

Evaluation of a Navigation Algorithm for Robot Boat and Comparison to Simulation Results

YOUSEF SALMANI-ZAKARIA¹, HOSSEIN MOUSAZADEH^{2*}, REZA ALIMARDANI³, HAMID JAFARBIGLU⁴,

ELHAM OMRANI⁵, ASHKAN MAKHSOOS⁶, ALI KIAPEY⁷

1. M.Sc. Student, Agricultural Machinery Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
 2. Associate Professor, Agricultural Machinery Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
 3. Professor, Agricultural Machinery Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
 4. Ph.D. Candidate, Agricultural Machinery Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
 5. Ph.D. Candidate, Agricultural Machinery Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
 6. Graduated Student, Agricultural Machinery Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
 7. Graduated Student, Agricultural Machinery Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
- (Received: July. 4, 2017- Revised: Jan. 21, 2018- Accepted: Feb. 7, 2018)

ABSTRACT

Nowadays, the growth of in-vehicle and off-road vehicle technology is significant and the need to develop its related infrastructure to maximize their capacity for land, sea and air transportation is essential and unavoidable. It is time consuming and costly to monitor the environment in water, earth and air conditions for a safe operation, without the use of robots. With automatic monitoring, operations can be performed with the least error and 24 hours a day. So the purpose of this research is to develop and evaluate a composite algorithm for navigating an off-road vehicle (Surface Vehicle) and compare it with the results obtained from computer simulations, to check the accuracy of this algorithm. This robot boat is designed and developed for hydrographic construction could navigate and perform hydrographic operations around the clock and fully autonomous without any supervision. Comparison between experimental and simulation results showed that the simulated algorithm had acceptable accuracy and could navigate experimentally. The Standard Deviation (SD) for practical test was below 0.5 m.

KeyWords: Navigation, Kalman Filter, Simulation, Autonomous Robot, Control

ارزیابی الگوریتم ناوبری قایق ربات خودران و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی

یوسف سلمانی زکریا^۱، حسین موسی زاده^{۲*}، رضا علیمردانی^۳، حمید جعفریگللو^۴، الهام عمرانی^۴، اشکان مخصوص^۵، علی کیایی^۵

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
 ۲. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
 ۳. استاد، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
 ۴. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
 ۵. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
 ۶. دانش آموخته، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
 ۷. دانش آموخته، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
- (تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۱۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۱/۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۱/۱۸)

چکیده

امروزه رشد فناوری وسایل نقلیه درون-جاده‌ای و برون-جاده‌ای چشمگیر بوده و لزوم توسعه زیرساخت‌های مرتبط با آن برای بهره‌گیری حداکثر از ظرفیت آنها هم از لحاظ حمل و نقل زمینی، دریایی و هوایی، ضروری و غیر قابل اجتناب است. پایش و نمایش محیط اطراف برای یک عملیات ایمن، در شرایط آبی، خاکی و هوایی، بدون استفاده از ربات‌ها، عملیاتی وقت گیر و هزینه‌بر است. با پایش اتوماتیک می‌توان عملیات را با کمترین خطا و در طی ۲۴ ساعت شبانه روز به انجام رساند. بنابراین هدف از این پژوهش توسعه و ارزیابی یک الگوریتم مرکب برای ناوبری خودران یک وسیله نقلیه برون جاده‌ای (شناور سطحی) و مقایسه آن با نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری است تا دقت و صحت این الگوریتم مورد بررسی قرار گیرد. این قایق ربات که برای هیدروگرافی طراحی و ساخته شده است، می‌تواند به صورت کاملاً خودران و بدون نظارت، ناوبری کرده و عملیات هیدروگرافی را به صورت شبانه روزی به انجام برساند. مقایسه بین نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی نشان داد، الگوریتم شبیه‌سازی شده دقت قابل قبولی داشته و می‌تواند ناوبری را به صورت عملی و تجربی انجام دهد. مقدار انحراف از استاندارد (SD) برای آزمون عملی تقریباً برابر ۰/۵ m به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: ناوبری، فیلتر کالمن، شبیه‌سازی، ربات خودران، کنترل

مقدمه

ارتباط ویدیویی بی‌سیم با کاربر در تماس هستند (Corfield & Young, 2008). برای انجام ماموریت با این نوع شناورها هزینه عملیاتی و زمان زیادی لازم است (Naeem et al., 2016). زمان، هزینه، ایمنی و سهولت استفاده برخی از عوامل مهم برای تشویق به استفاده بیشتر از ASVها هستند. تحقیقات بر روی ASVها در سال ۱۹۹۳ در دانشگاه MIT آغاز شد. این نمونه اولیه (ARTEMIS) برای تست و کنترل سیستم های ناوبری ASVها طراحی شد. بعد از آن ARTEMIS برای عمق سنجی ساده در دریای ماساچوست مورد استفاده قرار گرفت (Manda et al., 2015). برنامه های کاربردی ASVها را می‌توان در دو زمینه طبقه بندی کرد:

الف) نظارت بر محیط زیست: ASVها قدرت بالقوه زیادی در حفاظت از محیط زیست دارند. نظارت بر محیط زیست می‌تواند شامل حالت های مختلف جمع آوری داده باشد. دیگر روش های جمع آوری داده مانند سیستم های ماهواره‌ای و شبکه‌های ثابت و محرک، امروز توسط پژوهشگران مورد استفاده است. با این حال محدودیت این سیستم‌ها که باید شامل تعداد زیادی بویه شناور و شبکه به هم پیوسته باشد، دقت کم و هزینه زیاد آنها است. برخی از برنامه های نظارت بر محیط زیست عبارتند از: تشخیص نشست مواد نفتی، شوری آب، درجه حرارت آب، محتوای CO₂ در هوا یا دریا، فشار هوا، ارتفاع موج، سرعت باد، عمق سنجی، آکوستیک زیر آب و اندازه گیری آلودگی.

ب) وظایف اجرایی: برخی از مهمترین وظایف کاربردی عبارتند از: انتقال فانوس دریایی، حمل و نقل، نشانگر ترافیک شناورها، ردیابی ماهی و آبزیان و کاربرد های عمومی مانند جمع آوری نمونه نفت.

فراتر از وظایف ASVها، تحقیقات زیادی بر روی ناوبری این وسایل نقلیه هوشمند متمرکز شده است. محققان یک ASV مجهز به GPS و قطب نما برای ناوبری مستقل برای مزرعه برنج طراحی کردند. در این تحقیق خطای جانبی (RMSE) کمتر از ۰/۴۵ متر گزارش شد (Liu et al., 2014). Hall et al. (2009)، در تحقیقی برای کاهش شکار پرندگان در استخرهای کشاورزی و آبی پروری و همچنین داده برداری از کیفیت آب، اقدام به استفاده از چندین قایق ربات به صورت همزمان نموده و ارتباط داده بین چند وسیله نقلیه برون جاده ای را ارزیابی نمودند. ایشان نتیجه گرفتند استفاده از چندین وسیله نقلیه رباتیک زمانی می‌تواند مفیدتر باشد که یک سیستم ارتباطی بین آنها توسعه یابد. در تحقیقی دیگر (Hall et al., 2009)، اقدام به

صادرات کالا بالاخص تولیدات غیرنفتی و محصولات کشاورزی توسط حمل و نقل دریایی برای اقتصاد جهانی امری ضروری است. به طوری که ۹۰ درصد تجارت جهانی را به خود اختصاص می‌دهد. از طرفی مقرون به صرفه‌ترین راه برای انتقال کالاها و مواد خام در سراسر جهان می‌باشد (Anonymous, 2017). بخش بزرگی از اقتصاد جهان وابسته به لنگرگاه‌ها و صنایع وابسته می‌باشد. بنابراین بایستی نوسازی این حمل‌ونقل مهم در نظر گرفته شود. برخی از وظایف مهم و پرانرژی در بنادر، نظارت و جمع آوری داده طی ۲۴ ساعت می‌باشد. از آنجایی که این عملیات حساس نیاز به رباتیک و دستگاه‌های اتوماتیک دارد، بسیاری از محققان بر قایق ربات تمرکز دارند. عموماً وسایل نقلیه دریایی بدون سرنشین (UMV¹) به طور کلی به زیر دریایی و شناورهای سطحی (SV_s²) تقسیم بندی می‌شوند. زیردریایی‌های هوشمند که سهم قابل توجهی از بازار را به خود اختصاص داده‌اند، در حال حاضر برای کاربردهایی همچون لوله-کشی زیر دریا، نقشه‌برداری زیرساخت‌ها، جستجو و نجات اشخاص و ... کاربرد دارند. هدایت شناورهای بدون سرنشین روی آب به مراتب ساده‌تر از هدایت زیر دریایی‌های بدون سرنشین است، چرا که سیستم موقعیت‌یاب جغرافیایی برای سطح آب همواره در دسترس است. ربات‌های شناور روی آب معمولاً در اندازه های کوچک و با قیمت پایین تولید شده و برای اهداف خاص با حرکت مناسب و مسیریابی مناسب در سطح دریاچه‌ها، کانال‌ها و بنادر و حتی دریاها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Naeem et al., 2007). برخی از شناخته شده‌ترین وظایفی که برای شناورهای سطحی تعریف می‌شوند عبارتند از: پایش آب و هوای دریایی، عمق سنجی، بازرسی و سرکشی، برآورد ذخایر و معادن و حفاظت از اسکله، جستجوی معادن نفت و گاز، نظارت خط لوله عمق آب، امنیت ساحلی، امداد و نجات و تحقیقات (Campbell et al., 2012; Pêtrès et al., 2012).

در تقسیم بندی SV_s، تفاوت ASV² و USV³ در نوع کنترل آنها می‌باشد که در ASV شناور کاملاً خودران بوده ولی USV شناور بدون سرنشین و قابل کنترل از راه دور می‌باشد. ASV می‌تواند بدون نظارت به کار گرفته شود. بسیاری از USVها برای هدایت به ارسال دستور توسط کاربر از راه دور متکی هستند و به طور مداوم با مشاهده مستقیم یا از طریق

1. Unmanned Marine Vehicles
2. Autonomous Surface Vehicle
3. Unmanned Surface Vehicle

تحقیقاتی یا اسکله اقیانوس شناسی) و پتانسیل فوق العاده‌ای برای گسترش در سراسر جهان را دارد (Chavez et al., 2017). Praczyk (2015) در تحقیقی با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی تکامل یافته به بررسی اجتناب از موانع در شناورهای سطحی پرداخت. ایشان سیستم ناوبری و چند موانع همزمان را که با محاسبات عددی قابل حل نیستند نیز مورد توجه قرار داده است. Liu & Bucknall (2015) الگوریتمی برای ترسیم مسیر در شناورهای بدون سرنشین معرفی نموده‌اند. این شیوه بر پایه ناوبری سریع استوار است، که از مزایای آن می‌توان به محاسبات سریع و پیچیدگی کم اشاره نمود. این الگوریتم می‌تواند در دو حوزه مورد استفاده قرار گیرد؛ یکی محدوده ایمن برای عبور کشتی‌ها و دیگری تعیین خطر موانع، تا از ایمن بودن مسیر حرکت قایق اطمینان کسب نمود. محققان در پژوهشی سه وظیفه مختلف کنترل، دنبال کننده مسیر، اجتناب از موانع و انتخاب سرعت را شبیه سازی نمودند. وظیفه اصلی این الگوریتم هدایت و حرکت قایق به شکلی است که از موانع موجود اجتناب کند و با سرعت تحت کنترل و متناسبی حرکت نماید (Zereik et al., 2015). برخی از تحقیقات دیگر که اخیراً در رابطه با ASV انجام شده است در جدول (۱) دسته بندی شده‌اند. ویژگی‌هایی مثل طراحی، نیروی پیشران قایق، قدرت مانور و الگوریتم‌های ناوبری از جمله خصوصیات استخراجی از این مقالات می‌باشند.

استفاده از قایق رباتی کردند که مجهز به GPS بوده با خورشید تواندهی می‌شد و برخی پارامترهای آب سدهای حومه شهری مثل دما و اکسیژن حل شده را اندازه گیری می‌کرد. در این تحقیق از ماشین بینایی نیز برای تشخیص پرندگان و فراری دادن آنها از مخازن آب با روش های دوستدار محیط زیست استفاده شد. Kaizu et al. (2011) از یک قایق بدون سرنشین برای اندازه گیری برخی پارامترهای کیفی آب کم عمق در استخرهای کشاورزی استفاده کردند. پارامترهایی مثل pH، دما، اکسیژن حل نشده، رسانایی الکتریکی، میزان کدروی و کلرفیل آب در سطحی به اندازه ۲۶ هکتار در هوکایدو ژاپن اندازه گیری شد. دقت نقاط نمونه برداری ۲/۶ m و حداکثر سرعت قایق ۱/۲ m/s بود. پژوهشگران یک روش ناوبری خودران برای ASV توسعه دادند. تحقیقات آنها مبتنی بر ناوبری خودکار با استفاده از لیدار، رادار، GPS، IMU، حسگرهای استریو و ... بود. اگرچه هدف از آن تحقیق ساخت قایق نبود ولی این سیستم توسعه یافته با سه قایق مجزا تست شد (Elkins et al., 2010). یک شناور موجی برای اندازه گیری فشار، pH، CO₂ آب اقیانوس و برخی پارامترهای دیگر طراحی شده است. این ASV انرژی خود را از موج و نور خورشید تامین می‌کند. آزمایشات نشان می‌دهد این شناور توانایی طی مسیر دور برد (۵۰۰۰ کیلومتر) و بلند مدت (۵۰۰ روز) را دارد. این مطالعه نشان داد که روش فوق، دوام، استقلال و هزینه عملیاتی پایین داشته (نسبت به کشتی

جدول ۱. مقایسه برخی از مشخصات USVها

USV	مشخصه طراحی				نیروی رانش	حداکثر شعاع		کاربرد	الگوریتم ناوبری	منبع
	طول (m)	عرض (m)	ارتفاع (m)	وزن (kg)		دوران (m)	سرعت (m/s)			
DUKW-Ling	۲/۷				N۲۶۶	۱۰	۱	-	Path planning	Bertaska et al. 2015
USV14	۳				N۲۰۵	۱۲	۲/۸	-	Path planning	Bertaska et al. 2015
USV12	۳/۷				N۲۰۰		۳/۶	-	Path planning	Bertaska et al. 2015
Springer	۴	۲/۳		۶۰۰	N۶۵۳		۱/۵	پایش محیط و ردیابی آلاینده ها	Fuzzy LQG and GA-based MPC	Naeem et al., 2012
	۱/۵	۰/۸	۰/۴		N۲۶۶		۱	ارزیابی آب های ساحلی و سطحی و حمایت از عملکرد زیر دریایی ها	PD controller - Linear Quadratic (LQ)	Park et al., 2010
Charlie	۲/۴	۱/۷		۳۰۰	W۶۰۰			نمونه گیری از میکرو لایه های سطوح دریا	PID - EKF	Bibuli et al., 2009 Caccia et al., 2005
Ribcraft 4.8	۴/۵				hp۵۰		۱۰/۳	تحقیقات در وسائل خودران	Waypoint following	Sonnenburg et al., 2010
SeaFox	۴/۹	۱/۵			hp۲۵۰		۲۰/۶	نظامی	Remote control and LSE	Sonnenburg et al., 2010
Pontoon	۴≈				N۳۵۳		۲	ارزیابی کنترل حرکت		Sonnenburg et al., 2010
	۰/۵	۰/۱۴		۱/۶				امداد و نجات و جستجو	Trajectory planning	Muske et al., 2008
Swath	۳/۴	۱/۳	۱/۳	۳۶۰	N۴۸۵		۰/۷۸	عمق سنجی	Path-following and trajectory controller	Rasal, 2013
	۱/۳۸	۰/۳۶	۲/۲					آموزشی	Potential fields	Pètrès et al., 2012
KAIST	۳≈							مسابقات RobotX	A*	Kang et al. 2015

مکانیزم فرمان گیری، بدنه قایق به صورت طرح کاتاماران دوقلو از جنس فایبرگلاس انتخاب و طراحی شد. این قایق ربات توسط انرژی خورشیدی توان دهی می شود. باتری آن یک پک باتری لیتیوم یون به ظرفیت تقریبی ۸ کیلو وات ساعت است که امکان تامین انرژی تا سه روز ابری پشت سرهم را دارد.

برای انجام وظایف تعریف شده، با توجه به شکل (۱)، مروارید قادر به شناخت محیط پیرامون خود از طریق حسگر-هایی از قبیل محدوده یاب لیدار، مجموعه ای از حسگرهای فراصوت، سه سونار عمق سنج، GNSS با وضوح بالا (دقت ± 1 متر)، دوربین مادون قرمز، سیستم مسافت یاب استریوسکوپیک، یک کامپیوتر صنعتی (IPC)، سیستم ارتباط بی سیم دوربرد (تا شعاع ۱۰ کیلومتر)، یک قطب نمای الکتریکی و دو موتور الکتریکی دور متغیر است. با توجه با آزمون تجربی، قایق با وزن تقریبی ۷۰۰ kg می تواند با سرعتی معادل ۵ گره دریایی حرکت کند.

در هیچ یک از تحقیقات بررسی شده نتایج تجربی با نتایج حاصل از شبیه سازی مقایسه نشده است. در صورتیکه با این مقایسه می توان دقت نتایج شبیه سازی را برآورد نموده و بتوان در توسعه نتایج آن مد نظر قرار داد. بنابراین هدف از این تحقیق عبارت است از: الف) ارائه یک الگوریتم کارآمد برای ناوبری خودران، هدایت قایق و کنترل آن ب) مقایسه الگوریتم شبیه سازی شده با نتیجه ارزیابی های عملی، تا بتوان در راستای بهبود داده ها و فرضیات شبیه سازی، بهینه سازی آن را انجام داد.

مواد و روش ها

برای انجام عملیات هیدروگرافی، قایق رباتی تحت عنوان "مروارید" طراحی و ساخته شد. با توجه به ثبات و سادگی

1. emorvarid.ut.ac.ir



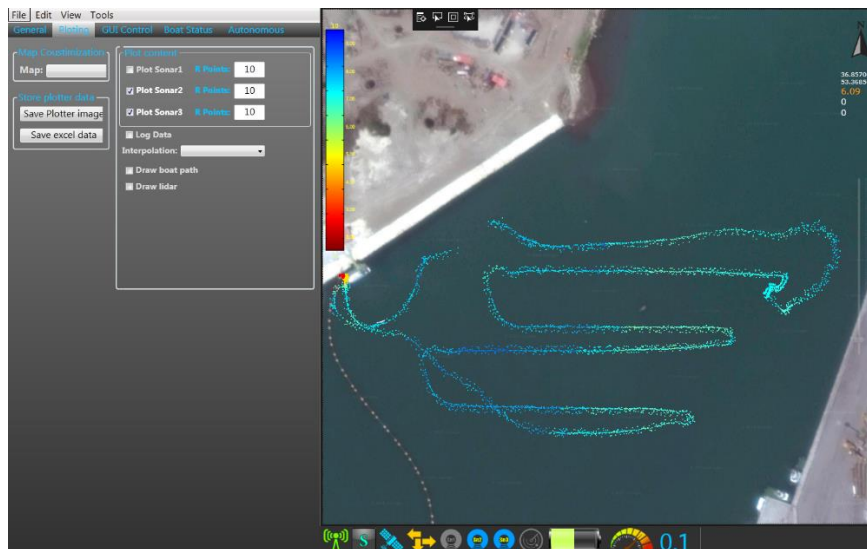
شکل ۱. برخی از تجهیزات و حسگرهای قایق خودران مروارید

برنامه‌ای دارد که به عنوان سرور، ارتباطات را از پورت مشخصی فراهم می کند. برنامه دفتر کار به عنوان درخواست کننده عمل می کند و از طریق ارسال بسته های داده با سرعت ۱۰ هرتز به IPC متصل می شود. این بسته شامل طول و عرض جغرافیایی، زاویه، سرعت، عمق سونار، دما، ولتاژ باتری، موانع، مسیر، نقاط هدف و ... است. برای قرائت GNSS و سونار ها، یک برد الکتریکی بر اساس ARM CORTEX M3 طراحی و ساخته شد. GNSS با پورت USART و سونارها توسط پروتکل شبکه (LAN) به برد متصل می شود. توسط یک برد دیگری قرائت IMU با پروتکل TWI و حسگرهای آلتراسونیک با مبدل آنالوگ به دیجیتال خوانده می شوند. مادربرد به عنوان رابط بین موتور

این شناور می تواند در چهار مد کاری حرکت کند که بر حسب اولویت عبارتند از: کنترل دستی، کنترل از راه دور (RC)، کنترل از دفتر کار (GUI) و کنترل خودکار. در این قایق ربات، ناوبری خودران در مقایسه با سه حالت دیگر، کمترین اولویت را دارد و اگر حالت های دیگر غیر فعال باشند این حالت از دفتر کار فعال می شود. در این حالت بعد از پردازش خروجی حسگر-ها می توان یک برنامه ریزی دقیق برای انجام یک عملیات خودکار مداوم برای عمق سنجی با وضوح بالا طراحی کرد که یک قایق سرنشین دار در زمان و هزینه مساوی، هرگز قادر به بدست آوردن آن نیست. ارتباط بین دفتر کار و IPC موجود در قایق توسط شبکه (سوکت) TCP/IP انجام می شود. IPC

خواهد قایق به صورت کاملا خودکار در مسیرهای مشخص حرکت کند، می‌تواند با کلیک کردن بر روی چهار نقطه در صفحه و یا دادن طول و عرض جغرافیایی چهار نقطه، دستور حرکت را به قایق ارسال کند. همچنین کاربر قادر است هر یک از گزینه‌های نمایش مسیر و یا داده‌های سه سونار را فعال/غیر فعال کند.

ها، جوی‌استیک، گیرنده RC، و دیگر حسگرها عمل می‌کند و سیگنال‌های PWM مورد نظر را به موتورها می‌فرستد. کنترل موتورها در این برد برنامه ریزی شده است. کد کنترل از کنترل PID یا کنترل تناسبی استفاده می‌نماید. با توجه به شکل (۲)، رابط گرافیکی کاربر با استفاده از داده‌های دریافتی از قایق، درک بصری بالایی از محیط پیرامون را ارائه می‌دهد. اگر کاربر



شکل ۲. صفحه نمایش رابط کاربری GUI برای انجام عملیات

می‌باشند. در اصل برای شناورهای سطحی مقدار ارتفاع و پیچ قابل استفاده نیستند. همچنین محاسبات میدانی نشان داده که مقدار رول ϕ نیز قابل چشم‌پوشی است. برای سادگی محاسبات با چشم‌پوشی از حرکت ارتفاعی ($w \approx 0$ و $z \approx \text{const}$)، پیچ ($\theta \approx 0$) و رول ($q \approx 0$) و رول ($\phi \approx 0$ و $p \approx 0$) مدل سینماتیک مطابق معادله (۱) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \quad (\text{رابطه } ۲)$$

مطابق معادله مکانیک لاگرانژ و نیوتون، معادله دینامیک غیر خطی حرکت را می‌توان به شکل عمومی زیر نشان داد (Fossen, 1994):

$$M_{RB} \cdot \dot{v} + C_{RB}(v) \cdot v + D_{RB}(v) \cdot v + g(\eta) = \tau \quad (\text{رابطه } ۳)$$

که در آن ماتریس اینرسی بدنه صلب را نشان می‌دهد (با در نظر گرفتن جرم افزوده) و $M_{RB} = M_{RB}^T > 0$ ، $M_{RB} = 0$ است. ماتریس $C_{RB}(v)$ بیانگر ماتریس کوریولوس و عبارات مرکزگرا بوده (به‌علاوه جرم افزوده) که در آن $C_{RB}(v) = -C_{RB}(v)^T$ و $D_{RB}(v)$ ماتریس میرایی است. $g(\eta)$ بردار نیروهای گرانشی و ممان‌ها بوده و $\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ بردار کنترل ورودی شامل نیرو و ممان در سه جهت می‌باشد. اگر T_{port} را بعنوان نیروی پیش رانش سمت چپ قایق و T_{stbd} بعنوان پیشران

استخراج مدل بدنه

مطابق نظریه Fossen (1994) برای بررسی مدل دینامیکی شناورها با شش درجه آزادی، دو مرجع در نظر گرفته می‌شود؛ یکی بدنه متحرک قایق و دیگری مکان ثابت در زمین. وسط بدنه صلب قایق معمولاً به‌عنوان مرکز ثقل در نظر گرفته می‌شود. معادله انتقال از بدنه متحرک قایق به مختصات زمین-مرجع به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\dot{\eta} = J(\eta) \cdot v \quad (\text{رابطه } ۱)$$

در این معادله $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ بیانگر نمودارهای موقعیت و جهت‌گیری در مختصات زمین-مرجع هستند، $v = [u, w, p, q, r]^T$ مقدار سرعت‌های خطی و زاویه‌ای در مختصات بدنه قایق می‌باشند و $J(\eta)$ ماتریس انتقال می‌باشد (برای اطلاع بیشتر به Fossen (1994) مراجعه شود). در اینجا x ، y و z موقعیت قایق و ϕ ، θ و ψ جهت‌گیری آن در مختصات زمین-مرجع را نشان می‌دهند. همچنین u ، v و w به ترتیب مقدار سرعت طولی، عرضی و ارتفاع را نشان می‌دهند. پارامترهای p ، q و r به ترتیب مقدار سرعت زاویه‌ای حول رول^۱، پیچ^۲ و یاو^۳

1. Roll
2. Pitch
3. Yaw

میرایی چشم پوشی می شود. عبارات متغیر زمانی $\tau_{wv}(t)$, $\tau_{wu}(t)$ و $\tau_{wr}(t)$ اغتشاشات محیطی بوده که توسط امواج، باد و جریان-های اقیانوسی پدیدار می شوند، که در آن $|\tau_{wu}(t)| \leq \tau_{wu \max} < \infty$ ، $|\tau_{wr}(t)| \leq \tau_{wr \max} < \infty$ و $|\tau_{wv}(t)| \leq \tau_{wv \max} < \infty$ می باشد. در نهایت نیروهای کنترل عبارتند از نیروی طولی، τ_u و ممان دورانی، τ_r که مطابق معادله (۴) محاسبه می شوند.

پارامترهای جرم افزوده و فاکتور میرایی متغیرهای مجهول هستند که باید محاسبه شوند. مقادیر جرم افزوده با استفاده از مدل تجربی به شکل زیر بیان می شوند (Muske et al., 2008).

$$\begin{cases} m_{11} \approx m + 0.05m \\ m_{22} \approx m + 0.5(\rho \cdot \pi \cdot D^2 \cdot L) \\ m_{33} \approx \frac{m(L^2+W^2)+\frac{1}{2}(0.1m \cdot B^2+\rho \cdot \pi \cdot D^2 \cdot L^3)}{12} \end{cases} \quad (\text{رابطه ۶})$$

در رابطه (۶) m ، جرم قایق حدود ۷۰۰ کیلوگرم بوده، طول موثر (L) ۳ متر، عرض آبخور (D) ۰/۸ متر، میانگین عمق غوطه وری (B) ۰/۴ متر و ρ مقدار چگالی آب را نمایش می دهد. طبق تحقیقات (Ma (2015) ضرایب میرایی به شکل زیر بیان می شوند:

$$\begin{cases} d_{u2} = 0.2d_{uv} & d_{v2} = 0.2d_{vu} & d_{r2} = 0.2d_{rv} \\ d_{u3} = 0.1d_{uv} & d_{v3} = 0.1d_{vu} & d_{r3} = 0.1d_{rv} \end{cases} \quad (\text{رابطه ۷})$$

با در نظر گرفتن ترکیبی از نتایج تجربی، شبیه سازی و استفاده از منابع موجود می توان du ، dv و dr را به دست آورد. با توجه به اینکه پارامترهای میرایی به خصوصیات ابعاد و شکل قایق بستگی دارد، این مقادیر برای برخی USV در جدول (۲) داده شده است.

جدول ۲. پارامترهای جرم و ضریب میرایی برخی از USVها

m [kg]	L [m]	m_{11} [kg]	m_{22} [kg]	m_{33} [kgm ²]	d_u [kg/s]	d_v [kg/s]	d_r [kgm ² /s]	Ref.
1.3×118	۳۸	1.3×120	$1.3 \times 177/9$	1.5×636	1.2×215	1.3×147	1.4×8.2	Doa et al., (2004)
۱/۶۱	۰/۴	۱/۶۹	۱/۸	۰/۰۲۷	۲/۲۲	۱۳/۴	۰/۰۵	Muske & Ashrafiuon, (2008)
-	-	۲۵/۸	۳۳/۸	۲/۷	۲	۷	۰/۵	Kjerstad, (2009)
۷۰۰	۳	۷۳۵	۱۴۵۳	۱۱۵۰	?	?	?	Morvarid

این نسبت ها برای قایق ربات خودران مروارید برابر $m_{11}/du=10$ ، $m_{22}/dv=5$ و $m_{33}/dr=2$ محاسبه شد.

الگوریتم EKF و پارامترهای آن

برای تخمین وضعیت وسیله نقلیه استفاده از فیلترهای تخمین کننده رایج و معمول است. بنابراین در این تحقیق نیز از فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) که برای مدل های غیر خطی استفاده می شود، مطابق رابطه (۸) استفاده شد.

سمت راست در نظر گرفته شود، بردار ورودی کنترل به شکل زیر در می آید:

$$\tau = [\tau_u, \tau_v, \tau_r]^T = \left[(T_{port} + T_{stbd}), 0, (T_{port} + T_{stbd}) \cdot \frac{B}{2} \right]^T \quad (\text{رابطه ۴})$$

که B عبارت است از فاصله بین دو نیروی پیشران (در این مورد ۱/۲ متر می باشد). مزایای مختلفی در استفاده از دو سامانه رانش وجود دارد. اولین مزیت امکان دور درجا می باشد؛ یعنی برای دور کامل نیازی نیست که نیروی رو به جلو وارد شود و قایق مسافتی را طی نماید در این حالت از مصرف انرژی بدون دلیل جلوگیری شده و زمان تغییر جهت دادن قایق نیز کاسته می شود (Bertaska et al., 2015). بعد از ساده سازی برخی پارامترها اگرچه ممکن است مقداری تفاوت با واقعیت وجود داشته باشد، اما مدل قابل قبولی به صورت رابطه (۵) به دست خواهد آمد (Doa et al., 2004).

(رابطه ۵)

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cdot \cos\psi - v \cdot \sin\psi \\ \dot{y} = u \cdot \sin\psi + v \cdot \cos\psi \\ \dot{\psi} = r \\ \dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}} \cdot v \cdot r - \frac{d_{u1}}{m_{11}} \cdot u - \sum_{i=2}^3 \frac{d_{ui}}{m_{11}} |u|^{i-1} \cdot u + \frac{1}{m_{11}} \cdot \tau_u + \frac{1}{m_{11}} \cdot \tau_{wu}(t) \\ \dot{v} = \frac{m_{11}}{m_{22}} \cdot u \cdot r - \frac{d_{v1}}{m_{22}} \cdot v - \sum_{i=2}^3 \frac{d_{vi}}{m_{22}} |v|^{i-1} \cdot v + \frac{1}{m_{22}} \cdot \tau_v + \frac{1}{m_{22}} \cdot \tau_{wv}(t) \\ \dot{r} = \frac{(m_{11}-m_{22})}{m_{33}} \cdot u \cdot v - \frac{d_r}{m_{33}} \cdot r - \sum_{i=2}^3 \frac{d_{ri}}{m_{33}} |r|^{i-1} \cdot r + \frac{1}{m_{33}} \cdot \tau_r + \frac{1}{m_{33}} \cdot \tau_{wr}(t) \end{cases}$$

که در آن m_{ij} مقدار ثابت مثبتی داشته که $1 \leq j \leq 3$ و بیانگر اینرسی قایق شامل جرم افزوده خواهد بود. مقادیر فوق مطابق معادله (۶) قابل محاسبه است. مقادیر ثابت و مثبت d_{ui} ، d_{vi} ، d_{ui} ، d_r ، d_v هیدرودینامیک در جهت طولی، عرضی و دوران حول محور عمودی است. برای سادگی محاسبات، از مقادیر درجات بالای

با توجه به جدول (۲) نسبت های m_{11}/du ، m_{22}/dv و m_{33}/dr برای شناورهای سطحی بازه مشخصی دارند. برای پیش بینی و برآورد مناسب در طراحی، بیشترین مقدار این نسبت ها برای پیش گیری از آسیب و تاثیر نامطلوب امواج و سرعت انحراف در نظر گرفته شده است. نیروی پیش رانش کمترین مقدار نیروی ممکن برای به حرکت درآوردن قایق می باشد که از طریق آزمایشات تجربی در طول انجام تست به دست آمده است (در این مورد ۰/۲ کل نیروی رانش می باشد). در نهایت

(رابطه ۸)

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{x(GPS)}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y(GPS)}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\psi(comp.)}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{u(IMU)}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{v(IMU)}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_r^2(IMU) \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

الگوریتم ناوبری و کنترل

در میان الگوریتم های مسیریابی، میدان پتانسیل یکی از مشهور ترین روش ها است که بر اساس میدان پتانسیل مغناطیسی کار می کند (به عبارت دیگر نیرو های جاذبه و دافعه به نسبت معکوس با فاصله از مقصد اعمال می شوند). این الگوریتم از دهه های گذشته و بصورت گسترده و موفقیت آمیز برای کنترل و طرح ریزی مسیر در ربات ها استفاده شده است. الگوریتم های مبتنی بر میدان های پتانسیل سریع، قابل اعتماد و بسیار مناسب برای کاربرد های زمان واقعی می باشند (Pêtrès et al., 2012). مهم ترین نقطه ضعف این روش امکان به دام افتادن الگوریتم در نقاط مینیمم نسبی است. به منظور رفع این مشکل، در این پروژه یک الگوریتم جدید بر مبنای ترکیب الگوریتم های میدان های پتانسیل و توپ جستجو توسعه داده شد. این روش در شکل (۳) به صورت یک الگوریتم کنترلی نمایش داده شده است.

$$\text{Model: } \begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, u_k) + w_k \xrightarrow{\text{In this case}} x_k = x_{k-1} + T \cdot f(x_{k-1}, u_k) + w_k \\ z_k = h(x_k) + v_k \xrightarrow{\text{In this case}} z_k = H \cdot x_k + v_k \end{cases}$$

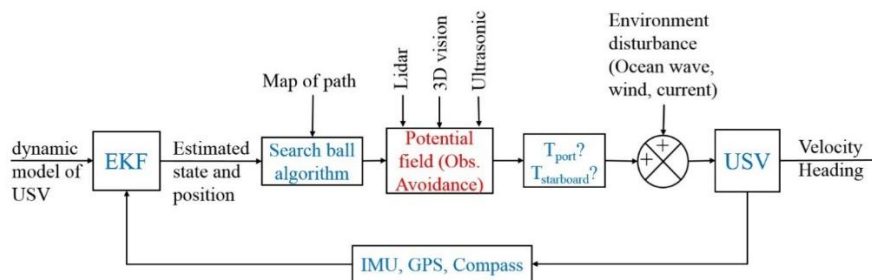
$$\text{Predict: } \begin{cases} \hat{x}_k = f(\hat{x}_{k-1}, u_k) \xrightarrow{\text{In this case}} \hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + f(\hat{x}_{k-1}, u_k) \\ P_k = F_{k-1} P_{k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1} \end{cases}$$

$$\text{Update: } \begin{cases} K_k = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R)^{-1} \\ \hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k (z_k - h(\hat{x}_k)) \\ P_k = (I - K_k H_k) P_k \end{cases}$$

حرکت قایق به وسیله سیستم موقعیت یاب جهانی و حسگر IMU اندازه گیری می شود. در اینجا $x_k = [x, y, \psi, u, v, r]^T$ بردار اندازه گیری است که دو پارامتر اول با سیستم موقعیت یاب جهانی اندازه گیری شده، پارامتر سوم با قطب نما و سه پارامتر آخر با حسگر IMU. تابع تخمین حالت $f(x_{k-1}, u_k)$ می باشد که تابعی از پارامترهای حالت و سیگنال کنترل u_k می باشد و مطابق رابطه (۵) داده می شود. T گام های زمانی بوده و H ژاکوبین تابع $h(x_k)$ که در اینجا تابعی از T می باشد؛ همچنین F_{k-1} ژاکوبین $f(x_{k-1}, u_k)$ است. ماتریس ژاکوبین J برای تابع دلخواه f یک ماتریس $m \times n$ است که در معادله (۹) آمده است.

$$J = \frac{df}{dx} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (\text{رابطه ۹})$$

اگرچه پیدا کردن R_k چندان پیچیده نیست اما بدست آوردن Q_k نیاز به متدهای خاصی دارد که برای نمونه در Gomez-Gil et al. (2013) آمده است. در این مقاله R_k به شکل زیر در نظر گرفته شد:



شکل ۳. ساختار الگوریتم ناوبری، هدایت و کنترل

مکان ربات متناسب با نیروی کشش خواهد بود. این فرآیند برای کل نقاط مسیر ادامه پیدا می کند. اندازه توپ جستجو معمولاً توسط کاربرد به اندازه های خاص محدود می شود که در اینجا $2 * L$ در نظر گرفته شده است که L نشان دهنده طول قایق است (Kang et al., 2015; Fossen, 1994). در واقع یک سامانه

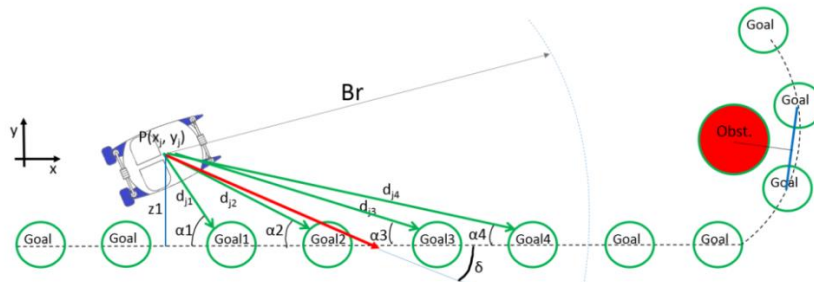
برای هر نقطه که در مسیر حرکت قرار دارد، یک جستجو انجام می شود تا نزدیکترین نقاط روی خط مبنا به آن نقطه پیدا شوند (الگوریتم در ابتدا خط مبنا را پیدا کرده و سپس نقاط روی آن را پیدا می کند تا عملیات توپ جستجو انجام شود). هنگامی که این نقاط مشخص شدند، فاصله این نقاط از

هدایتی بر مبنای خط دید برای کنترل موقعیت و جابجایی بین نقاط مسیر USV استفاده شد، مشابه (Fossen 1994) این سامانه با استفاده از موقعیت فعلی ربات و همچنین موقعیت مطلوب ربات جهت گیری مطلوب را حساب می کند.

$$d_{ij} = \sqrt{[E(i) - E(j)]^2 + [N(i) - N(j)]^2} \quad (\text{رابطه } 10)$$

شعاع توپ جستجو، B_r ، انعطاف پذیری زیادی را برای کاربر فراهم می کند با این حال یک شعاع منطقی بازدهی الگوریتم را از لحاظ محاسباتی بهبود می بخشد. الگوریتم توپ جستجو را می توان به فرم ریاضی به صورت زیر نوشت؛ فرض کنید $P(x_j, y_j)$ موقعیت قایق باشد که بوسیله فیلتر کالمن توسعه یافته تخمین زده شده است، و $T = \{1, \dots, n\}$ مجموعه نقاط روی مسیر مطلوب و درون توپ جستجو باشد. در این صورت اگر E و N به ترتیب شرق و شمال جغرافیایی را نشان دهند، برای هر j می توان یک مجموعه جدید بصورت

$$\alpha_i = \text{Arctan} \frac{[N(i) - N(j)]}{[E(i) - E(j)]} \quad (\text{رابطه } 11)$$



شکل ۴. سامانه ناوبری مروارید بر مبنای ترکیب توپ جستجو و میدان پتانسیل

برای جذب مروارید به سمت هدف از یک میدان خطی استفاده می شود که برای هر نقطه از مسیر با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد (Pêtrès et al., 2012):

پتانسیل $pot_i = k_2 * d_{ij}$ (here $i=1$ to 4) (رابطه ۱۲) در اینجا k_2 گرادیان نیروی جاذبه و d_{ij} فاصله اقلیدسی بین $P(x_j, y_j)$ و هدف نام است. در نهایت مقصد واقعی و جهت گیری لازم برای قایق که با بردار قرمز در شکل (۴) نشان داده شده است، با استفاده از نتایج مراحل قبل و با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می شود.

$$pot_i = k_2 * d_{ij} \quad (\text{here } i=1 \text{ to } 4) \quad (\text{رابطه } 12)$$

به منظور تنظیم نیروی پیشران موتورها در اولین مرحله الگوریتم تشخیص می دهد که آیا قایق در سمت چپ مسیر قرار دارد یا در سمت راست آن، سپس با استفاده از رابطه (۱۴) نیروهای لازم محاسبه می گردد.

$$\delta = \text{Arctan} \frac{\sum_i pot_i \cdot \sin \alpha_i}{\sum_i pot_i \cdot \cos \alpha_i} \quad (\text{رابطه } 13)$$

برای هر j می توان یک مجموعه جدید بصورت

$$\begin{cases} \text{in right: } T_{stbd} = prim_{force} + z_1 + |\delta| + 3(\psi - path_angle), \\ T_{port} = prim_{force} - z_1 - |\delta| - 3(\psi - path_angle) \\ \text{In left: } T_{stbd} = prim_{force} - z_1 - |\delta| - 3(\psi - path_angle), \\ T_{port} = prim_{force} + z_1 + |\delta| + 3(\psi - path_angle) \end{cases}$$

در واقع با افزایش فاصله قایق از مسیر و همچنین با افزایش زاویه جهت گیری δ ، اختلاف نیروی اعمالی موتور ها بیشتر خواهد بود. پارامتر $prime_force$ یک متغیر است که مقدار آن در حالتی که قایق روی مسیر مطلوب و جهت گیری صحیح قرار دارد برابر با نیروی پیشران از پیش تعیین شده می باشد (رابطه ۱۵).

مقدار z_1 کمترین فاصله بین قایق و مسیر مطلوب است که با استفاده از روابط مثلثاتی بدست می آید. در واقع با افزایش فاصله قایق از مسیر و همچنین با افزایش زاویه جهت گیری δ ، اختلاف نیروی اعمالی موتور ها بیشتر خواهد بود. پارامتر $prime_force$ یک متغیر است که مقدار آن در حالتی که قایق روی مسیر مطلوب و جهت گیری صحیح قرار دارد برابر با نیروی پیشران از پیش تعیین شده می باشد (رابطه ۱۵).

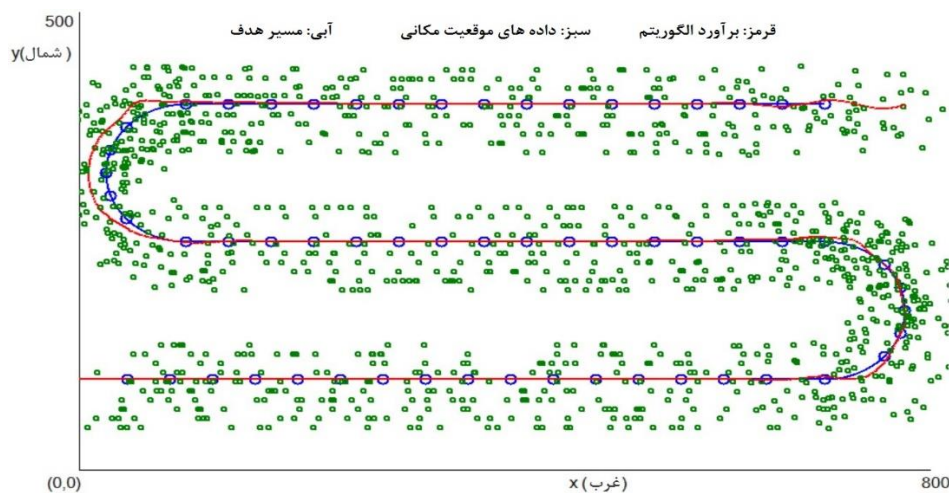
$prim_force = k_1 - (y_{near_goal1} - y_{near_goal2}) - 5$ در این رابطه، k_1 یک ثابت به عنوان مثال ۴۰ درصد سرعت دورانی موتور است. در این رابطه فرض شده است که $T_{max} * rpm / rpm_{max}$ متغیرهای y_{near_goal2} و y_{near_goal1} مؤلفه های موقعیت در جهت y برای دو نقطه هدف نزدیک است که اختلاف این دو مؤلفه سبب کاهش سرعت حرکت قایق در مسیر های منحنی می شود. همچنین خطای جانبی سبب کاهش سرعت شده که باعث اصلاح دقیق تر حرکت می شود.

۴۰ cm ثبت شده و نسبت به موقعیت خط مطلوب مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج و بحث

برای شبیه سازی الگوریتم توسعه داده شده، سه خط مستقیم که در انتها به هم متصل می شدند و مسیری U شکل را ایجاد می کردند، ترسیم شدند (شکل ۵)). همانطور که در شکل هم نشان داده شده است، طول مسیر برای شبیه سازی ۸۰۰ متر است که فاصله مسیرها از هم ۱۵۰ متر می باشد. مسیر از پیش تعیین شده با خط آبی و داده های GPS با رنگ سبز و موقعیت پیش بینی شده با رنگ قرمز نشان داده شده است. برای ترسیم واضحتر، داده ها در جهت y، ۱۰ برابر شده اند. بنابراین شرایط مرزی در شروع شبیه سازی به صورت $X_0=p_0=(0,10,0,1,0,0)$ خواهد بود.

برای شبیه سازی الگوریتم و همچنین ارزیابی تجربی الگوریتم توسعه داده شده، یک مسیر منحنی شکل با سه خط صاف که در دو انتها با یک دوران ۱۸۰ درجه به هم متصل شده بودند در نظر گرفته شد. فاصله بین خطوط و نقاط هدف در روی خطوط، در ابتدای رانش قابل انتخاب هستند. شبیه سازی الگوریتم با توسعه برنامه ای در نرم افزار Visual C# انجام شد. ناوبری خودران در ارزیابی تجربی از نقطه ای با طول و عرض جغرافیایی (۵۳/۳۶۹۰۰۰ و ۳۶/۸۵۶۴۵۱) شروع شده و با طول خطوط ۱۵۰ m و فاصله ۲۵ m بین خطها، با سرعت ۱/۱ m/s در جهت غرب به شرق و برعکس ادامه یافت. تعداد تکرار آزمایشها ۴ بار بوده و همه تست های عملی در دریای خزر (استان مازندران) به انجام رسید. برای ارزیابی داده های تجربی، از متغیرهای آماری $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$ ، انحراف از استاندارد $SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}}$ ، دامنه $R = \max - \min$ ، میانگین، حداکثر و حداقل آفست استفاده شد. سیگنال های خطا در هر

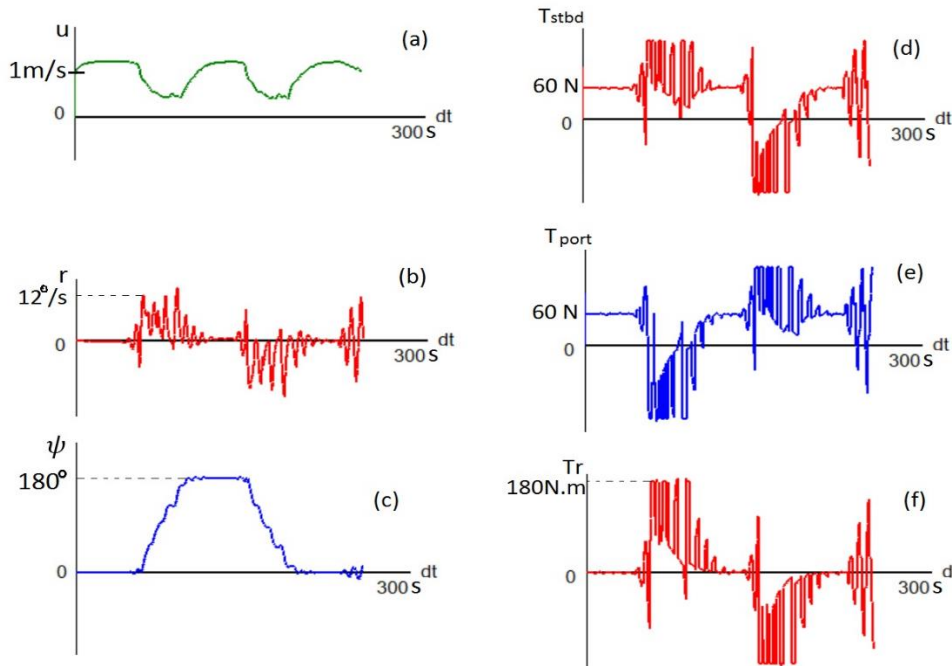


شکل ۵. مسیر پیموده شده توسط تخمین گر EKF و ترکیب توپ جستجو و الگوریتم میدان پتانسیل

شتاب در جهت طولی و عرضی که با توجه به اینکه هم در شبیه سازی و هم در تست تجربی سرعت در جهت های طولی و عرضی سرعت-ثابت لحاظ شد بنابراین شتاب در این دو جهت برابر صفر لحاظ گردید. طبق شکل ۵) الگوریتم توسعه داده شده مسیرهای مستقیم را خیلی دقیق طی می کند ولی در قسمت مسیر U شکل بعضی خطاهایی وجود دارد. در پایان مسیر سوم، چون هیچ نقطه هدفی وجود ندارد، الگوریتم دچار نوسان می شود. نتایج شبیه سازی نشان داد، قرار دادن نیروهای اختلال گر(نویز) هیچ تاثیری در الگوریتم جهت یابی ندارد. با این حال اگر این نیرو چندین برابر افزایش یابد، قایق مسیر خود را از دست داده و مسیر را به کل گم می کند.

پارامترهایی که برای شبیه سازی تغییر داده شدند مطابق بردار وضعیت، شامل شش پارامتر بودند. مهمترین پارامتر متغیر، موقعیت (طول و عرض جغرافیایی) بود که توسط یک مولد عدد راندم با واریانس برابر GPS نصب شده، نقاطی نزدیک خط فرضی (خط آبی در شکل ۵) منتهی با نویز ایجاد شدند (نقاط سبز رنگ). متغیر بعدی که تغییر داده شد داده های حسگر IMU بود که دو مقدار زاویه حول محور عمود بر سطح (قطب نما یا Yaw) و دیگری نرخ تغییرات این زاویه بود. مقدار زاویه Yaw در خط پایین و بالا برابر صفر لحاظ شد و در خط وسط برابر ۱۸۰° فرض شد. در سایر نقاط منحنی نیز با توجه به خط فرضی محاسبه می شد. اما دو پارامتر دیگر عبارت بودند از

شکل (۶-d و e) بیانگر نیروهای پیش رانشی موتورهای چپ و راست هستند. برای مسیرهای مستقیم، مقادیر این نیروها روی ۶۰ نیوتن، که متناسب با حدود ۱/۵ m/s بود، تنظیم شد. در دور زدن اول، وقتی قایق به سمت چپ دور می زند، نیروی پیش رانش موتور سمت چپ کاهش می یابد در حالی که پیش رانش موتور سمت راست افزایش می یابد در حالیکه در دور زدن دوم عکس این حالت اتفاق می افتد. طبق این نمودارها، ماکزیمم مقدار نیروی پیش رانش ۱۵۰ نیوتن می باشد (به هر حال، بعد از تست مرحله اول در دریاچه چینگر، با توجه به سرعت پایین قایق، موتورهای جدید با نیروی پیش رانش حدود ۴۰۰ N جایگزین شدند). شکل (۶-f)، گشتاور دور زدن را نشان می دهد که با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شده است.



شکل ۶. a: سرعت جلوسو b: سرعت زاویه ای پیچش c: زاویه چرخش (جهت گیری) d: نیروی پیش رانش موتور چپ e: نیروی پیش رانش موتور راست f: گشتاور دورزدن

غرب به شرق به صورت منفی وجود دارد. پیش بینی می شود این انحراف ناشی از اثرات جریان آب و یا تنظیم نامناسب جهت نصب موتورها و یا اینکه نامناسب بودن طراحی و ساخت بدنه باشد. با این حال این انحراف می تواند با اضافه/کم کردن یک عدد در فاصله بین خطوط جبران شود.

جدول (۳) برخی از پارامترهای اصلی در حین رانش خودران را برای مقایسه نشان می دهد. SD انحراف از مقدار میانگین (انحراف استاندارد) و RMSE انحراف آن از حالت پیش بینی شده است. در اینجا خط هدف به عنوان مبنا در نظر گرفته

شکل (۶) برخی از پارامترهای اصلی ارزیابی در مقابل گامهای زمانی را نشان می دهد. در این شکل، (۶-a)، منحنی سرعت جلوسو بر حسب زمان می باشد. مقدار این سرعت در نقطه شروع، ۱ m/s می باشد. در مسیر مستقیم، سرعت کمی افزایش یافته و تقریباً ثابت می ماند. همانطور که انتظار می رود، بمنظور حرکت دقیق قایق، سرعت در حین دور زدن کاهش می یابد. شکل (۶-b) سرعت زاویه ای انحراف قایق (یاو) را نشان می دهد. ماکزیمم مقدار r تقریباً ۱۲ درجه بر ثانیه بدست آمد. شکل (۶-c) جهت گیری قایق بر مبنای جهت شرق را نشان می دهد. با توجه به این نمودار، در مرحله اول که مسیر مستقیم است، ψ صفر است و در دور زدن اول (یا مسیر U شکل) مقدار این زاویه افزایشی بوده تا به ۱۸۰ درجه می رسد ولی در سومین مسیر مستقیم، مقدار این زاویه دوباره به صفر کاهش می یابد.

بعد از شبیه سازی الگوریتم توسعه داده شده، الگوریتم فوق در IPC روی مروارید بارگذاری شد و به صورت عملی مورد آزمون قرار گرفت. نتایج تجربی مروارید نشان داد که الگوریتم، ابتدا نزدیکترین نقطه مسیر را یافته و به سوی آن حرکت می کند و بعد از منتقل شدن به آن مختصات، شروع به پیمایش مسیر تعیین شده می کند. سرعت حرکت قایق تقریباً ثابت بوده و اجرای آن آسان و بدون نیاز به دخالت کاربر می باشد. همچنین آزمون تجربی نشان می دهد یک انحراف ثابت از مسیر مشخص شده در مسیر شرق به غرب به صورت مثبت و در مسیر

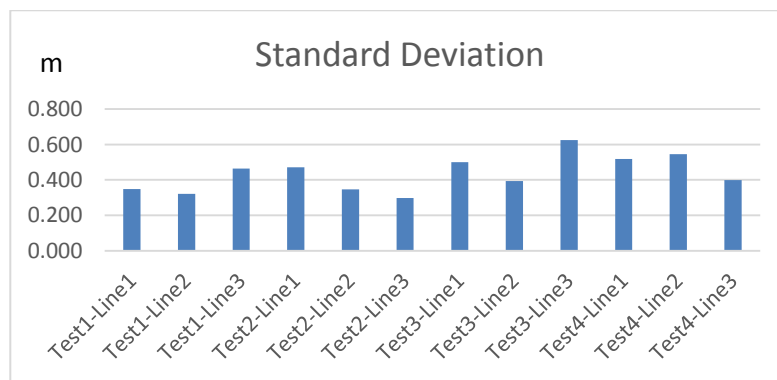
شده است به طوری که موقعیت آن صفر مختصات باشد. با توجه به جدول (۳)، به خاطر همین خطای ثابت، در همه آزمون‌ها، RMSE بیشتر از SD (RMSE تقریباً ۵ متر و SD تقریباً ۰/۵ متر) است.

جدول ۳. برخی از نتایج آماری برای مقایسه انحراف

	RMSE(m)	دامنه	کمینه	بیشینه	میانگین	SD(m)
آزمون ۱	۵/۳۲۴	۱/۳۴۶	-۴/۲۳۱	-۵/۵۷۷	-۵/۲۶۷	۰/۳۴۸
	۲/۶۶۵	۱/۵۳۸	۱/۹۳۲	۳/۴۶۲	۲/۶۳۵	۰/۳۲۰
	۵/۲۲۵	۱/۹۲۳	-۳/۶۵۴	-۵/۵۷۷	-۵/۱۷۴	۰/۴۶۴
آزمون ۲	۴/۷۳۶	۳/۰۷۷	-۲/۵۰۰	-۵/۵۷۷	-۴/۷۰۵	۰/۴۷۰
	۱/۱۶۵	۱/۱۵۴	۰/۵۷۷	۱/۷۳۱	۱/۱۰۸	۰/۳۴۷
	۴/۴۳۲	۳/۱۱۵	-۳/۴۶۲	-۵/۵۷۷	-۴/۴۱۵	۰/۲۹۷
آزمون ۳	۱/۶۶۹	۲/۱۵۵	-۰/۵۷۷	-۲/۶۹۲	-۱/۵۸۸	۰/۵۰۰
	۰/۹۱۵	۱/۵۳۸	۰/۱۹۲	۱/۷۳۱	۰/۸۲۵	۰/۳۹۳
	۱/۹۷۵	۲/۳۰۸	۰/۳۸۵	۲/۶۹۲	-۱/۸۶۹	۰/۶۲۵
آزمون ۴	۳/۱۴۴	۲/۳۰۸	-۱/۹۲۳	-۴/۲۳۱	-۳/۰۹۳	۰/۵۱۹
	۱/۳۲۴	۳/۲۶۹	۰/۱۹۲	۳/۴۶۲	۱/۲۰۴	۰/۵۴۴
	۲/۹۹۲	۱/۹۲۳	-۲/۳۰۸	-۴/۲۳۱	-۲/۹۶۱	۰/۳۹۸

رانس داده شده است. مسیرهای مشخص شده در آزمون تجربی چهار بار به صورت حرکت خودران پیموده شد که نتایج آن در نمودار زیر قابل مشاهده است. تکرار موفق یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های یک الگوریتم ایده‌آل می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار انحراف معیار برای همه آزمون‌ها در بین m ۰/۳۵ تا ۰/۶۰ قرار دارد.

این جدول نشان می‌دهد که الگوریتم استفاده شده برای حالت ناوبری خودران، از دقت قابل قبولی برخوردار است. آزمون‌های تجربی نشان دادند که این الگوریتم از تغییر جهت‌های ناگهانی و در نتیجه از شوک و ضربه ناگهانی به قایق جلوگیری می‌کند. برای مقایسه، فقط ناوبری در روی خطوط راست مد نظر قرار گرفت. به همین دلیل در شکل (۷) مقادیر SD برای رانس‌های مختلف و همچنین خطوط مختلف در هر



شکل ۷. مقادیر انحراف‌های بوجود آمده در آزمون‌های تجربی برای ناوبری خودران

است بنابراین مسیرهای دور زدن مورد مقایسه و ارزیابی قرار نگرفتند.

نتیجه‌گیری

به منظور کنترل خودران یک قایق ربات، الگوریتمی جهت کنترل هرچه بهتر این قایق توسعه داده شد. قایق ربات مروراید

به هر حال نتایج تجربی نشان می‌دهند که با یک انحراف از استاندارد تقریباً m ۰/۵ الگوریتم به خوبی توانسته ناوبری کند. در برنامه شبیه‌سازی شده اگر چه در خطوط مستقیم، انحراف تقریباً صفر بود ولی در حین دور زدن مقداری خطا وجود داشت. از آنجاییکه دقت دور زدن در انتهای مسیر، برای این تحقیق خیلی مهم نبوده و صرفاً دور زدن لازم و ضروری

نتایج تجربی نشان داد که حالت ناوبری خودران، دقت و راحتی بیشتری نسبت به سایر حالت های ناوبری دارد.

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

REFERENCES

- Anonymous. International Maritime Organization. (2017). Retrieved March, [https:// business.un.org/en/entities/13](https://business.un.org/en/entities/13).
- Bertaska, I.R., Shah, B., Ellenrieder, K., Švec, P., Klinger, W., Sinisterra, A.J., Dhanak, M., Gupta, S.K. (2015). Experimental evaluation of automatically-generated behaviors. *Ocean Engineering*. 106, 496-514.
- Bibuli, M., Bruzzone, G., Caccia, M., Lapierre, L. (2009). Path-following algorithms and experiments for an unmanned surface vehicle. *Journal of Field Robotics*. 26, 669-688.
- Caccia, M., Bono, R., Bruzzone, G., Bruzzone, G., Spirandelli, e., Veruggio, G., Maria Stortini, A., Capodaglio, G. (2005). An autonomous craft for the study of sea-air interactions. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 95-105.
- Campbell S., Naeem W., Irwin G.W. (2012). A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres. *Annual Reviews in Control*. 36, 267-283.
- Chavez, F.P., Sevadjan, J., Wahl, C., Friederich, J., Friederich, G.E. (2017). Measurements of pCO₂ and pH from an autonomous surface vehicle in a coastal upwelling system. *Deep-Sea Research Part II*. Accepted paper.
- Corfield, S.J., & Young, J.M. (2008). Unmanned surface vehicles-game changing technology for naval operations. *IET Control Engineering Series (69)*. Chapter 15, 311-326.
- Doa, K.D., Jiang, Z.P., Pana, J. (2004). Robust adaptive path following of underactuated ships. *Automatica*. 40, 929 - 944.
- Elkins L., Sellers D., Monach W.R. (2010). The Autonomous Maritime Navigation (AMN) project: field tests, autonomous and cooperative behaviors, data fusion, sensors, and vehicles. *Journal of Field Robotics*. 27(6), 790-818.
- Fossen, T.I. (1994). *Guidance and control of ocean vehicles*. John Wiley and sons.
- Gomez-Gil, J., Ruiz-Gonzalez, R., Alonso-Garcia, S., Gomez-Gil, F.J. (2013). A Kalman Filter implementation for precision improvement in low-cost GPS positioning of tractors. *Sensors*, 13, 15307-15323.
- Hall S., Randy R. (2004). Use of Autonomous Vehicles for Drinking Water Monitoring and Management in an Urban Environment. ASAE/CSAE Annual International Meeting Sponsored by ASAE/CSAE. Ottawa, Ontario, Canada. 1 - 4 August.
- Hall S.G., Smith D.D., Davis T. (2009). Design of a communications system between multiple autonomous vehicles. ASABE Annual International Meeting Sponsored by ASABE. Nevada. June 21 - June 24.
- Kaizu Y., Iio M., Yamada H., Noguchi N. (2011). Development of unmanned airboat for water-quality mapping. *Biosystems engineering*. 109, 338-347.
- Kang, M., Kwon, S., Park, J., Kim, T., Han, J., Wang, J., Hong, S., Shim, Y., Yoon, S., Yoo, B., Kim, J. (2015). Development of USV autonomy for the 2014 maritime RobotX Challenge. *IFAC-Papers on Line*. 48(16), 13-18.
- Kjerstad Q.K. (2009). Dynamic positioning concepts for unmanned surface vehicles. Master thesis in Department of Engineering Cybernetics, *Norwegian University of Science and Technology*
- Liu, Y., Bucknall, R. (2015). Path planning algorithm for unmanned surface vehicle formations in a practical maritime environment. *Ocean engineering*. 97, 126-144.
- Liu Y., Noguchi N., Yusa T. (2014). Development of an unmanned surface vehicle platform for autonomous navigation in paddy field. *Proceedings of the 19th world congress. The International Federation of Automatic Control Cape Town, South Africa*.
- Ma E. (2015). Two modified unscented Kalman filter and acceleration information in unmanned surface vehicle estimation. *IFAC-Papers on Line*, 48(28), 1450-1455.
- Manda, D., Thein, M.W., D'Amore, A., Armstrong, A. (2015). A low cost system for autonomous surface vehicle based hydrographic survey. *Proceedings: U.S. Hydrographic Conference, National Harbor, MD*, 16-19.
- Muske, K.R., Ashrafiuon, H. (2008). Identification of a control oriented nonlinear dynamic USV model. *American Control Conference*. Westin Seattle Hotel, Seattle, Washington, USA.
- Naeem, W., Henrique, S.C., Hu, L. (2016). A reactive COLREGs-Compliant navigation strategy for autonomous maritime navigation. *IFAC conference archive*. 207-213.
- Naeem, W., Sutton, R, Xu, T. (2012). An integrated multi-sensor data fusion algorithm and autopilot

- implementation in an uninhabited surface craft. *Ocean Engineering*. 39, 43–52.
- Naeem W., Xu T., Sutton R. Chudley J. (2007). Design of an unmanned catamaran with pollutant tracking and surveying capabilities. *Published by the Institution of Engineering and Technology*. 99-113.
- Park, J.H., Shim, H.W., Jun, B.H., Kim, S.M., Lee, P.M. Lim, Y.K. (2010). A model estimation and multi-variable control of an unmanned surface vehicle with two fixed thrusters. 978-1-4244-5222-4/10/\$26.00 ©IEEE.
- Pêtrès, C., Romero-Ramirez, M.A., Plumet, F. (2012). A potential field approach for reactive navigation of autonomous sailboats. *Robotics and Autonomous Systems*. 60, 1520–1527.
- Praczyk, T. (2015). Neural anti-collision system for Autonomous Surface Vehicle. *Neurocomputing*. 149, 559–572.
- Rasal, K. (2013). Navigation & control of an automated SWATH surface vessel for bathymetric mapping. Mechanical Engineering Masters Theses. *Santa Clara University*.
- Sonnenburg, C., Gadre, A., Horner, D., Krageland, S., Marcus, A., Stilwell, D. J., Woolsey, C. A. (2010). Control-oriented planar motion modeling of unmanned surface vehicles. *Virginia Center for Autonomous Systems. Technical Report No. VaCAS-2010-01*.
- Zereik, E., Sorbara, A., Bibuli, M., Bruzzone, G., Caccia, M. (2015). Priority task approach for usvs' path following missions with obstacle avoidance and speed regulation. *IFAC-Papers on Line*. 48(16), 25–30.