تخمین موقعیت توسط تلفیق سیستم GPS/INS با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته

محمد نوابی[1*]، مانا عظیم عراقی [2]

1- دانشیار، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی

2- دانشجو کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتیma.azim4556@gmail.com

چکیده

سیستم ناوبری اینرسی با استفاده از اطلاعات مکانی، جهت و سرعت اولیه و اندازه گیری سرعت زاویه ای و شتاب ها، محل وسیله نقلیه، جهت و سرعت فعلی متحرک را تخمین می زند. سنسورهای اینرسی معمولاً ، دارای نویز زیاد و عدم اطمینان بالا در خروجی می باشند. در نتیجه، خطای سیستم با گذشت زمان، افزایش می یابد. برای افزایش دقت و کاهش خطای بیشتر با گذشت زمان، سیستم ناوبری اینرسی را با سنسورهای کمکی دیگر مثل GPSترکیب می کنند. ترکیب اطلاعات دو سنسور، نیاز به الگوریتم تخمین دارد. مهم ترین وظیفه سیستم ناوبری تخمین موقعیت وسیله می‌باشد که بتواند با دقت خوبی و خطای بسیار کم و ثابتی تخمین زده شود. در این مقاله به بررسی تخمین موقعیت توسط تلفیق سیتم GPS/INSبا استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته پرداخته‌ایم.روش های ناوبری تلفیقی به طورکلی از الگوریتم‌های فیلترهای کالمن بهره می‌گیرند،که در این پژوهش تخمین موقعیت با استفاده از تلفیق سیستم INS/GPS توسط فیلتر کالمن توسعه یافته انجام شده است. که مشاهده می‌شود تخمین موقعیت با دقت بسیار خوبی و خطای پایین انجام شده است.

واژه های کلیدی: *سیستم ناوبری اینرسی،فیلتر کالمن، فیلتر کالمن توسعه یافته، ناوبری تلفیقی.*

1- مقدمه

امروزه با توجه به گسترش و پیشرفت تکنولوژی مسئله تخمین موقعیت با توجه به کاربرد گسترده آن اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. روش‌های مختلفی برای تعیین موقعیت وسیله وجود دارد، سیستم ناوبری اینرسی یکی از روشهای تعیین موقعیت وسیله نقلیه است که مستقل از فرستنده و لوازم جانبی خارجی کار می‌کند.

امروزه انتظار میرود سامانه های هدایت و ناوبری با دقتی طراحی شوند که تحت شرایط متغیر عملکرد دقیق خود را حفظ کنند در این پژوهش به بررسی روش ناوبری اینرسی، همچنین دقت عملکرد آن‌ها پرداخته‌ایم. با استفاده ازروش های ناوبری تلفیقی، قادر خواهیم بود همواره با گذشت زمان با نرخ اندازه گیری سیستم ناوبری اینرسی، موقعیت وسائل نقلیه را با دقت مناسب و تقریباً ثابتی تخمین بزنیم.

روشهای مختلفی برای تعیین موقعیت وسیله وجود دارد سیستم ناوبری اینرسی یکی از روشهای تعیین موقعیت وسیله نقلیه است که مستقل از فرستنده و لوازم جانبی خارجی کار میکند. تعیین موقعیت در سامانه‌ی ناوبری اینرسی با استفاده از اندازه‌گیری کمیت‌های دینامیکیِ تغییرات زاویه‌ای و شتاب در سه جهت و بر اساس قوانین نیوتن در مکانیک کلاسیک انجام می‌گیرد، اما خروجی سیستم ناوبری اینرسی به علت وجود خطای سنسورها دارای خطا می‌باشد و با گذشت زمان این خطا افزایش پیدا می‌کند و خروجی آن قابل اطمینان نمی‌باشد بنابراین تلفیق سیستم ناوبری اینرسی با یک روش دیگر ضروری می‌باشد. [1]

با پیشرفت روزافزون سنسورها و پیشرفت دنیای الکترونیک و گسترش تحقیقات و نوآوری ها در زمینه تلفیق داده های سنسور ها به منظور دستیابی به بالاترین دقت در حال افزایش است و دقت برآورد سیستم ناوبری اینرسی تلفیق شده با سیستم موقعیت یابی جهانی (GPS) از طریق انواع فیلترهای کالمن به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. [۲]کالمن نقش مهمی ریاضیات مهندسی برای برآورد و مسائل کنترل ایفا کرده است.[3]

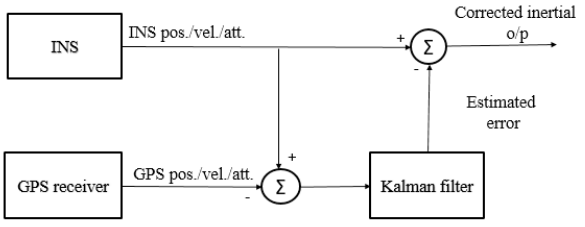
با استفاده ازروش های ناوبری تلفیقی، قادر خواهیم بود همواره با گذشت زمان با نرخ اندازه گیری سیستم ناوبری اینرسی، موقعیت را با دقت مناسب و تقریباً ثابتی تخمین بزنیم.

روش های ناوبری تلفیقی به طورکلی از الگوریتم‌های فیلترهای کالمن یا فیلترهای ذره ای بهره می‌گیرند.

2- تلفیق سیستم ناوبری اینرسی با سیستم موقعیت یاب جهانی

همانطور که گفته شد عیب اصلی سیستم ناوبری اینرسی افزایش خطای آن باگذشت زمان می‌باشد، این افزایش خطا با گذشت زمان، نامحدود شده که موجب انحراف زیاد می‌شود، ساده‌ترین راه برای جلوگیری از خطاهای این سیستم استفاده از سنسورهای گران‌قیمت و با دقت بالا و یا راه‌اندازی مجدد این سیستم بعد از یک بازه زمانی میباشد. با توجه به هزینه-بر بودن روش‌های فوق برای کاهش خطا،معمولاً این سیستم با سایر سیستم‌های ناوبری به‌صورت تلفیقی به‌کار برده می‌شود.

اخیرا تمرکز زیادی بر روی الگوریتم های تلفیق سنسور GPS و INS به ویژه در تخمین موقعیت مطلق شده است که توسط فیلتر کالمن انجام می‌شود. فیلتر کالمن یک تخمین‌گر خطی است که از دینامیک سیستم و داده‌های اندازه‌گیری نویزدار آن برای به دست آوردن یک تخمین بهینه از متغیرهای حالت سیستم استفاده می‌کند. یک نسخه توسعه یافته از این فیلتر (فیلتر کالمن توسعه یافته) معمولاً در تلفیق داده های GPS/INS استفاده می شود.[4,5]



شکل1-نمودار تلفیق سیستم GPS/INS توسط فیلتر کالمن

الگوریتم تلفیق با هدف افزایش دقت ناوبری و استفاده از مزیت هر سیستم ناوبری در رفع عیب سیستم دیگر می‌باشد، چرا که افزایش کارایی هر سیستم ناوبری به‌صورت منفرد نیازمند هزینه بسیار بالا و فناوری‌های پیچیده است بنابراین از یک سیستم کمک ناوبری برای کاهش خطا استفاده می‌شود، مهمترین و بهترین سیستم کمک ناوبری سیستم موقعیتیاب جهانی می‌باشد که به طور مداوم داده های طول، طول و ارتفاع را در اختیار گیرنده های روی زمین قرار می دهد که به منظور به‌روز کردن اطلاعات ناوبری به سیستم ناوبری اینرسی کمک میکند.

سیستم ناوبری اینرسی از چندین حسگر شامل شتاب سنج، ژیروسکوپ، مغناطیس سنج، فشارسنج و غیره تشکیل شده است که معمولاً توسط یک سیستم جرم مکانیکی و فنر مدل سازی می شود. سه شتاب‌سنج و سه ژیروسکوپ در داخل یک واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) که عمود بر یکدیگر قرار گرفته‌اند وجود دارد. با تلفیق شتاب اندازه گیری شده و سرعت زاویه ای، موقعیت، سرعت و زوایای اویلر محاسبه می شود.

3- استخراج معادلات

دستگاه نهایی در این مقاله زمین است که با ^{e} نشان داده می‌شود. و همچنین از دستگاه مختصات اینرسی و بدنی استفاده شده است که به ترتیب با علائم ^{i} و ^{b} نشان داده شده‌اند.

بردار خروجی شتاب سنج در مختصات بدنی توسط $[a_x^b \quad a_y^b \quad a_z^b]^T$ نشان داده میشود.

و خروجی سرعت زاویه ای ژیروسکوپ در مختصات بدنی توسط $[\omega_x^b \quad \omega_y^b \quad \omega_z^b]^T$ نشان داده می‌شود.

بنابراین ماتریس چرخش به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{bmatrix}\dot{\phi}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\psi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & sin\phi tan\theta & cos\phi tan\theta\\ 0 & cos\phi & -sin\phi\\ 0 & sin\phi sec\theta & cos\phi sec\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p\\ q\\ r\end{bmatrix} \qquad (1)$$

که در آن $[[p \quad q \quad r]]^T$ بردار سرعت زاویه‌ای است و با انتگرال‌گیری از $[\dot{\phi} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi}]^T$ زوایای اویلر به دست می آیند.

C_b^e ماتریس انتقال از مختصات بدنی به مختصات زمین است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$C_b^e= \begin{bmatrix}cos\theta cos\psi & sin\phi sin\theta + cos\phi sin\psi & -cos\phi sin\theta cos\psi + sin\phi sin\psi\\ 0 & -sin\phi sin\theta sin\psi + cos\phi cos\psi & cos\phi sin\theta sin\psi + sin\phi cos\psi\\ 0 & -sin\phi cos\theta & cos\phi cos\theta\end{bmatrix} \qquad (2)$$

نمایش فضای حالت وسیله نقلیه به صورت زیر تعریف شده است:

$$\begin{cases}\delta\dot{x}(t) = F(t)\delta x(t) + G(t)u(t)\\ y(t) = H\delta x(t) + w(t)\end{cases} \qquad (3)$$

که در آن u_{acc} و u_{gyro} نویز شتاب سنج و ژیروسکوپ می‌باشد.

$$F(t)=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & -2\Omega_{ie}^e & \tilde{a}^e & 0 & C_b^e\\ 0 & 0 & -\Omega_{ie}^e & -C_b^e & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \qquad (4)$$

$$G(t)=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & C_b^e\\ -C_b^e & 0\\ 0 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix} \qquad (5)$$

$$H(t) = [I_{3.3} \quad I_{3.3} \quad 0_{3.3} \quad 0_{3.3} \quad 0_{3.3}] \qquad (6)$$

هنگامی که داده های GPS فقط حاوی موقعیت هستند، تنها اولین آرایه از این ماتریس $I_{3.3}$ است.

$$u(t)=\begin{bmatrix}u_{acc}\\ u_{gyro}\end{bmatrix} \qquad (7)$$

4- فیلتر کالمن

در سال 1960، کالمن مقاله معروف خود را در توصیف فیلتر کالمن منتشر کرد. فیلتر کالمن مجموعه ای از معادلات ریاضی است که یک راه حل محاسباتی (باز گشتی) کارآمد از روش حداقل مربعات را ارائه می دهد. این فیلتر از چندین جنبه بسیار قدرتمند است: از تخمین وضعیت های گذشته، حال و حتی آینده پشتیبانی می کند و می تواند این کار را حتی زمانی که ماهیت دقیق سیستم مدل شده ناشناخته است انجام دهد.[6]

فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) یک شکل غیرخطی از فیلتر کالمن معروف است که توسط رودلف کالمن در سال 1960 معرفی و به نام آن نامگذاری شد.EKF یک الگوریتم تخمین بازگشتی است که از دو مرحله تکراری تشکیل شده است که فاز به روز رسانی/پیش بینی و مرحله تخمین یا تصحیح است. این فیلتر فقط به جدیدترین اندازه‌گیری‌ها برای پیش‌بینی یا تخمین وضعیت زیر سیستم نیاز دارد که باعث می‌شود EKF سریع‌تر از سایر برآوردگرهای حالت کار کند.[7]

مدل فضای حالت غیرخطی است زیرا ماتریس های F(t) و G(t) شامل اجزای غیرخطی هستند. در نتیجه، به یک مدل خطی شده باید فیلتر کالمن اعمال شود زیرا دینامیک خطی سنسورها ناشناخته است.

برای پیاده سازی فیلتر کالمن در یک سیستم مبتنی بر ریزپردازنده، یک فرم مجزا از مدل فضای حالت مورد نیاز است.

$$\delta x(k+1) = \phi_k \delta x(k) + G_{dk} u(k) \qquad (8)$$

که در آن $u(k)$ نویز فرآیند می‌باشد.

روابط بین شکل پیوسته و گسسته ماتریس های تبدیل شده به صورت زیر می‌باشد.

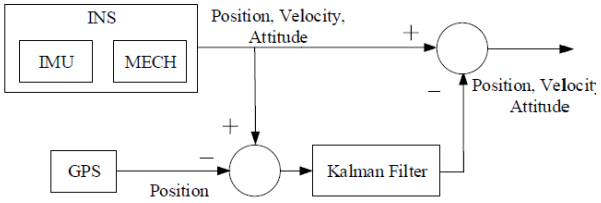
$$\begin{aligned}\phi_k &\approx I + F(KT_s)T_s\\ G_{dk} &= F^{-1}(KT_s)(e^{F(KT_s)T_s} - I)G(KT_s)\\ &\approx G(KT_s)T_s\end{aligned} \qquad (9)$$

که در آن T_s زمان نمونه برداری است.
معادله‌ی اندازه‌گیری به صورت زیر می‌باشد

$$\boldsymbol{\delta y(k) = H_k \delta x(k) + w(k)} \qquad (10)$$

که در آن y(k) اختلاف عددی بین بردارهای GPS و INS و w(k) نویز اندازه گیری است.
در این مقاله یک فیلتر کالمن توسعه یافته پیاده سازی شده است. در مرحله اول فیلتر کردن سیگنال، مقادیر اولیه برای تخمین متغیرهای حالت $\bar{\boldsymbol{x}}_0$ و ماتریس کوواریانس خطای تخمین حالت $\bar{\boldsymbol{p}}_0$ انتخاب می‌شوند. سپس مقدار متغیرهای حالت و ماتریس کوواریانس خطای تخمین حالت برای لحظه بعد به صورت زیر پیش‌بینی می‌شود:

$$\boldsymbol{\delta\bar{\hat{x}}(k+1) = \phi_k \delta\bar{\hat{x}}(k)}$$
$$\boldsymbol{\bar{P}_{k+1} = \phi_k p_k \phi_k^T + G_d Q_{d,k} G_{dk}^T} \qquad (9)$$



شکل2-نمودار عملکرد فیلتر کالمن

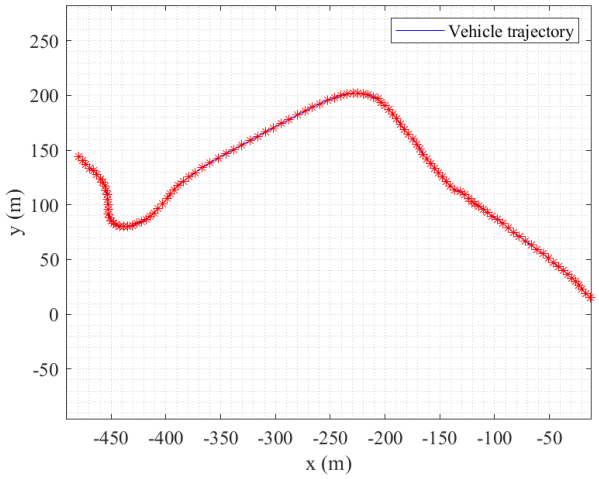
با توجه به شکل 2 ورودی فیلتر کالمن خطای موقعیت INS می‌باشد که اختلاف عددی بین موقعیت INS و آخرین موقعیت داده شده توسط GPS می‌باشد.

5- تست‌های میدانی

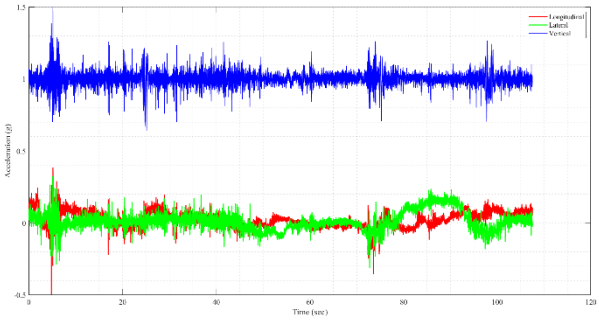
تستای میدانی توسط IMU و GPS که بر روی خودرو نصب شده است در فواصل زمانی مختلف انجام شده است که نشان می‌دهد نتایج شبیه سازی و تخمیت موقعیت توسط فیلتر کالمن توسعه یافته با دقت بسیار بالا و قابل قبولی انجام شده است.
از اطلاعات GPS به عنوان محل دقیق خودرو استفاده شده است. و از خروجی IMU (شتاب سنج) و تلفیق آن با GPS محل خودرو تخمین زده شده است.

6- شبیه سازی

شبیه سازی تست‌های انجام شده و خروجی IMU و GPS در متلب شبیه-سازی شده‌اند.



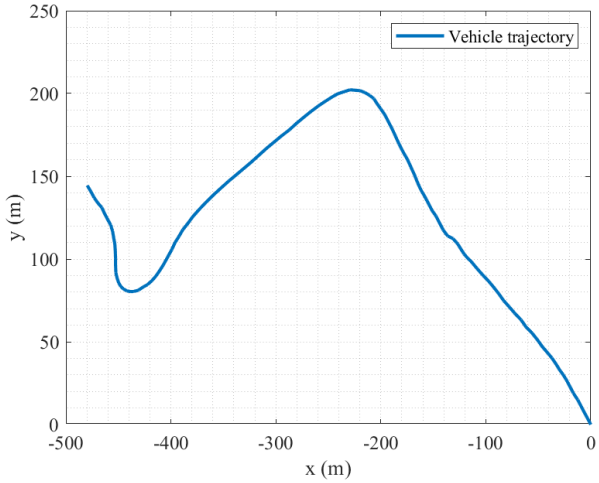
شکل3-نتایج تست‌های میدانی انجام شده



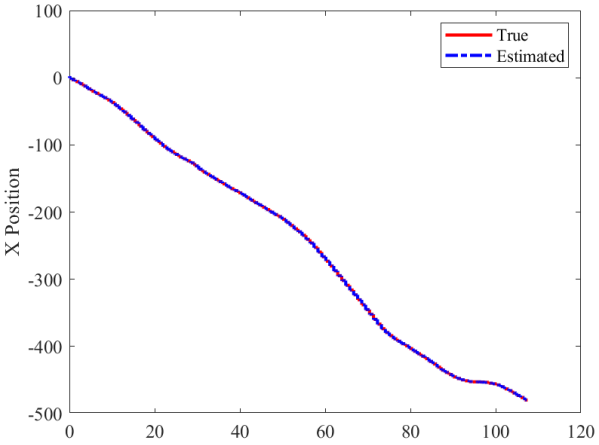
شکل4-نتایج خروجی شتاب‌سنج در تست‌های میدانی

7- پیاده سازی فیلتر کالمن توسعه یافته بر روی نتایج شبیه سازی

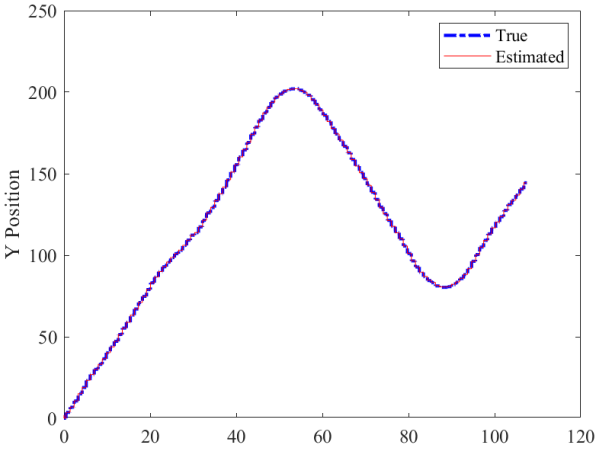
فیلتر کالمن بر روی شبیه سازی‌های انجام شده پیاده شده است و همان‌طور که در نمودار زیر مشخص است فیلتر کالمن موقعیت وسیله نقلیه را هم در جهت x و هم در جهت y با دقت بسیار خوبی تخمین زده است.



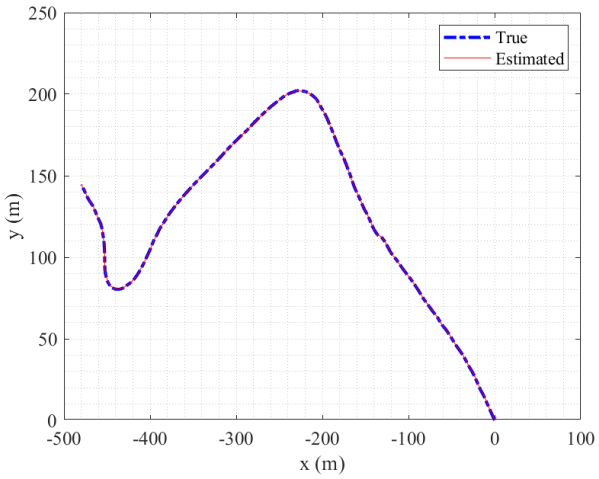
شکل5-مسر حرکت خودرو با توجه به اطلاعات GPS



شکل6-مسر حرکت خودرو و مسیر تخمین زده‌شده در جهت X



شکل7-مسر حرکت خودرو و مسیر تخمین زده‌شده در جهت Y



شکل8-مسر حرکت خودرو و مسیر تخمین زده‌شده در جهت X و Y

8- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مهم ترین وظیفه سیستم ناوبری تخمین موقعیت وسیله می‌باشد که بتواند با دقت خوبی و خطای بسیار کم و ثابتی تخمین زده شود. اما سنسورهای مورد استفاده برای تخمین موقعیت، دارای خطا می‌باشند و برای کاهش این خطاها از روش تلفیق استفاده می‌شود. که از پرکاربردترین و محبوب ترین روش‌های تلفیق، تلفیق GPS/INS می‌باشد. سیستم های GPS و INS دارای خواص مکملی می‌باشند به همین علت تلفیق این دو سیستم بسیار پرکاربد می‌باشد. در این مقاله از روش تلفیق توسط فیلتر کالمن توسعه یافته استفاده شده است.

همانطور که در نتایج مشخص است توسط فیلتر کالمن تخمین با خطای بسیار کمی انجام شده است و خطاهای سنسورها توسط فیلتر کالمن اصلاح شده است.

9- علائم و اختصارها

جدول 1- علائم و اختصارها

انگلیسی	فارسی
INS	سیستم ناوبری اینرسی
GPS	سیستم موقعیت یاب جهانی
IMU	واحد اندازه گیری اینرسی
KF	فیلتر کالمن
EKF	فیلتر کالمن توسعه یافته
C_b^e	ماتریس انتقال از مختصات بدنی به مختصات زمین
Ts	زمان نمونه برداری
$\bar{p}_0$	ماتریس کوواریانس خطای تخمین حالت
PSO	بهینه سازی ازدحام ذرات
ODE	معادله دیفرانسیل معمولی

10- مراجع

[1] Akshaya, T. G., and S. Sreeja. "Multi-sensor data fusion for aerodynamically controlled vehicle based on FGPM." IFAC-PapersOnLine 53.1 (2020): 591-596.

[2] Sabzevari, Danial, and Abbas Chatraei. "INS/GPS sensor fusion based on adaptive fuzzy EKF with sensitivity to disturbances." IET Radar, Sonar & Navigation 15.11 (2021): 1535-1549.

[3] Mohinder S. Grewal; Angus P. Andrews; Chris G. Bartone, "Kalman Filtering," in Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration , Wiley, 2020, pp.355-417, doi: 10.1002/9781119547860.ch10.

[4] Wang J, Lee HK, Hewitson S, Lee HK. Influence of dynamics and trajectory on integrated GPS/INS navigation performance. Positioning. 2002 Dec 1;1(05).

[5] Abbasi, Pouya, and Mohammad Haeri. "Accuracy Improvement of GPS/INS Navigation System Using Extended Kalman Filter." 2019 6th International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA). IEEE, 2019.

[6] Welch, Greg, and Gary Bishop. "An introduction to the Kalman filter." (1995): 127-132.

[7] Ali Alqudaihi,Mohamed Zohdy, Hoda Abdel-Aty-Zohdy." Multi-Sensor Fusion Indoor Security Based on Interval Probability, Extended Kalman Filter and Fuzzy Rules Pruning." Automatic Control and System Engineering Journal, ISSN,2017,1687-4811,17