطعیت ضرایب.

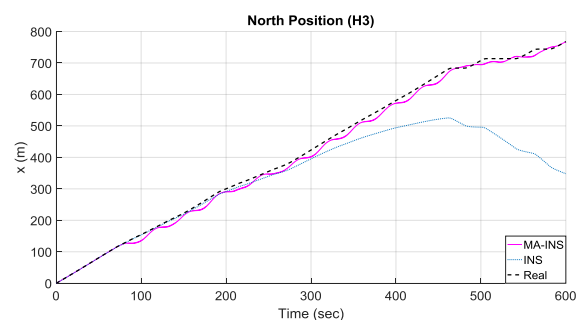


شکل (۳۵): سرعت Heave با استفاده از INS و MA-INS با وجود عدم قطعیت ضرایب.

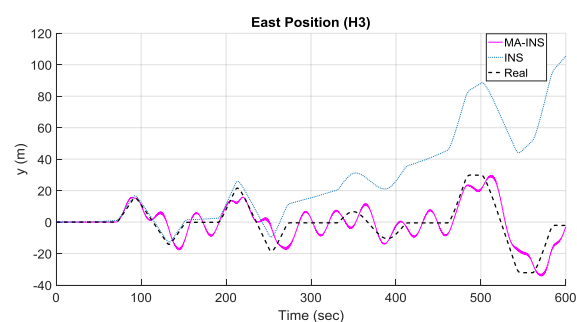
۵- نتیجه‌گیری

در این کار ایده و مفهوم استفاده از مدل دینامیکی وسیله نقلیه برای کمک به سامانه ناوبری اینرسی دنبال شد. استفاده از مدل دینامیکی وسیله به‌عنوان منبع اطلاعات برای کمک به راه‌حل ناوبری اینرسی این مزیت را دارد که از آنجا که کلیه متغیرهای موردنیاز برای اجرای آن معمولاً برای اهداف کنترلی اندازه‌گیری می‌شود، نیازی به

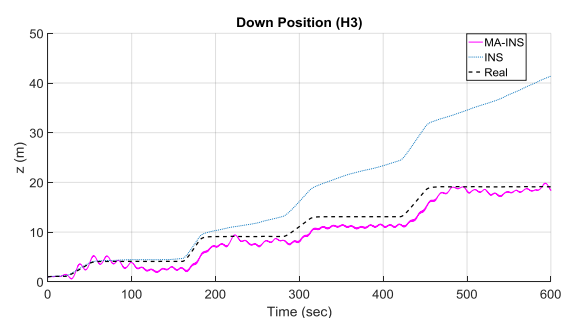
یافته است. در شکل‌های ۳۳ الی ۳۵ نتایج تخمین سرعت‌ها در سه محور نشان داده شده است.



شکل (۳۰): موقعیت در راستای شمال (N) با استفاده از INS و MA-INS با وجود عدم قطعیت ضرایب.



شکل (۳۱): موقعیت در راستای شرق (E) با استفاده از INS و MA-INS با وجود عدم قطعیت ضرایب.



شکل (۳۲): موقعیت در راستای عمق (D) با استفاده از INS و MA-INS با وجود عدم قطعیت ضرایب.

8. Fossen, T.I., "Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control", John Wiley & Sons, 2011.
9. Fossen, T.I., "How to Incorporate Wind, Waves and Ocean Currents in the Marine Craft Equations of Motion", IFAC Proc. Vol. 45, pp. 126–131, Jan 2012.
10. Hegrenæs, Ø., Hallingstad, O., "Model-Aided INS with Sea Current Estimation for Robust Underwater Navigation", IEEE J. Ocean. Eng., Vol.36, No.2, pp. 316–337, 2011.
11. Hegrenæs, O., Berglund, E., Hallingstad, O., "Model-Aided Inertial Navigation for Underwater Vehicles", IEEE International Conference on Robotics and Automation. pp. 1069–1076, May 2008.
12. Lv, P.F., He, B., Guo, J., Shen, Y., Yan, T.H. and Sha, Q.X., "Underwater Navigation Methodology Based on Intelligent Velocity Model for Standard AUV", Ocean Eng., Vol.202, No.15, pp.1-13, 2020.
13. Karmozdi, A., Hashemi, M., Salarieh, H., Alasty, A., "INS-DVL Navigation Improvement Using Rotational Motion Dynamic Model of AUV", IEEE Sens. J., Vol. 20, No.23, pp. 14329–14336, 2020.
14. Oertel, D., "Deep-Sea Model-Aided Navigation Accuracy for Autonomous Underwater Vehicles Using Online Calibrated Dynamic Models", Doctoral dissertation, KIT-Bibliothek, 2018.
15. Devices, A., "IMU ADIS164890, technical documentation/data-sheets", <http://www.Analog.Com>, July 2018.
16. Titterton, D., Weston, J.L. and Weston, J., "Strap down Inertial Navigation technology", Vol. 17, IET Press, 2004.
17. Farrell, J., "Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors", McGraw-Hill, Inc. 2008.
18. Geridönmez, F., "Simulation of Motion of an Underwater Vehicle", Master's thesis, Middle East Technical University, 2007.
19. Prestero, T.T.J., "Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle", Doctoral dissertation, Massachusetts institute of technology, 2001.
20. Pinheiro, B.C., Moreno, U.F., de Sousa, J.T.B., Rodriguez, O.C., "Kernel-Function-Based Models for Acoustic Localization of Underwater Vehicles", IEEE J. Ocean. Eng. Vol. 42, No.1, pp. 603–618, 2016.
21. Brown, R.G., Hwang, P.Y.C., "Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering: With MATLAB Exercises", J Wiley & Sons, 2012.
22. Laguardia, A.S.M., Sahli, H., "Model Aided Inertial Navigation for AUV", Editorial Universitaria, 2015.

سخت‌افزار اضافی ندارد و پتانسیل متکی به خود بودن را دارد. برای سامانه‌هایی با محدودیت حسگرها، ناوبری به کمک مدل می‌تواند قابلیت‌های ناوبری را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد. در اینجا با استفاده از فیلتر کالمن غیرخطی، مدل دینامیکی زیردریایی ریموس ۱۰۰ و واحد اندازه‌گیر اینرسی مبتنی بر ممز با شماره ADIS16490 یک الگوریتم تلفیق اطلاعات مبتنی بر مدل با در نظر گرفتن نامعینی ضرایب مدل توسعه داده شده است. نتایج نشان داد که خطای موجود در تخمین حالات ناوبری در سامانه تلفیقی به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از سامانه ناوبری اینرسی تنها در طول زمان‌هایی است که در آن اندازه‌گیری‌های موقعیت، سرعت و وضعیت وجود ندارد. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که صرفاً با افزودن نرم‌افزار مدل سامانه می‌توان دقت یک سامانه ناوبری را به شکل قابل قبولی با استفاده از خروجی یک مدل وسیله نقلیه با وجود نامعینی در مدل بهبود بخشید.

۶- مراجع

1. Hegrenæs, Ø., Hallingstad, O., Gade, K., "Towards Model-Aided Navigation of Underwater Vehicles", MIC-journal, Vol. 28, no. 4, pp. 113–123, 2007.
2. Koifman, M., Bar-Itzhack, I.Y., "Inertial Navigation System Aided by Aircraft Dynamics. IEEE Trans. Control Syst. Technol. , Vol. 7, No. 4, pp. 487–493, 1999.
3. Koifman, M., Merhav, S.J., "Autonomously Aided Strap down Attitude Reference System", J. Guid. Control. Dyn, Vol. 14, No. 6, pp. 1164–1172, 1991.
4. Vasconcelos, J.F., Silvestre, C., Oliveira, P., Guerreiro, B., "Embedded UAV Model and LASER Aiding Techniques for Inertial Navigation Systems", Control Eng. Pract. Vol. 18, No. 3, pp. 262–278, 2010.
5. Julier, S.J., Durrant-Whyte, H.F., "Horizontal Model Fusion Paradigm", Navigation and Control Technologies for Unmanned Systems, Vol. 2738, No. 1, pp. 37–48, 1996.
6. Bryson, M., Sukkarieh, S., "Vehicle Model Aided Inertial Navigation for a UAV Using Low-Cost Sensors", Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation. pp. 1–9, Dec 2004.
7. Sendobry, A., "A Model Based Navigation Architecture for Small Unmanned Aerial Vehicles", Proceedings of the European Navigation Conference, London, UK, Nov 2011.

ضمیمه الف

ضرایب نیرو، ممان و مشخصات جرمی زیردریایی ریموس ۱۰۰ در جدول ضمیمه ۱ بیان شده است:

جدول ضمیمه (۱): ضرایب نیرو، ممان و مشخصات جرمی ریموس ۱۰۰ [۱۹]

واحد	مقدار	پارامتر
kg	-9.3×10^{-1}	$X_{\dot{u}}$
kg	-3.55×10^1	$Y_{\dot{v}}$
kg	-3.55×10^1	$Z_{\dot{w}}$
kg.m	-1.93	$M_{\dot{w}}$
kg.m	1.93	$N_{\dot{v}}$
kg.m ² /rad	-1.41×10^{-2}	$K_{\dot{p}}$
kg.m ² /rad	-4.88	$N_{\dot{r}}$
kg.m ² /rad	1.93	$Y_{\dot{r}}$
kg.m ² /rad	-1.93	$Z_{\dot{q}}$
kg.m ² /rad	-4.88	$M_{\dot{q}}$
kg.m ²	1.77×10^{-1}	I_{xx}
kg.m ²	3.45	I_{yy}
kg.m ²	3.45	I_{zz}
kg	30.51	m
m	0	x_g
m	0	y_g
m	1.96×10^{-2}	z_g