

تشخیص و ردیابی اشیا در قایق ربات خودران با استفاده از بینایی استریو

الهام عمرانی^۱، حسین موسی زاده^۲، محمود امید^۳، مهدی طالع ماسوله^۴

hmousazade@ut.ac.ir

- ۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، بیوسیستم، دانشگاه تهران
- ۲- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، بیوسیستم، دانشگاه تهران
- ۳- استاد دانشکده مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران
- ۴- استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران

چکیده

امروزه یکی از چالش‌های اصلی در حوزه دریایی، کنترل و پایش بنادر در شرایط آب و هوایی متفاوت می‌باشد که برای این منظور از قایق ربات‌های خودران استفاده می‌شود. در این تحقیق، که بخشی از پروژه قایق ربات مروارید می‌باشد، از سیستم بینایی استریو بمنظور تشخیص، مکان‌یابی و ردیابی زمان-واقع اشیا استاتیک و دینامیک در قایق ربات خودران مروارید استفاده شد. بمنظور ارزیابی الگوریتم ارائه شده، دو سری آزمایش طراحی و اجرا شدند؛ در آزمایش اول، قایق ربات کنار سایر قایق‌های ثابت یا دیواره‌های اسکله حرکت کرد تا اشیا ثابت را مکان‌یابی کند. در آزمایش دوم نیز یک قایق هدف مجهز به RTK-GPS در نظر گرفته شد تا دقت الگوریتم در ردیابی آن سنجیده شود. نتایج تحقیق در قالب نقشه ارتفاعی دیجیتال و ترسیم مسیر طی شده توسط قایق ربات و قایق هدف ارائه شد. دقت ردیابی سیستم استریو نسبت به RTK-GPS ارزیابی شد که حداقل خطای سیستم استریو در ردیابی، مقدار ۱/۵۷۵ متر بدست آمد که این میزان خطا توسط فیلتر کالمن به مقدار ۰/۶۶۲۱ متر کاهش پیدا کرد.

واژگان کلیدی: دوربین استریو، مکان‌یابی، ردیابی اشیا، نقشه ارتفاعی دیجیتال، فیلتر کالمن توسعه یافته.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۸/۰۱/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۰۶/۰۴

۱- مقدمه

در الگوریتم‌های تشخیص مانع، با توجه به اینکه بخش بزرگی از حوزه دید ربات، زمین یا دریا می‌باشد، حذف داده‌های پس زمینه سرعت الگوریتم را افزایش می‌دهد. سه روش برای شناسایی پس زمینه بر اساس دید استریو وجود دارد؛ محاسبه نقشه ۷-تمایز، تبدیل تصویری^۸، و منطبق کردن صفحه^۹. الگوریتم نقشه ۷-تمایز بدون استفاده از اطلاعات قبلی از صحنه انجام می‌شود، اما سایر روش‌ها برای محیط‌های خاص که از قبل تنظیم شده‌اند، مناسب هستند. مقادیر نقشه تمایز، حاصل اختلاف مکانی تصاویر سمت راست و چپ می‌باشد. درحالی‌که نقشه ۷-تمایز با جمع‌آوری پیکسل‌های با مقادیر یکسان در یک ردیف افقی نقشه تمایز ایجاد می‌شود که در نتیجه هر سطح در میدان دید، در یک بخش باریک در تصویر ۷-تمایز قرار می‌گیرد. برای جزئیات بیشتر به منبع [۸] مراجعه شود. در این پژوهش از روش اجماع نمونه‌های تصادفی (RANSAC) و ۷-تمایز برای جدا کردن سطح دریا و از روش نقشه اشغال احتمالی برای تشخیص موانع و از تلفیق پارامترهای رنگی و فیلتر ذره‌ای برای ردیابی استفاده شد.

هانترزبرگر و همکاران [۲]، یک سیستم متشکل از دو جفت دوربین استریو (چهار عدد حسگر) چپ و راست (برای افزایش حوزه دید) برای تشخیص موانع در محیط دریا استفاده کردند. آن‌ها توانستند نقشه‌ی دوبعدی محیط را ترسیم و لیست اشیا موجود (موقعیت و سرعت اشیا) در محیط را تولید کنند. در این تحقیق نویسندگان از موانع ایستاد صرف نظر کردند و فقط اشیا دینامیکی موجود در محیط را ردیابی کردند [۲]. وانگ و وی^{۱۰} در سال ۲۰۱۳ یک الگوریتم را برای تشخیص یک شی در فاصله‌ی ۲۰۰-۲۰ متری در یک قایق ربات با استفاده از دوربین استریو ارائه دادند [۹]. در این پژوهش، نویسندگان توانستند ۳۰ فریم در ثانیه پردازش کنند. همچنین وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ در تحقیقی جدید توانستند دقت الگوریتم ارائه شده در سال ۲۰۱۳ را افزایش دهند [۱۰]. در تحقیق انجام شده توسط تانگ و همکاران، یک الگوریتم به نام LROABRA برای ربات‌های شناور با سرعت بالا پیشنهاد شد. محققان

پایش و کنترل دریا در شرایط آب و هوایی متفاوت کاری بسیار سخت، زمان‌بر و خطرناک است که این امر می‌تواند با استفاده از وسایل خودران با هزینه کمتر و دقت بالاتری انجام گیرد [۱]. برای انجام ماموریت‌های مختلف، قایق‌های خودران به حسگرهای ناوبری متفاوتی برای گزارش موقعیت و شرایط اطراف مجهز می‌شوند [۲ و ۳]. قابل اطمینان بودن سیستم ناوبری خودران، اهمیت زیادی در توسعه ربات‌های خودران دارد. علاوه بر این، سامانه‌های ناوبری باید مبتنی بر تشخیص و اجتناب از موانع موجود در محیط طراحی شوند [۴]. الگوریتم اجتناب از مانع در ربات‌های خودران از دو قسمت اصلی مسیریابی جهانی^۱ و الگوریتم شناسایی موانع محلی تشکیل شده است. امروزه از حسگرهای موقعیت‌یابی جهانی^۲ (GPS) برای مسیریابی جهانی، و رادار، لیزر، دوربین و برخی حسگرهای دیگر برای تشخیص موانع محلی استفاده می‌شود. در مقایسه با حسگرهای دیگر، دوربین‌ها هزینه پایینی دارند و می‌توانند اطلاعات بسیار بیشتری را در یک تصویر ارائه کنند، اما دقت تشخیص در فاصله‌های زیاد، کم می‌شود [۵].

مسیریابی علاوه بر تعیین کوتاه‌ترین مسیر برای هدف مورد نظر، در واقع شامل مراحل تشخیص، ردیابی و اجتناب از اشیا استاتیکی و دینامیکی نیز می‌شود. الگوریتم‌های تشخیص اشیا در حوزه‌ی بینایی استریو شامل چهار روش اصلی می‌باشند: نقشه اشغال احتمالاتی^۳، نقشه ارتفاعی دیجیتال^۴، تقسیم جریان صحنه^۵، و خوشه بندی مبتنی بر هندسه^۶ [۶ و ۷]. ردیابی در واقع پیش بینی مکان بعدی شی مورد نظر می‌باشد که روش‌های مختلفی برای ردیابی اشیا هدف و تخمین وضعیت بعدی سیستم‌های پویا وجود دارد که فیلتر کالمن الگوریتمی است که حالت یک سیستم پویا را با استفاده از مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های شامل خطا در طول زمان برآورد می‌کند و در مسیریابی و پایش وسایل نقلیه کاربرد دارد. فیلتر کالمن توسعه یافته^۷ یک ابزار قابل اعتماد و قدرتمند است که اخیراً نتایج خوبی در ردیابی هدف نشان داده است.

⁶ Geometry-based Cluster

⁷ Extended Kalman Filter

⁸ Projective Transformation

⁹ Plane Fitting

¹⁰ Wei

¹ Global Path Planning

² Global Positioning System

³ Probabilistic Occupancy Map

⁴ Digital Elevation Map

⁵ Scene Flow Segmentation

تی‌سای^{۱۱}. روش تی‌سای نسبت به روش ژنگ در بازسازی فضای سه‌بعدی دقت کمی دارد [۱۳].

پس از کالیبراسیون دوربین، در ادامه الگوریتم‌های مورد استفاده در بینایی توضیح داده می‌شود. یکی از روش‌های کارا در داده کاوی، روش خوشه‌بندی K- میانگین می‌باشد که این روش یک روش تجزیه و تحلیل خوشه‌ای است که N داده را به k خوشه، که در آن هر داده متعلق به یک خوشه با نزدیک‌ترین متوسط است، تقسیم‌بندی نماید.

همانطور که در بحث قبلی مطرح شد، یکی از مراحل اصلی مسیریابی ربات، تشخیص، مکان‌یابی و ردیابی اشیاء استاتیک و دینامیک موجود در محیط می‌باشد. همچنین با توجه به منابع بررسی شده، تشخیص و مکان‌یابی اشیاء با استفاده از بینایی استریو، در محیط واقعی که بتواند به صورت زمان واقعی موانع را ردیابی نماید از اصلی‌ترین چالش‌های قایق ربات‌ها می‌باشد که در تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر تنها ردیابی یک شی در نظر گرفته شده و از اشیاء استاتیک موجود در محیط صرف نظر شده است. فلذا عمده‌ترین هدف این پژوهش، توسعه الگوریتم مبتنی بر بینایی استریو جامع‌تری است تا بتواند بطور همزمان اشیاء استاتیک را تشخیص و مکان‌یابی کرده و شی دینامیک را بصورت زمان-واقع در محیط واقعی در یک قایق ربات ردیابی نماید.

پس از توضیحات مقدماتی، ادامه مقاله به صورت زیر بخش‌بندی شده است: در بخش ۲ به توضیح دقیق مواد و روش‌ها پرداخته می‌شود. در بخش ۳ نتیجه و بحث حاصل از پژوهش ارائه شده و در نهایت در بخش ۴ نتیجه‌گیری کلی آورده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر بخشی از پروژه قایق ربات مروراید می‌باشد. در این بخش به توصیف اجزای قایق ربات مورد نظر و در ادامه در بخش ۲-۱ جزئیات معماری سخت افزاری و در بخش ۲-۲ جزئیات الگوریتم پیشنهادی توضیح داده خواهد شد.

مدل حالت ایستای جهت^۱ (DSSM) و مدل سرعت جابجایی^۲ (TVM) را برای به دست آوردن زاویه و سرعت حرکت موانع متحرک طراحی کردند [۱۱]. در پژوهشی دیگر، سینسترا^۳ و همکاران یک الگوریتم برای ردیابی یک قایق هدف ارائه دادند. آنها از روش‌های ردیاب رنگی^۴ و ردیابی-یادگیری^۵ برای تشخیص و ردیابی قایق هدف و از روش فیلتر کالمن توسعه یافته برای به حداقل رساندن خطاهای اندازه‌گیری بینایی استریو و بهبود دقت تخمین حالت استفاده کردند. شین^۶ و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۸ از دوربین استریو برای تشخیص و ردیابی کشتی‌ها در دریا استفاده کردند. نویسندگان در الگوریتم پیشنهادی از روش کالیبراسیون اتوماتیک، نقشه اشغال احتمالی و الگوریتم بی‌بیزین استفاده کردند و اثبات کردند که دوربین استریو با بیس‌لاین^۷ سه متری می‌تواند کشتی‌های تا فاصله ۵۰۰ متری را با دقت خوبی تشخیص و ردیابی کند. در پژوهشی دیگر بووکاون^۸ و همکاران در سال ۲۰۱۸ یک سیستم استریوی مجهز به واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) برای تشخیص موانع در یک قایق خودران ارائه دادند. در این مدل، نویسندگان از داده‌های IMU و روش تقسیم‌بندی معنایی^۹ به ترتیب برای تخمین محل خط افق و تشخیص سطح آب و اشیاء موجود استفاده کردند. نتایج تجربی نشان داد که الگوریتم پیشنهادی به طور قابل توجهی توانست دقت تشخیص اشیاء را افزایش دهد [۱۲].

گام اول برای استفاده از دوربین استریو کالیبره کردن دوربین می‌باشد. در کالیبره کردن دوربین از پارامترهای داخلی و خارجی دوربین استفاده می‌شود. پارامترهای داخلی دوربین، مشخصات نوری و هندسی داخلی دوربین را بیان می‌کند و شامل فاصله کانونی، ضرایب مقیاس، اعوجاج شعاعی و مماسی و مرکز تصویر می‌باشد. پارامترهای خارجی، موقعیت و جهت سه‌بعدی دوربین را نسبت به دستگاه مختصات مرجع (جهانی) و فاصله‌ی بین دو دوربین^{۱۰} مشخص می‌کند که شامل ماتریس دوران و بردار انتقال می‌باشد. دو روش برای کالیبره کردن دوربین وجود دارد: روش ژنگ و روش

^۷ Baseline

^۸ Bovcon

^۹ semantic segmentation

^{۱۰} Baseline

^{۱۱} Tsai

^۱ Direction Steady-State Model

^۲ Translational Velocity Model

^۳ Sinisterra

^۴ color tracker

^۵ Tracking-Learning-Detector (TLD)

^۶ Shin

قاب در قسمت جلویی لنز دوربین‌ها از شیشه استفاده شد تا مشکلی در دید دوربین ایجاد نکند. تصاویر دوربین به صورت همزمان با سرعت ۵۰ فریم در ثانیه گرفته می‌شوند. این سیستم دو لنز ۱۲ میلی‌متری دارد و دوربین‌ها به صورت افقی با فاصله^۵ ۲۵ سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفتند. این دستگاه از طریق دو کابل USB3 به کامپیوتر صنعتی^۶ (IPC) متصل می‌شود که مشخصات سیستم بینایی و IPC در جدول (۱) داده شده است. تصاویر سمت چپ و راست توسط دوربین‌ها گرفته شده و سپس برای انجام محاسبات، تصاویر وارد IPC شده و موقعیت موانع یا اهداف مورد نظر شناسایی می‌شوند.

جدول (۱) مشخصات سیستم بینایی.

مشخصات دوربین استریو Karmin		مشخصات کامپیوتر صنعتی	
e2V EV76C570 CMOS	نوع حسگر دوربین	Intel Core™ i7-2610UE 1/5 Ghz	CPU
25 cm	خط مبنای دوربین	DDR3 2GB	حافظه
12 mm	فاصله کانونی		
1600*1200 pixels	تفکیک پذیری	Windows 7, 64-bit	سیستم عامل
Global shutter	نوع شاتر		
۶۵	محدوده دید افقی(درجه)		



الف) دوربین استریو



ب) محل قرارگیری دوربین بر روی قایق

شکل (۱) دوربین استریو و موقعیت دوربین بر روی قایق ربات.

قایق ربات مروارید^۱ به منظور تهیه نقشه هیدروگرافی و نظارت بر بنادر در کارگاه مکترونیک گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تهران طراحی و ساخته شد [۱۴]. مروارید یک قایق کاتاماران خودران با سرعت کم با ابعاد ۳/۸، ۲/۴ و ۱/۵ متر برای طول، عرض و ارتفاع است که وزن آن حدود ۷۰۰ کیلوگرم می‌باشد. این قایق ربات به یک باتری لیتیوم یون ۶ کیلووات ساعت مجهز شده است که شارژ باتری هم توسط برق شهری و هم توسط انرژی خورشیدی انجام می‌شود [۱۵ و ۱۶]. قایق ربات مروارید، دارای چهار حالت ناوربی مختلف است؛ حالت دستی، کنترل از راه دور، رابط کاربری گرافیکی و حالت خودکار. ربات مجهز به حسگرهای ادراک محلی مانند لیدار^۲، مجموعه‌ای از حسگرهای اولتراسونیک، یک دوربین مادون قرمز و دوربین استریو و حسگر نظارت جهانی مانند GNSS است که عملیات هیدروگرافی را با سه حسگر سونار اسکنر عمق تک پرتوی انجام می‌دهد [۱۷]. در این مقاله، جزئیات بینایی استریو برای تشخیص و ردیابی اشیاء موجود در محیط توضیح داده شده است.

۲-۱- معماری سخت افزار

در این تحقیق به منظور تشخیص موانع، از دوربین استریو کارمین^۳ ساخته شده توسط شرکت نرین^۴ در کشور آلمان استفاده شد [۱۸] که تصویر این دوربین و محل نصب آن بر روی قایق در شکل (۱-الف) و (ب) ارائه شده است. محل نصب دوربین در وسط ربات قرار گرفت تا دوربین بتواند بصورت متقارن اطراف را پایش نماید. ارتفاع و زاویه دید دوربین نیز از سطح زمین باید طوری باشد که بیشترین دید را نسبت به مسیر داشته باشد. همچنین دوربین نباید در مقابل تابش مستقیم نور خورشید قرار گیرد چون تابش مستقیم نور خورشید به لنز دوربین باعث بروز خطا خواهد شد. بنابراین دوربین در زیر پنل خورشیدی قرار گرفت تا هم بهترین دید را نسبت به مسیر داشته باشد و همچنین از تابش مستقیم خورشید محفوظ بماند. همچنین یک محفظه‌ای از جنس فایبرگلاس به منظور حفاظت دوربین از باران یا خطرات احتمالی برای دوربین ساخته شد که در طراحی این

⁴ Nerian

⁵ Baseline

⁶ Industrial personal computer (IPC)

¹ <http://eMorvarid.ut.ac.ir>

² Lidar

³ Karmin

۲-۲- الگوریتم پیشنهادی

پس از تعیین مکان مناسب و نصب دوربین، الگوریتم‌ها جهت بکارگیری بینایی استریو پیاده سازی شدند. بینایی استریو شامل استخراج اطلاعات سه بعدی اجسام موجود در محیط با پردازش دو یا چند تصویر گرفته شده از محیط می‌باشد. ورودی‌های سیستم استریو تصاویر گرفته شده توسط دوربین‌های چپ و راست و پارامترهای دوربین می‌باشند. پس از کالیبره کردن دوربین، یکسوسازی تصاویر و ایجاد نقشه تمایز، پیکسل‌های مربوط به سطح دریا با استفاده از روش ۷-تمایز حذف شده، سپس با استفاده از نقشه ارتفاعی دیجیتال، موانع شناسایی شده است. در نهایت خروجی فلوچارت موقعیت، اندازه و تعداد موانع استاتیک و پویا است. در ادامه جزییات این مراحل شرح داده شده است:

۲-۲-۱- کالیبراسیون دوربین

برای محاسبه نقشه تمایز دقیق، اعوجاج‌ها در مرحله کالیبراسیون حذف می‌شوند. در واقع کالیبراسیون دوربین، فرایند تخمین پارامترهای داخلی و خارجی و حذف اعوجاج لنزهای سامانه تصویربرداری است. در این تحقیق از روش ارائه شده توسط ژنگ^۲ برای کالیبراسیون دوربین‌ها استفاده شده است زیرا در مباحث عملی کارایی و دقت بالایی دارد [۱۹].

برای کالیبراسیون، با توجه به پارامترهای دوربین، از صفحه شطرنجی‌های با ابعاد متفاوت استفاده می‌شود [۲۰]. در این تحقیق دقت کالیبراسیون با صفحه شطرنجی‌های با ابعاد ۲۰*۳۰، ۴۰*۶۰ و ۷۰*۱۱۰ سنجیده شد که بالاترین دقت کالیبراسیون مربوط به ابعاد ۷۰*۱۱۰ سانتی‌متر بود.

پیکربندی کاملاً هم‌تراز در یک سامانه تصویربرداری استریو بسیار مشکل است چرا که تقریباً هیچ وقت (بدلیل عدم دقت در ساخت دوربین) دو دوربین دقیقاً هم‌صفحه و صفحات تصویر هم ردیف نیستند و تصاویر باید یکسو یا هم ردیف شوند. بنابراین از الگوریتم بوگت^۳ به‌منظور یکسوسازی تصاویر استفاده شد. در مرحله یکسوسازی تصویر از قاعده ایی پولار^۴ برای یافتن نقاط متناظر بین تصاویر استفاده شد.

۲-۲-۲- محاسبه نقشه تمایز

پس از یکسوسازی تصاویر، نقشه عمق یا تصویر تمایز محاسبه می‌شود. برای محاسبه تصویر تمایز از قاعده تطابق استریو^۵ استفاده می‌شود. تطابق استریو، در واقع پیدا کردن شباهت تصاویر چپ و راست با استفاده از روش مجموع مربعات اختلافات^۶ (SSD) است که بهترین نقطه متناظر برای هر پیکسل توسط حداقل SSD تعیین می‌شود. پس از انتقال مختصات سه‌بعدی به مختصات تصویر، نقشه تمایز توسط معادله (۱) تولید می‌شود.

$$d = p_l - p_r \quad (1)$$

که p_l و p_r مختصات نقطه P در دوربین‌های چپ و راست هستند.

۲-۲-۳- حذف داده‌های سطح دریا

همانطور که از شکل (۲) معلوم است، تقریباً نصف داده‌های تصویر تمایز مربوط به پس زمینه یا سطح دریا است. بنابراین با حذف داده‌های سطح دریا، می‌توان سرعت الگوریتم را بهبود داد. برای حذف داده‌های مربوط به سطح دریا از روش محاسبه نقشه ۷-تمایز و الگوریتم RANSAC استفاده شد.



الف) تصویر سمت راست دوربین



ب) تصویر سمت چپ دوربین

شکل (۲) تصاویر استریوی گرفته شده از محیط.

⁴ Epipolar

⁵ Stereo Matching

⁶ Sum of Squared Difference

¹ Rectify

² Zhang

³ Bouquet

که g و h توابع غیرخطی مدل، و ε_t و δ بردارهای تصادفی گاوسی با کوواریانس R_t و Q_t و میانگین صفر هستند که نشان دهنده عدم قطعیت در توابع انتقال و اندازه گیری است. موقعیت و سرعت قایق هدف در محیط، که توسط دوربین استریو فراهم می شود، با استفاده از سینماتیک حرکت مدل سازی شد:

$$\begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ \dot{X}_t \\ \dot{Y}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{t-1} \\ Y_{t-1} \\ \dot{X}_{t-1} \\ \dot{Y}_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T^2/2 \\ T \\ T \end{bmatrix} a + \quad (5)$$

$$\varepsilon_t(R_t) \\ x_t = A_t X_{t-1} + B_t u_t + \varepsilon_t(R_t) \quad (6)$$

$$A_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B_t = \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T^2/2 \\ T \\ T \end{bmatrix}, u_t = a \quad (7)$$

که در آن T و x_t بیانگر گام زمانی بین دو اندازه گیری متوالی و بردار حالت، B_t و A_t نشان دهنده ماتریس انتقال و بردار ورودی می باشند.

$$R_t = E[xx^T] \\ = E \left[\begin{bmatrix} X_t & Y_t & \dot{X}_t & \dot{Y}_t \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X_t & Y_t & \dot{X}_t & \dot{Y}_t \end{bmatrix} \right] \quad (8)$$

در طراحی آزمایش ردیابی موانع از یک قایق مجهز به RTK-GPS¹ استفاده شد. در مدل سازی فرض بر این است که قایق با سرعت تقریباً ثابت حرکت می کند. به این ترتیب، گرچه متوسط مقدار شتاب کوچک است، ولی به دلیل عدم اطمینان مدل ردیابی، انحراف معیار بالا است. بنابراین در محاسبه کوواریانس نویز، از انحراف معیار شتاب به جای شتاب استفاده می شود. همچنین برای گزارش موقعیت جهانی قایق هدف با استفاده از روش پیشنهادی از معادله زیر استفاده می شود:

$$\begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{ASV} \\ Y_{ASV} \end{bmatrix} \quad (9)$$

که (X_t, Y_t) و (X_{ASV}, Y_{ASV}) موقعیت قایق هدف و قایق ربات در مختصات دو بعدی صفحه-XY و (X_r, Y_r) و α فاصله و زاویه نسبی بین دو قایق می باشند که توسط سیستم استریو اندازه گیری شده است که تصویر شماتیک دید از بالای این روابط در شکل (۳) نشان داده شده است. با در نظر گرفتن (X_r, Y_r) بعنوان بردار حالت، معادله زیر بدست می آید:

$$z_t = \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_t - X_{ASV} \\ Y_t - Y_{ASV} \end{bmatrix} + \delta(Q_t) \quad (10)$$

الگوریتم ۷-تمایز سطوح عمودی در محیط سه بعدی را به صورت خطوط عمودی، و سطوح افقی را به صورت قسمت های شیب دار نشان می دهد. پس از تشخیص پیکسل های مربوط به سطح آب، این پیکسل ها حذف شدند.

۲-۲-۴- تشخیص موانع

پس از شناسایی و حذف داده های مربوط به سطح دریا، برای شناسایی و محاسبه موانع مختلف در حوزه دید، نقشه تمایز با استفاده از روش خوشه بندی K- میانگین طبقه بندی شده و هر مانع برچسب گذاری می شود و ابعاد مانع بر روی تصویر (چپ) و نقشه ارتفاع دیجیتال نشان داده شده می شود. در این تحقیق، دوربین در قسمت جلوی قایق ربات و حدود یک متر از سطح دریا قرار داده شد. برای پیدا کردن مکان دقیق موانع در صفحه X-Z، نقشه ارتفاع دیجیتال (DEM) با استفاده از داده های سه بعدی تهیه شده توسط دوربین استریو برای فریم فعلی تولید ترسیم گردید. مختصات طولی Z و جانبی X هر نقطه سه بعدی به داخل فضای DEM تبدیل شدند. فاصله (Z) از نقطه P به دوربین استریو با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید [۱۳].

$$Z = \frac{B * f}{d * \omega} \quad (2)$$

که B فاصله بین دو دوربین بر حسب سانتی متر است، f فاصله کانونی است (بر حسب پیکسل)، d مقدار تمایز برای هر نقطه، و w اندازه هر پیکسل بر حسب میکرومتر است.

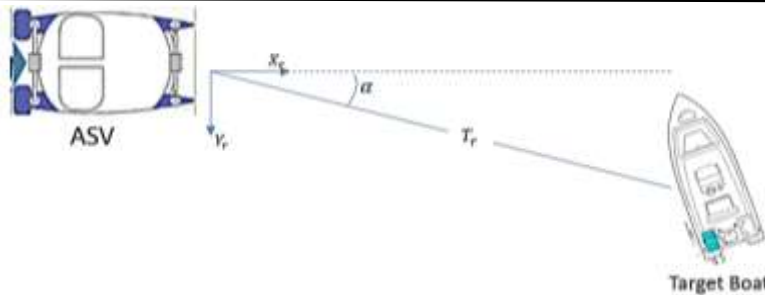
۲-۲-۵- ردیابی موانع

هدف از ردیابی اشیا تعیین مکان جدید اشیا متحرک موجود در صحنه در فریم دریافتی بعدی می باشد. فیلتر کالمن یکی از فیلترهای کارا در ردیابی می باشد که مجموعه کواریانس خطای تخمین را به عنوان یک معیار بهینگی، کمینه ساخته و خصوصیات آماری نویز فرآیند و نویز اندازه گیری را جهت دستیابی به یک طراحی فیلتر بهینه مورد استفاده قرار می دهد. فیلتر کالمن توسعه یافته نسخه غیر خطی فیلتر کالمن است که تخمینی گاوسی از توابع حالت انتقال (x_t) و توزیع احتمال اندازه گیری (z_t) است که توسط معادلات زیر بیان می شوند:

$$x_t = g(u_t, x_{t-1}) + \varepsilon_t(R_t) \quad (3)$$

$$z_t = h(x_t) + \delta(Q_t) \quad (4)$$

¹ Real-Time Kinematic



شکل (۳) موقعیت نسبی قایق هدف و قایق ربات.

و برآورد دقیق پارامترهای کالیبراسیون بود که دقت کالیبراسیون مقدار ۹۴/۵ درصد بدست آمد. همچنین در مرحله کالیبراسیون برای برآورد موقعیت سه بعدی هر نقطه، پارامترهای داخلی (طول کانونی، پارامترهای اعوجاج لنز و غیره) و پارامترهای خارجی (ماتریس‌های انتقال و دوران) مشخص شدند، جدول (۲) مقادیر پارامترهای داخلی و خارجی را نشان می‌دهد.

پس از کالیبره کردن دوربین، یکسوسازی تصاویر و تشکیل نقشه تمایز، الگوریتم در ابتدا هر شی را در میدان دید تشخیص و طبقه‌بندی می‌کند. در شکل (۴-الف) اولیه گرفته شده از محیط و در شکل (۴-ب) تصویر یکسو شده محیط آمده اند، که اثر حذف اعوجاج ها و یکسوسازی کاملا در این شکل آشکار هست. نتایج نقشه تمایز هم در شکل (۴-پ) نشان می‌دهد که هرچه اجسام نزدیک تر باشند شدت رنگ پیکسلی روشن‌تری خواهند داشت. نتیجه الگوریتم V-تمایز بمنظور استخراج و حذف داده‌های مربوط به آب (پس زمینه) نیز در شکل (۴-ت) نشان داده شده است که در این شکل مولفه افقی تصویر، شدت رنگ ۰ تا ۲۵۵ و مولفه عمودی، موقعیت عمودی پیکسل‌ها را نشان می‌دهد.

ورودی این تصویر، نقشه تمایز می‌باشد، بنابراین همانطور که از شکل مذکور مشخص هست داده‌های مربوط به سطح آب بصورت خط شیبدار ترسیم شده‌اند زیرا شدت رنگ پیکسل‌های مربوط به این سطح با دور شدن از قایق کمتر می‌شود ولی بقیه سطوح بدلیل داشتن سطح با شدت رنگ تقریبا یکسان، بصورت خطوط عمودی ترسیم شده‌اند. پس از ترسیم این نقشه از الگوریتم اجماع نمونه‌گیری تصادفی برای انتخاب و حذف داده‌های مربوط به سطح آب استفاده شد که نتیجه این مرحله در شکل (۴-ث) آمده است.

که Q_t کواریانس نویز اندازه‌گیری است. همانطور که در وب سایت شرکت تولید کننده دوربین [۱۸] توضیح داده شده است، برای دوربین استریو با رزولوشن $۱۶۰۰ * ۱۲۰۰$ ، انحراف استاندارد برای نقشه تمایز ۰.۲ پیکسل است که این مقدار تقریبا برابر با کواریانس نویز اندازه‌گیری می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

آزمایش‌های عملی در بندر امیرآباد دریای خزر انجام شد که هدف آزمایش‌ها، ارزیابی الگوریتم ارائه شده در شرایط واقعی و تعیین مکان تمام اشیاء استاتیک (مانند کشتی یا قایق ایستاده، دیوارهای بنادر و غیره) و دینامیک (مانند کشتی‌های در حال حرکت) بود که برای ارزیابی الگوریتم‌ها در شرایط واقعی دو سری آزمایش طراحی شدند.

در آزمایش اول قایق در کنار دیواره های اسکله و اشیاء ثابت حرکت می‌کرد و اشیاء تشخیص داده شده توسط سیستم استریو بر روی نقشه گوگل مشخص می‌کرد. در آزمایش سری دوم نیز یک قایق مجهز به ^۱RTK-GPS در نظر گرفته شد که موقعیت نسبی آن نسبت به قایق ربات توسط سیستم استریو اندازه‌گیری شد و موقعیت جهانی قایق هدف نیز توسط داده‌های سیستم استریو محاسبه شد. در پایان نیز دقت اندازه‌گیری، از مقایسه‌ی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط سیستم استریو و معادله (۹) داده‌های GPS نصب شده بر روی قایق هدف بدست آمدند.

کل الگوریتم با استفاده از نرم‌افزار سی پلاس پلاس^۲ و با کمک جعبه ابزار اپن سیوی^۳ توسعه داده شد. تعداد ۴۰ تصویر استریو از صفحه شطرنجی در زوایا و فواصل مختلف برای کالیبراسیون تهیه شد و هدف پیدا کردن بالاترین دقت الگوریتم برای برآورد مکان دقیق گوشه‌های صفحه شطرنجی

³ OpenCV

¹ Real-time kinematic

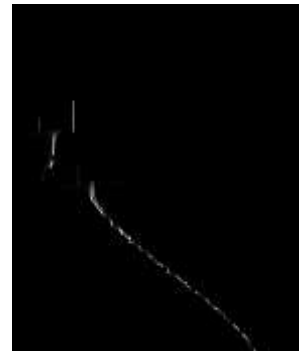
² C++



الف) تصویر اولیه گرفته شده از محیط (ب) تصویر یکسو (رکتیفای) شده (پ) نقشه تمایز متناظر



ث) نتیجه اعمال الگوریتم حذف داده‌های پس زمینه



ت) نقشه V-تمایز

شکل (۴) نتایج تصویری مراحل تشخیص موانع.

در آزمایش دوم، هدف تشخیص و ردیابی قایق هدف در محیط سه بعدی و گزارش موقعیت جهانی قایق ربات و قایق هدف در نقشه ارتفاعی دیجیتال بود که شکل (۶) مسیر قایق هدف و موقعیت قایق ربات در نقشه گوگل^۱ را در دو عملیات مختلف نشان می‌دهد. در شکل (۶-الف)، قایق ربات ساکن بوده و قایق هدف شروع به حرکت کرده و داده‌ها برای قایق هدف ثبت می‌شوند. در شکل (۶-ب) نیز نتایج ردیابی قایق هدف وقتی هر دو قایق در حال حرکت هستند نمایش داده شده است. در این اشکال، مسیرهای مشخص شده با رنگ‌های قرمز، نارنجی و سبز به ترتیب نشان‌دهنده داده‌های RTK-GPS، دوربین استریو و معادله (۹) داده‌های فیلتر شده با فیلتر کالمن می‌باشند.

در این آزمایش، مسیر طی شده هر دو تا قایق توسط RTK-GPS نصب شده بر روی آن‌ها اندازه‌گیری شد و از طرفی، سیستم استریو موقعیت نسبی قایق هدف را اندازه‌گیری کرد که موقعیت جهانی قایق هدف توسط معادله (۹) محاسبه شد. همچنین از فیلتر کالمن بمنظور تصحیح خطای سیستم استریو استفاده شد که نتایج اندازه‌گیری به صورت برخط بر روی نقشه گوگل رسم شدند.

به منظور تشخیص تعداد و مکان اشیا (موانع) موجود در محیط نیز الگوریتم خوشه‌بندی K- میانگین، با تعداد خوشه چهار عدد و تعداد تکرار ۵۰ بار، استفاده شد که این الگوریتم پیکسل‌های موجود در نقشه تمایز را خوشه بندی می‌کند (تعداد اشیا برآورد می‌شود) و پس از این مرحله، میانگین هر خوشه محاسبه می‌شود و با استفاده از رابطه (۲) فاصله آن خوشه (جسم) از دوربین محاسبه می‌شود. در شکل (۵) اندازه و فاصله اشیا شناسایی شده در عملیات مختلف در حوزه دید نشان داده شده است که هر شی شناخته شده در شکل (۵) با یک مستطیل نشان داده شده و اندازه و فاصله هر شی در وسط مستطیل آن نوشته شده است.

همچنین برای گزارش محل اشیا، نقشه ارتفاعی دیجیتال در شکل (۶) ترسیم گردیده است که این نقشه نمای دید از بالای محیط (صفحه X-Z) می‌باشد. این شکل، موقعیت نسبی اشیا موجود در محیط نسبت به قایق را در دو محیط عملیاتی متفاوت نشان می‌دهد که مسیر طی شده توسط قایق ربات و موقعیت جهانی اشیا شناسایی شده به ترتیب با رنگ‌های مشکی و قرمز بر روی نقشه گوگل ترسیم شده‌اند.

^۱ Google Maps



شکل (۵) نتایج اشیا تشخیص داده شده در عملیات مختلف.



ب) نقشه ارتفاعی منطبق شده بر تصویر گوگل.

الف) نقشه ارتفاعی دیجیتال.

شکل (۶) نتایج تصویری.

بود و خطای اندازه‌گیری سیستم استریو نسبت به داده‌های GPS سنجیده شد. همانطور که از این شکل مشخص هست، سرعت برآورد شده توسط سیستم استریو دارای خطای بیشتری است که این خطا توسط فیلتر کالمن کمتر شده است و همچنین خطای فیلتر کالمن در طول آزمایش‌ها کم می‌شود.

همانطور که از این اشکال می‌توان نتیجه گرفت، استفاده از فیلتر کالمن دقت ردیابی قایق ربات را افزایش داده است. در شکل (۸) نتایج اندازه‌گیری سرعت قایق هدف نشان داده شده است. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط GPS، دوربین استریو و فیلتر کالمن به ترتیب با خطوط آبی، سبز و قرمز نشان داده شده است که داده‌های GPS مبنای اندازه‌گیری

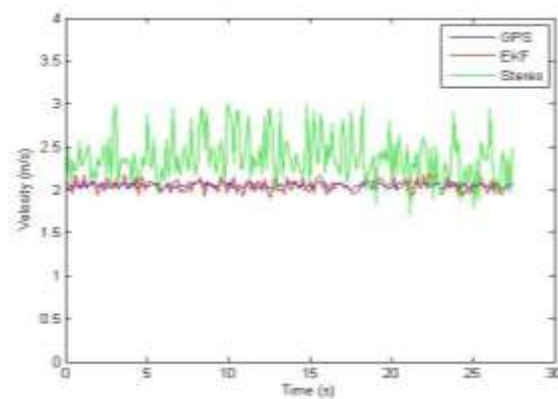
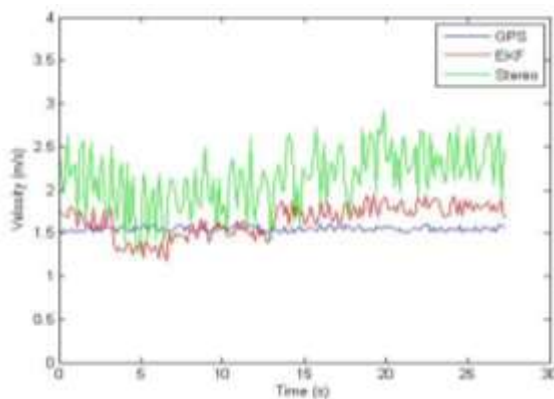


ب) ردیابی قایق هدف در حالت متحرک بودن هردو قایق.



الف) ردیابی قایق هدف در حالت ایستای قایق ربات.

شکل (۶) نتایج ردیابی قایق هدف.



شکل (۷) نتایج برآورد سرعت قایق هدف.

همچنین خطای اندازه گیری سرعت در سیستم پیشنهادی مقدار $0/42322$ متر بر ثانیه می باشد که این میزان خطا با استفاده از الگوریتم فیلتر کالمن به مقدار $0/1661$ متر در ثانیه کاهش پیدا کرده است. همچنین مقادیر نتایج اندازه گیری سرعت در مقاله ی ارائه شده توسط سینیسترا و همکاران [۲۱] به ترتیب $1/02$ و $0/16$ می باشد که با نتایج روش پیشنهادی برابر می باشند.

همانطور که در بخش قبلی هم توضیح داده شد، دقت سیستم بینایی استریو با افزایش فاصله کاهش پیدا می کند. نتایج ردیابی قایق هدف در شکل (۶) نیز گویای همین موضوع بوده و با افزایش فاصله ی قایق هدف از قایق ربات، خطای سیستم استریو افزایش پیدا کرده است. همچنین طبق اصول بینایی استریو اگر اشیا بصورت کامل در هر دو تصویر قابل رویت باشند، نقشه تمایز دقیق و کامل خواهد بود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{GPS} - X_{stereo})^2}{n}} \quad (11)$$

که در این رابطه X_{GPS} داده های گرفته شده توسط جی پی اس و X_{stereo} داده های محاسبه شده با استفاده از سیستم استریو معادله (۹) است.

همانطور که قبلا اشاره شد، دقت الگوریتم ردیابی سیستم استریو نسبت به داده های GPS بر مبنای جذر میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) ارزیابی شد که توسط معادله (۱۱) محاسبه شده است. بر طبق جدول (۲) داده های اندازه گیری شده توسط سیستم استریو دارای حداقل خطای $1/575$ متر در ردیابی بدست آمد که این مقدار با استفاده از الگوریتم فیلتر کالمن به مقدار $0/6621$ کاهش پیدا کرد. این مقادیر در مقاله ارائه شده توسط سینیسترا و همکاران [۲۱] به ترتیب $1/19$ و $1/03$ متر می باشند که با مقایسه نتایج می توان نتیجه گرفت که نتایج الگوریتم فیلتر کالمن نسبت به مقالات ارائه شده دقت بالایی دارد.

¹ Root-Mean-Square Error

۵- منابع

- [1] Mousazadeh, H., "Experimental Evaluation of a Hydrography Surface Vehicle in Four Navigation Modes," J. Ocean Eng. Sci., Vol.2, No.2, pp.127-136, 2017.
- [2] Huntsberger, T., Aghazarian, H., Howard, A., and Trotz, D. C., "Stereo Vision-based Navigation for Autonomous Surface Vessels," J. F. Robot., Vol.28, No.1, pp.3-18, 2011.
- [3] Yan, R., Pang, S., Sun, H., and Pang, Y., "Development and Missions of Unmanned Surface Vehicle," J. Mar. Sci. Appl., Vol.9, No.4, pp.451-457, 2010.
- [4] Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., and Yuan, C., "Unmanned Surface Vehicles: An Overview of Developments and Ehhallenges," Annu. Rev. Control, Vol.41, pp.71-93, 2016.
- [5] Armando J., Manhar R. and Dhanak, K. V. E. "Stereo-vision-based Target Tracking System for USV Operations," Ocean Eng., Vol.133, pp.197-214, 2017.
- [6] Bernini, N., Bertozzi, M., Castangia, L., Patander, M., and Sabbatelli, M., "Real-Time Obstacle Detection using Stereo Vision for Autonomous Ground Vehicles: A Survey," in 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp.873-878, 2014.
- [7] Oniga, F., Nedeveschi, S., Meinecke, M. M., and To, T. B., "Road Surface and Obstacle Detection Based on Elevation Maps from Dense Stereo," in 2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, pp. 859-865, 2007
- [8] Shin, Bok-Suk, H., and Mou X. and Wang, "Vision-based Navigation of an Unmanned Surface Vehicle with Object Detection and Tracking Abilities," Mach. Vis. Appl., Vol.29, No.1, pp.95-112, 2018.
- [9] Wang, H. and Wei, Z., "Stereo-vision Based Obstacle Detection System for Unmanned Surface Vehicle," in International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2013.
- [10] Wang, H., Wei, Z., Ow, C. S., Ho, K. T., Feng, B., and Huang, J., "Improvement in Real-Time Obstacle Detection System for USV," 12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), pp.1317-1322, 2012.
- [11] Tang, P., Zhang, R., Liu, D., Huang, L., Liu, G., and Deng, T., "Local Reactive Obstacle Avoidance Approach for High-Speed Unmanned Surface Vehicle," Ocean Eng., Vol.106, pp.128-140, 2015.
- [12] Bovcon, B., Mandeljc, R., Perš, J., and Kristan, M., "Stereo Obstacle Detection for Unmanned Surface Vehicles by IMU-Assisted Semantic Segmentation," Rob. Auton. Syst., vol.104, pp.1-13, 2018.
- [13] A. Kaehler and G. R. Bradski, Learning OpenCV

جدول (۲) خطای الگوریتم ردیابی و برآورد سرعت.

تست	موقعیت (متر)		سرعت (متر بر ثانیه)	
	فیلتر کالمن	استریو	فیلتر کالمن	استریو
۱	۰/۶۶۲۱	۱/۵۷۵	۰/۲۱۲۹	۰/۷۰۱۷
۲	۰/۷۲۸۶	۲/۱۵۶	۰/۱۶۶۱	۰/۴۲۳۲

همانطور که از شکل (۶-ب) هم مشخص هست، داده ها در قسمت میانی مسیر بهم نزدیک تر بوده و در واقع خطا کمتر هست و این به دلیل کامل بودن عمل تطابق در دوربین استریو است. همچنین تلاش شد تا آزمایش ها در ساعاتی از روز که حداقل بازتاب نور از سطح محیط وجود داشت، انجام شود زیرا بازتاب نور از سطح آب بشدت خطای مکان یابی را تحت تاثیر قرار می داد.

۴- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق، مکان یابی و ردیابی اشیا موجود در محیط اطراف در یک قایق ربات خودران بود که پس از محاسبه تصویر تمایز از روش نقشه ارتفاعی دیجیتال و طبقه بند k- میانگین برای شناسایی اشیا استفاده شد. نتایج آزمایش های عملی نشان داد که الگوریتم ارائه شده با دقت بالایی می تواند موقعیت سه بعدی اشیا را در محیط برآورد کند. از این تحقیق می توان نتیجه گرفت که دقت مکان یابی دوربین استریو وابسته به شدت نور محیط، بازتاب نور محیط و مکان اشیا می باشد.

چنانچه شی مورد نظر بطور کامل در هر دو تصویر قابل رویت باشد، دوربین استریو بهترین دقت را در مکان یابی خواهد داشت. دوربین استریو ابزاری بسیار ارزان و کارا هست و اطلاعات زیادی از محیط دریافت می کند و تنها ضعف این سیستم، خطای بالا در مسافت های دور می باشد که این مورد نیز با افزایش فاصله دو دوربین از هم و استفاده از فیلترهای تصحیح گر قابل حل است. طبق نتایج بدست آمده توصیه می شود در استفاده از سیستم بینایی استریو از یکی از الگوریتم های تصحیح گر، مثل الگوریتم فیلتر کالمن، جهت کاهش خطای سیستم استفاده شود. همچنین در تحقیقات آتی شناسایی و ردیابی همزمان چند قایق متحرک مورد بررسی خواهد گرفت.

سپاسگزاری: بدینوسیله از سازمان بنادر و دریانوردی که منابع مالی این پروژه را در قالب قرارداد ۲۰-س/۷۵۰۹ فراهم نمودند تشکر می شود.

- 3, Computer Vision in C++ with the OpenCV Library. .
- [14] Mousazadeh H., "Developing a Navigation, Guidance and Obstacle Avoidance Algorithm for an Unmanned Surface Vehicle (USV) by algorithms fusion," *Ocean Eng.*, Vol.159, pp.56-65, 2018.
- [۱۵] سلمانی، "ارزیابی الگوریتم ناوبری قایق ربات خودران و مقایسه آن با نتایج شبیه سازی،" *مهندسی بیوسیستم ایران*، سال ۴۹، شماره ۳ صفحات ۳۵۳-۳۶۶، سال ۱۳۹۶.
- [16] Makhsoos, A., Mousazadeh, H., and Mohtasebi, S. S., "Evaluation of Some Effective Parameters on the Energy Efficiency of On-board Photovoltaic Array on an Unmanned Surface Vehicle," *Ships Offshore Struct.*, pp.1-9, 2018.
- [17] Makhsoos, A., "Design, Simulation and Experimental Evaluation of Energy System for an Unmanned Surface Vehicle," *Energy*, Vol.148, pp.362-372, 2018.
- [18] Nerian – Systems for Real-Time 3D Stereo Vision. [Online]. Available: <https://nerian.com/>. [Accessed: 10-Mar-2019].
- [19] Zhang, Z., "A Flexible New Technique for Camera Calibration," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol.22, 2000.
- [20] Zhang Z., "Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations," in *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol.1, pp.666-673, 1999.
- [21] Sinisterra, A. J., Dhanak, M. R., and Von Ellenrieder, K., "Stereo-vision-based Target Tracking System for USV Operations," *Ocean Eng.*, Vol.133, pp.197-214, 2017.