

مروری بر روش‌های تلفیق سیستم ناوبری اینرسی و موقعیت‌یاب جهانی و بررسی رویکردهای نو در این زمینه

محمد نوروز
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مسعود ابراهیمی*
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

محمدولی اربابمیر
دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

یکی از روش‌های مهم کاهش خطای ناوبری اجسام در حال حرکت اعم از زمینی، دریایی و هوایی تلفیق سیستم ناوبری اینرسی و سیستم موقعیت‌یاب جهانی است. این تحقیق شامل مقدمه‌ای بر سیستم ناوبری اینرسی، سیستم موقعیت‌یاب جهانی و روش‌های تلفیق دو سیستم و مسائل مهم در زمینه تلفیق است. به این منظور مهم‌ترین تحقیقات انجام‌شده توسط محققین داخلی و خارجی مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر طرح مباحثی نظیر استفاده از فیلتر کالمن، فیلتر کالمن توسعه‌یافته، فیلتر ذره‌ای و روش‌های دیگر بر پایه فیلتر کالمن و ذره‌ای در تلفیق، رویکردهای نو در این زمینه بررسی شده‌اند. نتایج بررسی نشان می‌دهد به‌کارگیری هوش مصنوعی در تلفیق، مسئله قطع یا انسداد سیگنال GPS در تلفیق و استفاده از حس‌گرهای ناوبری اینرسی ارزان‌قیمت در تلفیق از جمله زمینه‌های تحقیقاتی موردتوجه محققین در این زمینه هستند.

واژه‌های کلیدی: سیستم ناوبری اینرسی، سیستم موقعیت‌یاب جهانی، ناوبری تلفیقی، هوش مصنوعی.

A Review of Integrated Navigation System GPS/INS Methods and Study of New Approaches in This Field

M. Norouz

Department of Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

M. Ebrahimi

Department of Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

M.V. Arbabmir

Department of Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

Abstract

The integrated navigation contains Inertial Navigation System (INS) and Global Positioning System (GPS) is an important method in moving vehicles such as ground, sea and aerospace vehicles navigation. This study contains the introduction of INS, the introduction of GPS, the integration method of above systems and important issues in this field. For these purposes, the most important researches of Iranian and overseas scientists are studied. Besides of issues such as using a Kalman Filter (KF), Extended Kalman Filter (EKF), Particle Filter (PF), and other methods based on KF and PF, the new approaches are also surveyed. The study results show that recently using artificial intelligence method in integration, the problem outage or block of GPS signal in integration and low-cost inertial navigation sensors have been the focus of attentions.

Keywords: Inertial Navigation System, Global Positioning System, Integrated Navigation, Artificial Intelligence.

۱- مقدمه

زاویه‌ای و افزودن اثرات سرعت زاویه‌ای زمین و چرخش اضافه وسیله در ارتفاع ثابت بالای زمین و در نهایت انتگرال‌گیری میزان دوران جسم محاسبه می‌شود. عیب اصلی این سیستم افزایش خطای آن با گذشت زمان است، حس‌گرهای ناوبری دارای پهنای باند بالا و نویز نسبتاً کمی هستند. به علت وجود دو انتگرال گیر در فرآیند ناوبری، خطا (با توجه به بایاس^۲ اولیه) به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این افزایش خطا با گذشت زمان نامحدود شده که موجب انحراف زیاد وسیله می‌شود. ساده‌ترین راه برای جلوگیری از خطاهای INS استفاده از حس‌گرهای گران‌قیمت و با دقت بالا و یا راه‌اندازی مجدد این سیستم بعد از یک بازه زمانی است. با توجه به هزینه‌بر بودن روش‌های فوق از سایر سیستم‌های ناوبری همچون GPS به‌صورت تلفیقی با INS استفاده می‌شود. الگوریتم تلفیق باعث کاهش خطای ناوبری نسبت به خطای تک‌تک سیستم‌ها می‌شود. GPS منظومه‌ای از ۲۴ ماهواره که به دور

ناوبری به معنی مشخص نمودن موقعیت، وضعیت و سرعت به‌طور صحیح نسبت به یک دستگاه مرجع مشخص است. در پنج دهه‌ی اخیر رشد نمایی استفاده از تکنولوژی اینرسی به دلیل عدم تأثیرپذیری از محیط خارج در کاربردهای زمینی، دریایی، هوایی نظامی و غیرنظامی به چشم خورده و یکی از مطمئن‌ترین روش‌های ناوبری است. این سیستم به دو شکل کلی صفحه پایدار و متصل به بدنه است. این سیستم متشکل از یک واحد اندازه‌گیری اینرسی^۱ است. IMU شامل سه شتاب سنج و سه ژيروسکوپ است. در این سیستم شتاب ظاهری (غیر جاذبه‌ای) جسم پرنده در راستای سه محور دستگاه مختصات بدنی توسط شتاب سنج اندازه‌گیری می‌شود، با افزودن شتاب جاذبه‌ای به شتاب حاصل از شتاب سنج و انتگرال‌گیری از آن‌ها سرعت و موقعیت به دست می‌آید. همچنین در ژيروسکوپ با اندازه‌گیری سرعت

² Bias

¹ Inertial Measurement Unit (IMU)

زمین می‌چرخند. زمانی که در این سیستم ماهواره‌ای، تمام ماهواره‌ها فعال باشند سیستم می‌تواند اطلاعات لازم برای تعیین موقعیت را به‌طور پیوسته برای تمامی گیرنده‌های مستقر در سراسر دنیا ارسال کند. مهم‌ترین عوامل خطای این سیستم شامل خطای مداری ماهواره، بایاس ساعت گیرنده، خطای چند مسیری شدن^۱، خطای ایزوسفر و تروپوسفر، خطای سرعت نسبی و نویز گیرنده و دریافت ساعت گیرنده است [1]. در تلفیق INS و GPS سه ساختار اساسی، توأم ضعیف^۲، توأم کامل^۳ و فوق‌العاده توأم کامل^۴ یا تلفیق عمیق وجود دارد. به‌منظور بررسی کارهای انجام‌شده در زمینه ناوبری تلفیقی GPS/INS در مرجع [2] مباحث فیلتر کالمن، فیلتر کالمن توسعه‌یافته، فیلتر کالمن بی‌بو^۵، فیلتر ذره‌ای و هوش مصنوعی تا سال ۲۰۰۹ ارائه شده است. در ادامه علاوه بر ارتقای مباحث فوق مباحث فیلترهای ترکیبی، بررسی موضوع قطع GPS و استفاده از حس‌گرهای ارزان‌قیمت در مراجع فارسی تا سال ۱۳۹۵ و منابع لاتین معتبر از ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶ بررسی شده‌اند. ساختار این تحقیق بدین شکل است که در بخش ۲ انواع فیلترهای مورد استفاده در سیستم تلفیق، سیستم تلفیقی مبتنی بر هوش مصنوعی در بخش ۳، در بخش ۴ مسئله قطع یا انسداد GPS در سیستم تلفیق و حس‌گرهای ناوبری ارزان‌قیمت در سیستم تلفیق در بخش ۵ مورد بررسی قرار گرفته‌اند و در نهایت در بخش ۶ نتیجه‌گیری از تحقیق انجام‌شده، ارائه شده است.

۲- فیلترها

کارهای مختلفی در زمینه استفاده از KF، EKF، PF و انواع مختلف خانواده آن‌ها و فیلترهای ترکیبی به‌عنوان عاملی برای ترکیب اطلاعات INS و GPS انجام شده است که مراجع [27]–[3] بیانگر مهم‌ترین آن‌ها می‌باشند. در مرجع [3] الگوریتم تلفیق بهینه اطلاعات INS و اطلاعات مکانی حس‌گر ناوبری غیر اینرسی GPS طراحی شده است. استفاده از اطلاعات سرعتی GPS علاوه بر اطلاعات مکانی موجب تخمین بهتر نسبت به حالتی که فقط اطلاعات مکانی در دسترس باشد، می‌شود. در مرجع [4] از EKF برای بهبود سیستم ناوبری تلفیقی برای کاربردهای نظامی و غیرنظامی استفاده شده است. حجم محاسبات در این روش نسبت به PF بسیار کمتر بوده است، همچنین این فیلتر دقت مناسبی را در کاربردهای فضایی فراهم می‌کند. در مرجع [5] با بیان اینکه KF در معرض ناپایداری و بروز خطاهای عددی است، تلفیق بهینه اطلاعات GPS/INS با EKF ارائه شده است. در مرجع [6] بر اساس نتایج تجربی، صحت‌گذاری بر سیستم تلفیقی GPS/INS به کمک EKF صورت گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده از تست‌ها، دقت و عملکرد قابل‌قبول الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. در مرجع [7] از یک EKF حالت خطا برای کاهش خطای تعیین موقعیت در سیستم ناوبری تلفیقی توأم ضعیف GPS/INS استفاده شده است. در مرجع [8] تلفیقی از سیستم INS متصل به بدنه با دقت کم و GPS را بر مبنای میرایی خطای تطبیق به کمک EKF ارائه شده است. مزیت اصلی این تلفیق

مشمول بر دسترسی به پارامترهای ناوبری منطقی در زمان عدم دسترسی به GPS است. در مرجع [9] به کمک PF فازی، دقت ناوبری سیستم تلفیقی GPS/INS بهبود یافته است. تنظیم تعداد ذرات در PF با کمک منطق فازی صورت گرفته است. در مرجع [10] تطبیق وزن-های PF در سیستم ناوبری GPS/INS مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [11] از PF تطبیقی فازی در ناوبری تلفیقی GPS/INS استفاده شده است. تعداد ذرات دقت فیلتر و حجم محاسبات را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در انتها مقایسه‌ای بین عملکرد PF فازی تطبیقی و EKF صورت گرفته است. در مرجع [12] به تلفیق INS و GPS و بهبود عملکرد آن به کمک KF تطبیقی فازی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که تلفیق تطبیقی فازی با تنظیم تطبیقی ماتریس‌های Q یا R (به ترتیب نویز فرآیند و اندازه‌گیری می‌باشند) عملکرد بهتری نسبت به تلفیق معمولی که در آن ماتریس‌ها Q و R دو ثابت می‌باشند، دارد. در مرجع [14] از فیلتر کالمن مکعبی^۶ برای بهبود عملکرد سیستم ناوبری تلفیق GPS/INS استفاده شده است. مقایسه نتایج این فیلتر با EKF، نمایش‌دهنده عملکرد بهتر و قابلیت اطمینان بالاتر این فیلتر است. در مرجع [13] از UKF و CKF برای تلفیق INS و GPS استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از عملکرد بهتر فیلترهای غیرخطی بیان‌شده به‌منظور تخمین و حذف خطای سیستم ناوبری می‌باشند. در مرجع [15] هم‌محور سازی^۷ در حین حرکت سیستم ترکیبی GPS/INS با استفاده از الگوریتم‌های تخمین بهینه و مقاوم مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌محور سازی فرآیندی است که جهت بردارهای INS را بر اساس جهات سیستم مرجع محاسبه می‌کند. در مرجع [16] از KF فازی تطبیقی برای ناوبری تلفیقی GPS/INS استفاده شده است. در اینجا تطبیق با تنظیم تطبیقی ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری R و نویز پردازش Q توسط سیستم فازی صورت می‌گیرد. در مرجع [17] از یک فیلتر کالمن مقاوم^۸ برای تلفیق داده‌های INS ارزان‌قیمت متصل به بدنه و GPS استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشانگر حساسیت کمتر فیلتر نسبت به نویز ضربه^۹ و تخمین بهتر پارامترهای ناوبری است. در مرجع [18] مقایسه‌ای بین بعضی از فیلترها همچون EKF، UKF، فیلتر تفاضلی متمرکز مرتبه دوم^{۱۰} در کاربرد تلفیق INS ارزان‌قیمت و GPS صورت گرفته است. دو فیلتر UKF و CDF2 می‌توانند ابزار قدرتمندی برای رسیدن به پاسخ مناسب در سیستم ناوبری تلفیقی GPS/INS باشند. در مرجع [19] از بینایی اضافه‌شده به PF که ترکیبی نامیده می‌شود برای تلفیق INS ارزان‌قیمت میکروالکترومکانیکی^{۱۱} و GPS استفاده شده است. الگوریتم تلفیق ارائه‌شده در زمان قطع GPS دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به KF است. در مرجع [20] فیلتر کالمن نرخ دوگانه^{۱۲} توسعه‌یافته برای تلفیق GPS حامل فاز و GPS شبه‌فاصله با اندازه‌گیری‌های INS استفاده شده است. در مرجع [21] از فیلترهای کالمن غیرخطی و فیلترهای ذره‌ای برای ناوبری تلفیقی یک پرنده بدون سرنشین استفاده شده است. در

⁶ Cubature Kalman Filter (CKF)

⁷ Alignment

⁸ Robust Kalman Filter (RKF)

⁹ Impulsive Noise

¹⁰ Second Order Central Difference Filter (CDF2)

¹¹ Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)

¹² Dual-Rate Kalman Filter

¹ Multipath

² Loosely coupled

³ Tightly Coupled

⁴ Ultra-Tightly Coupled

⁵ Unscented Kalman Filter (UKF)

می‌گردد. در مرجع [31] از شبکه عصبی و تکنولوژی حذف نویز بر مبنای موجک برای تلفیق SINS/GPS/Magnetometer به دلیل اینکه دقت سیستم در زمان قطع GPS کاهش می‌یابد، استفاده شده است. شبکه عصبی با استفاده از اطلاعات سرعت و موقعیت فراهم‌شده به‌وسیله INS به‌عنوان ورودی و خطاهای متناظر به‌عنوان خروجی کار می‌کنند. آنالیز موجک برای حذف نویز خطاها معرفی شده است. به‌کارگیری هم‌زمان شبکه عصبی و موجک باعث بهبود دقت سیستم در زمان استفاده عادی از سیگنال GPS می‌گردد. در مرجع [32] به‌منظور دقت در تعیین موقعیت سیستم ناوبری تلفیقی GPS/INS در زمان قطع GPS یک مدل ترکیب‌شده از فیلتر کالمن ردیاب قوی⁵ و شبکه عصبی موجک⁶ برای جبران خطاهای INS ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [33] تلفیق GPS/INS بر مبنای شبکه‌های عصبی مختلف همچون شبکه عصبی انتشار خطا⁷، شبکه عصبی المن⁸ و شبکه عصبی جردن⁹ با استفاده از BPA¹⁰، بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و کلونی ذرات صورت گرفته است، همچنین پارامترهای عملکردی آن‌ها همچون میانگین قدر مطلق خطا و ریشه میانگین مربعات خطا، شاخص عملکرد، شاخص حساسیت، زمان آزمایش شبکه‌ها و تعداد تکرارها مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [34] اندازه‌گیری سیستم ناوبری متشکل از GPS و INS ارزان‌قیمت بر مبنای تکنیک‌های مختلف هوش مصنوعی همچون ساختارهای شبکه‌های عصبی و سیستم استدلال فازی-عصبی تطبیقی¹¹ بهینه‌سازی شده است. در مرجع [35] موجک حذف نویز برای بهبود نسبت سیگنال به نویز از هر حس‌گر INS به کار رفته است. علاوه بر این ماژول فازی-عصبی برای ایجاد یک پیش‌بینی منطقی از موقعیت وسیله در زمان قطع GPS به کار رفته است. نتایج تست زمینی نشانگر مؤثر بودن این ماژول است. در مرجع [36] ابتدا یک تابع تقریب‌زن شبکه عصبی فازی جدید برای مدل‌سازی سیستم-های غیرخطی ناشناخته استفاده شده، سپس فرآیند طراحی و پیاده‌سازی بهنگام¹² یک مشاهده‌گر عصبی فازی انطباقی¹³ در سیستم تعیین موقعیت تلفیقی سیستم ناوبری ارزان‌قیمت MEMS با GPS ارائه شده است.

۴- مسئله قطع یا انسداد سیگنال GPS

در دهه اخیر، مشکل قطع یا انسداد سیگنال GPS به‌طور وسیع در تلفیق GPS/INS مورد بررسی قرار گرفته و یکی از چالش‌های دانشمندان علم ناوبری می‌باشد. مراجع [37]، [35]، [32]، [28]، [19]، [41] بیانگر مهمترین تحقیقات انجام شده در این موضوع و رفع آن می‌باشند. در ادامه به اختصار در مورد هر مقاله توضیحاتی ارائه شده است. مرجع [19] در بخش فیلترها و مراجع [35]، [32]، [28] در بخش روش‌های هوش مصنوعی همچون شبکه‌های عصبی مورد بررسی قرار

این مرجع مقایسه‌ای بین روش‌های فیلتر کالمن غیرخطی و روش‌های فیلتر ذره‌ای برای تخمین بردار متغیرهای حالت وسایل بدون سرنشین هوایی صورت گرفته است. نشان داده شده که فیلتر کالمن نقاط سیگما¹ منطقی‌تر بوده و رویکرد مناسب محاسباتی برای کنترل تخمین مبنای متغیرهای حالت داراست، درحالی‌که PF مناسب برای تطبیق اندازه‌گیری‌های غیر گوسی است. در مرجع [22] از فیلتر EKF و UKF در تلفیق دو سیستم INS و GPS استفاده شده و با توجه به عملکرد و پیچیدگی سیستم تلفیق مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرجع [23] مقایسه‌ای بین عملکرد ناوبری برای فیلترهای غیرخطی همچون EKF، UKF، UKPF، UPF ارائه شده است. در مرجع [24] به ارزیابی عملکرد سیستم ناوبری GPS/INS فوق‌العاده توأم کامل تلفیق‌یافته با استفاده از فیلتر کالمن بی‌بو ردیاب قوی فازی² پرداخته شده است. فیلتر FASTUKF بر مبنای ترکیب یک UKF و یک الگوریتم ردیابی قوی به‌منظور انجام تطبیق پارامتر برای ویژگی‌های دینامیکی مختلف به کار رفته است. در مرجع [25] برای غلبه بر مشکل استفاده از UKF برای ناوبری تلفیقی GPS/INS با نرخ‌های مختلف به علت بار محاسباتی بالای سیستم، از یک UKF اصلاح‌شده که باعث کاهش بار محاسباتی می‌گردد استفاده شده است. در مرجع [26] از فیلتر کالمن ترکیبی برای تلفیق سیستم GPS/INS با در نظر گرفتن اثر ثابت Lever Arm (فاصله بین گیرنده GPS و INS) استفاده شده است. در مرجع [27] از فیلتر کالمن بی‌بو اشتقاقی³ برای ناوبری تلفیقی GPS/INS فوق‌العاده توأم کامل استفاده شده است. این فیلتر مطابق با بخش کوچکی از فیلتر کالمن متعارف برای فرآیند پیش‌بینی و با به‌کارگیری روش انتقال بی‌بو در مرحله به‌روزرسانی کار می‌کند.

۳- روش‌های بر پایه‌ی هوش مصنوعی

در چند دهه اخیر، به‌منظور به دست آوردن پاسخ دقیق ناوبری روش‌های عصبی، فازی و ترکیب بین آن‌ها ارائه شده است که مراجع [36]-[28] بیانگر مهم‌ترین تحقیقات ارائه‌شده می‌باشند. در مرجع [28] از شبکه‌های عصبی برای ترکیب اطلاعات INS و GPS استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی عملکرد بسیار بهتر شبکه عصبی را در مقایسه با KF در زمان قطع سیگنال GPS نشان می‌دهد. در مرجع [29] از شبکه عصبی MLP برای ترکیب اطلاعات دو سیستم INS و GPS استفاده شده است. در این روش شبکه عصبی مصنوعی⁴ در فاز آموزش، دینامیک سیستم و حس‌گرها را فراگرفته و سپس در فاز اعتبار دهی با استفاده از پارامترهای آموزش‌دیده و بدون نیاز به داده‌های جدید ترکیب اطلاعات را انجام می‌دهند. در مرجع [30] الگوریتم تطبیقی فازی در سیستم ناوبری تلفیقی به کار رفته است. بدین منظور از یک فیلتر کالمن تطبیقی با منطق فازی در الگوریتم تلفیق GPS/INS استفاده شده است. کنترلر تطبیقی با منطق فازی برای اصلاح واریانس نویز اندازه‌گیری به کار رفته است؛ بنابراین KF با متغیرهای بهینه تنظیم شده که در نهایت باعث بهبود دقت سیستم ناوبری تلفیقی

⁵ Strong Tracking Kalman Filter (STKF)

⁶ Wavelet Neural Network (WNN)

⁷ Back Propagation Neural Network (BPNN)

⁸ Elman

⁹ Jordan

¹⁰ Back Propagation Algorithm (BPA)

¹¹ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

¹² Real-Time

¹³ Adaptive Fuzzy Neuro-Observer

¹ Sigma Point Kalman Filter (SPKF)

² Fuzzy Adaptive Strong Tracking Unscented Kalman Filter (FASTUKF)

³ Derivative UKF

⁴ Artificial Neural Network (ANN)

گرفته‌اند. در مرجع [37] ترکیب GPS/INS و ISM¹ برای محیط‌های ناشناس ارائه شده است. سیستم SLAM یک سیستم کمک ناوبری که قابلیت ساخت نقشه به‌روز و استفاده هم‌زمان از نقشه تولیدشده را دارا می‌باشد. سیستم تلفیقی SLAM با سیستم GPS/INS یک نقشه را بر اساس علائم زمینی ایجاد می‌کند که اگر GPS در دسترس نباشد، نقشه تولید شده قبلی و/یا جدید برای محدود کردن خطای INS استفاده می‌شود. در مرجع [38] سیستم ناوبری تلفیقی مبتنی بر تصویر برای زمان قطع سیگنال سیستم GPS ارائه شده است. در این روش تصاویری از مسیر پرواز پهباد در کامپیوتر پهباد ذخیره شده و در طی مسیر، تصاویر دریافتی از طریق دوربین با تصویر ذخیره شده تطبیق داده می‌شود. در مرجع [39] سیستم تلفیق GPS/INS ترکیب‌شده با بینایی برای ناوبری هلی‌کوپتر در زمان انسداد، اختلال و از دست رفتن سیگنال GPS در سرعت یا مانور بالا ارائه شده است. هسته الگوریتم تکنیک بینایی SLAM می‌باشد. در مرجع [40] مشاهدات حامل فاز دیفرانسیلی سیستم GPS با سنسورهای اندازه‌گیری با نرخ بالا همچون یک IMU در یک رویکرد توأم کامل به واسطه یک فیلتر کالمن توسعه یافته مشتق آزاد² را در زمان قطع موقت GPS تلفیق یافته و پاسخ مناسب در زمانی که تعداد ماهواره‌ها کمتر از چهار گردد، بدست آمده است. در مرجع [41] از الگوریتم شبکه عصبی به‌عنوان جایگزین در زمان عدم دسترسی به سیگنال GPS استفاده شده است. وقتیکه از INS ارزان‌قیمت استفاده شود، شبکه عصبی در تعمیم ناشی از مقادیر بالای نویزها دارای فقدان می‌باشد. در این تحقیق از تئوری Dampster-Shafer افزوده به Support Vector Machines استفاده شده و با عنوان DS-SVM شناخته می‌شود. تلفیق داده‌های GPS و INS به کمک DS می‌باشد و SVM خطای INS را مدل می‌کند. در زمان دسترسی به GPS، DS فراهم‌کننده پاسخ دقیق بوده درحالی‌که در زمان قطع GPS مدل SVM خطای INS را تصحیح کرده و باعث بهبود در تعیین موقعیت می‌شود. روش ارائه‌شده در برابر شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون درختی تصادفی³ مورد بررسی قرار گرفته است.

۵- حس‌گرهای ناوبری اینرسی ارزان‌قیمت

در این بخش تلفیق سیستم ناوبری اینرسی ارزان‌قیمت با GPS مورد بررسی قرار می‌گیرد که مراجع [17]-[19], [34], [36], [42]-[45]، بیانگر مهم‌ترین تحقیقات انجام‌شده در این زمینه می‌باشند مراجع [34], [36] در بخش روش‌های هوش مصنوعی همچون شبکه‌های عصبی و مراجع [17]-[19] به‌طور مشترک در بخش‌های فیلترها و مسئله قطع یا انسداد سیگنال GPS مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مرجع [42] از تلفیق حس‌گرهای ارزان‌قیمت با GPS به کمک KF در ناوبری یک هواپیمای بدون سرنشین استفاده شده است. در مرجع [43] از تلفیق MEMS با روش سینماتیک آبی GPS برای کاربردهای دقیق استفاده شده است. در مرجع [44] سیستم GPS و کالیبراسیون هوشمند سیستم ناوبری مبتنی بر MEMS ارائه شده است. این روش مبتنی بر شبکه عصبی پیشنهاد شده است. در مرجع [45] از روش

RFR برای تلفیق اطلاعات سیستم ناوبری اینرسی ارزان‌قیمت و سیستم GPS برای دستیابی به پاسخ ناوبری دقیق، منطقی و پیوسته استفاده شده است. در این روش با مدل‌سازی خطای INS در زمان دسترسی به GPS، پاسخ ناوبری در زمان عدم دسترسی به GPS فراهم می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

هدایت و کنترل یک وسیله نیازمند موقعیت، سرعت و وضعیت مشخص است که این مهم به کمک سیستم ناوبری وسیله مشخص می‌گردد. در چند دهه اخیر از سیستم تلفیقی GPS/INS در ناوبری استفاده شده است. استفاده از این سیستم موجب پوشش دهی نقاط ضعف و قوت دو سیستم توسط یکدیگر می‌گردد. در این تحقیق مروری بر تحقیقات صورت گرفته در ناوبری تلفیقی GPS/INS و رویکردهای جدید در این زمینه انجام شده و می‌توان گفت: از KF و انواع آن به‌کرات در سیستم تلفیق استفاده شده و یکی از ابزارهای مناسب در تخمین سیستم تلفیق به شمار می‌رود. از PF به‌ندرت در سیستم تلفیق استفاده شده است. ظاهراً این عدم اقبال به دلیل محاسبات زیاد این روش است. فیلترهای ترکیبی از جمله عوامل بهبود بخش در سیستم ناوبری تلفیقی به شمار می‌روند. رفع مشکل قطع یا انسداد سیگنال GPS در چند سال اخیر بسیار موردتوجه قرار گرفته است. استفاده از شبکه‌های عصبی و هوش مصنوعی در چند سال اخیر بسیار موردتوجه دانشمندان در زمینه تلفیق قرار گرفته است. به‌طوری‌که به کمک این روش مشکل قطع یا انسداد سیگنال GPS قابل حل خواهد بود. استفاده از حس‌گرهای اینرسی ارزان‌قیمت در ناوبری تلفیقی همواره و مخصوصاً در زمان قطع یا انسداد سیگنال GPS موردتوجه دانشمندان علم ناوبری بوده است.

۷- مراجع

- [1] قنبرپوراصل حبیب، تلفیق GPS/INS با استفاده از فیلترهای غیرخطی تطبیقی، پایان‌نامه دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۶.
- [2] Hasan A. M., Samsudin K., Ramli A. R., Azmir. and Ismael S. A., A Review of Navigation Systems (Integration and Algorithms), Vol. 3, No. 2, pp. 943-959, 2009.
- [3] نصراللهی بروجنی سعید و قهرمانی نعمت‌الله، تلفیق اطلاعات موقعیتی و سرعتی GPS با اطلاعات سیستم ناوبری اینرسی به کمک فیلتر کالمن برای افزایش دقت ناوبری یک جسم پرنده، سیزدهمین کنفرانس دانشجویی برق ایران، ۱۳۸۹.
- [4] جعفری مهدی، سنگری آرش، روشیان جعفر، تلفیق ناوبری اینرسی با سیستم موقعیت‌یاب جهانی جهت افزایش دقت ناوبری در مازول مداری، دهمین همایش انجمن هوافضای ایران، ۱۳۸۹.
- [5] روستایی سعید، قره داغی بابک، تلفیق بهینه اطلاعات INS/GPS با فیلتر کالمن توسعه‌یافته، اولین همایش ملی مهندسی برق و کامپیوتر در شمال کشور، ۱۳۹۳.
- [6] نورمحمدی حسین، ثابت محمدتقی، عنایتی جواد، زرینی لاریمی مصطفی، طراحی سیستم ناوبری اینرسی تلفیقی INS/GPS با استفاده از فیلتر تخمین‌زن EKF و صحه‌گذاری آن براساس نتایج تجربی، هفدهمین همایش صنایع دریایی، ۱۳۹۴.
- [7] حسینپور علی، غلامی اصغر، زارعی نادعلی، استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته حالت خطا برای سیستم ناوبری تلفیقی INS/GPS Loosely coupled، همایش یافته‌های نوین در هوافضا و علوم وابسته، ۱۳۹۴.
- [8] Stančić R., Graovac S., Stani R. and Graovac S., The

¹ Simultaneous Localization And Mapping (SLAM)

² Derivative-Free EKF

³ Random Forrest Regression (RFR)

- coupled INS/GPS integrated navigation, *ISA Trans.*, vol. 56, pp. 135–144, 2015.
- [28] گرچی سفیدمزمگی محمد، فرخی محمد، ترکیب اطلاعات ناوبری اینرسی و GPS به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی، هفتمین همایش انجمن هوافضای ایران، ۱۳۸۶.
- [29] صادقی محسن، عبدالمی سعید، مدل‌سازی خطای سیستم INS و تصحیح اطلاعات آن با سیگنال GPS به کمک شبکه عصبی MLP، دومین کنفرانس ملی اوبونیک ایران، ۱۳۹۳.
- [30] Liu M. and Xiong F., A fuzzy adaptive GPS/INS integrated navigation algorithm, *Procedia Eng.*, Vol. 15, pp. 660–664, 2011.
- [31] Zhang T. and Xu X., A new method of seamless land navigation for GPS/INS integrated system, *Measurement*, Vol. 45, No. 4, pp. 691–701, 2012.
- [32] Chen X., Shen C., Bin Zhang W., Tomizuka M., Xu. and Chiu K., Novel hybrid of strong tracking Kalman filter and wavelet neural network for GPS/INS during GPS outages, *Measurement*, Vol. 46, No. 10, pp. 3847–3854, 2013.
- [33] Malleswaran M., Vaidehi V. and Sivasankari N., A novel approach to the integration of GPS and INS using recurrent neural networks with evolutionary optimization techniques, *Aerosp. Sci. Technol.*, Vol. 32, No. 1, pp. 169–179, 2014.
- [34] Saadeddin K., Abdel-Hafez M. F., Jaradat M. A. and Jarrah M. A., Optimization of intelligent approach for low-cost INS/GPS navigation system, *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, Vol. 73, No. 1–4, pp. 325–348, 2014.
- [35] El-Shafie A., Najah A. and Karim O. A., Amplified wavelet-ANFIS-based model for GPS/INS integration to enhance vehicular navigation system, *Neural Comput. Appl.*, Vol. 24, No. 7–8, pp. 1905–1916, 2014.
- [36] Musavi N. and Keighobadi J., Adaptive fuzzy neuro-observer applied to low cost INS/GPS, *Appl. Soft Comput. J.*, Vol. 29, pp. 82–94, 2015.
- [37] ارغوان حسین، اکبری محمدکاظم، تلفیق سیستم ناوبری GPS/INS با SLAM در محیط‌های ناشناس، چهاردهمین کنفرانس مهندسی برق، ۱۳۸۵.
- [38] مرادنژاد سرخکلایی مهرداد، سیستم ناوبری مبتنی بر تصویر برای پهپاد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، ۱۳۹۰.
- [39] Kim J., Lyou J. and Kwak H., Vision coupled GPS/INS scheme for helicopter navigation, *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 24, No. 2, pp. 489–496, 2010.
- [40] Geng Y., Deurloo R. and Bastos L., Hybrid derivative-free extended Kalman filter for unknown lever arm estimation in tightly coupled DGPS/INS integration, *GPS Solut.*, Vol. 15, No. 2, pp. 181–191, 2011.
- [41] Bhatt D., Aggarwal P., Devabhaktuni V. and Bhattacharya P., A novel hybrid fusion algorithm to bridge the period of GPS outages using low-cost INS, *Expert Syst. Appl.*, Vol. 41, No. 5, pp. 2166–2173, 2014.
- [42] صفایی احمد، مهربانی محمد، اشعری فاطمه، کیایی فاطمه، طراحی و پیاده‌سازی سیستم هدایت، کنترل و ناوبری برای یک هواپیمای بدون سرنشین با استفاده از سنسورهای ارزان قیمت، هشتمین همایش انجمن هوافضای ایران، ۱۳۸۸.
- [43] عسگری جمال، امیری سیمکویی علیرضا، زنگنه نژاد فرانز، تلفیق سیستم ناوبری اینرسی الکترومکانیکی با روش سینماتیک آبی GPS برای کاربردهای دقیق، فصلنامه علمی-پژوهشی علوم و فنآوری فضایی، ۱۳۹۱.
- [44] خسروی عمروآبادی حسن، کالیبراسیون هوشمند سیستم ناوبری مبتنی بر MEMS با استفاده از سیستم کمک ناوبری GPS، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعت آب و برق، ۱۳۹۱.
- [45] Adusumilli S., Bhatt D., Wang H., Bhattacharya. and Devabhaktuni V., A low-cost INS/GPS integration methodology based on random forest regression, *Expert Syst. Appl.*, Vol. 40, No. 11, pp. 4653–4659, 2013.
- integration of strap-down INS and GPS based on adaptive error damping, *Rob. Auton. Syst.*, Vol. 58, No. 10, pp. 1117–1129, 2010.
- [9] ع. اسدیان علی، مشیری بهزاد، بهبود دقت ناوبری در سیستم تلفیقی GPS/INS توسط فیلتر ذره‌ای فازی، چهاردهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ۱۳۸۵.
- [10] شریفیان مهتاب السادات، محمددادی غلامرضا، پریز ناصر، تطبیق وزن-های فیلتر ذره‌ای در سیستم ناوبری GPS/INS، پنجمین کنفرانس ملی مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۲.
- [11] رفیعی مصطفی، تلفیق سیستم ناوبری اینرسی متصل به بدنه و سیستم موقعیت‌یاب جهانی با استفاده از فیلتر ذره‌ای تطبیقی فازی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شیراز، ۱۳۹۲.
- [12] هاونگی رمضان، تلفیق GPS/INS و بهبود عملکرد آن با فیلتر کالمن تطبیقی فازی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۱.
- [13] ع. رضانی، بهبود عملکرد سیستم ناوبری اینرسی با استفاده از فیلترهای کالمن خنثی و مکعبی، دانشگاه صنعتی شیراز، ۱۳۹۲.
- [14] زارعی جعفر، رضانی عبدالرحمان، بهبود عملکرد سیستم ناوبری تلفیقی GPS/INS با بهره‌گیری از فیلتر کالمن مکعبی، پنجمین کنفرانس ملی مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۲.
- [15] رفعت نیا صدرا، هم محروسازی در حین حرکت سیستم ترکیبی INS/GPS با استفاده از الگوریتم‌های تخمین پهنه و مقاوم، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۳.
- [16] وارسته محمد، تلفیق GPS/INS با استفاده از فیلتر کالمن فازی تطبیقی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۴.
- [17] Ali J., Ushaq M. and Payerle G., A consistent and robust Kalman filter design for in-motion alignment of inertial navigation system, *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, Vol. 42, No. 4, pp. 577–582, 2009.
- [18] Ali J., Mirza M. R. U. B. and Team R. C., Performance comparison among some nonlinear filters for a low cost SINS/GPS integrated solution, *Nonlinear Dyn.*, Vol. 61, No. 3, pp. 491–502, 2010.
- [19] Leung K. T., Whidborne J. F., Purdy D. and Barber P., Road vehicle state estimation using low-cost GPS/INS, *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 25, No. 6, pp. 1988–2004, Aug. 2011.
- [20] Georgy J., Karamat T., Iqbal U. and Noureldin A., Enhanced MEMS-IMU/odometer/GPS integration using mixture particle filter, *GPS Solut.*, Vol. 15, No. 3, pp. 239–252, 2011.
- [21] Rigatos G. G., Nonlinear Kalman filters and particle filters for integrated navigation of unmanned aerial vehicles, *Rob. Auton. Syst.*, Vol. 60, No. 7, pp. 978–995, 2012.
- [22] J. N. Gross, Y. Gu, M. B. Rhudy, S. Gururajan, and M. R. Napolitano, Flight-Test Evaluation of Sensor Fusion Algorithms for Attitude Estimation, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 48, No. 3, pp. 2128–2139, 2012.
- [23] Jwo D. J. J., Chung F. C. C. and Yu K. L. L., GPS/INS Integration Accuracy Enhancement Using the Interacting Multiple Model Nonlinear Filters, *J. Appl. Res. Technol.*, Vol. 11, No. 4, pp. 496–509, 2013.
- [24] Jwo D.-J. J., Yang C.-F. F., Chuang C.-H. H. and Lee T.-Y. Y., Performance enhancement for ultra-tight GPS/INS integration using a fuzzy adaptive strong tracking unscented Kalman filter, *Nonlinear Dyn.*, Vol. 73, No. 1–2, pp. 377–395, 2013.
- [25] Enkhtur M., Cho S. Y. and Kim K.-H., Modified Unscented Kalman Filter for a Multirate INS/GPS Integrated Navigation System, *ETRI J.*, Vol. 35, No. 5, pp. 943–946, 2013.
- [26] bin Chang G. and Liu M., Hybrid Kalman and unscented Kalman filters for INS/GPS integrated system considering constant lever arm effect, *J. Cent. South Univ.*, Vol. 22, No. 2, pp. 575–583, 2015.
- [27] Hu G., Gao S. and Zhong Y., A derivative UKF for tightly