Research Article

Agricultural Engineering., 48(4) (2025) 569- 587

ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2026.51939.1802

ISSN (E): 2588-5944

Estimation of Tractor Position and Heading Using Kalman Filter–Based Fusion of IMU, GPS, and Digital Compass Data

H. Masoudi[1,2*], S.A. Sharifi[3] and M.E. Khorasani Ferdavani[4]

1. Associate professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3. Graduated M.Sc. student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
4. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 02 January 2026 Accepted: 17 February 2026 *Corresponding Author: hmasoudi@scu.ac.ir

Abstract

Introduction: Automatic guidance of agricultural tractors requires accurate estimation of both position and heading, which can be achieved through the integration of multiple sensors. Combining data from an inertial measurement unit (IMU) cum satellite-based positioning system (GPS) through a Kalman filter significantly enhances the performance of inertial navigation systems (INS). The GPS module provides global position information, while the IMU measures linear acceleration and angular velocity. By processing IMU outputs, the vehicle's local position and orientation can also be estimated. Fusion of GPS and IMU data through a Kalman filter enables precise determination of the tractor's position and heading. This study aimed to develop anINS for determining the position and heading of agricultural tractors by integrating GPS, IMU, and digital compass data using an Extended Kalman filter algorithm. The findings of the present workcan be applied in automatic tractor guidance systems.

Materials and Methods: In this study, a NEO-6M GPS module, an MPU6050 IMU module, and a CMPS03 digital compass were used to develop the INS. Data acquisition from the sensors, data fusion along with result display and storage, were managed using an Arduino MEGA2560 microcontroller. The implementation of the data fusion algorithm and system programming was performed in the Arduino IDE environment. Generally, the outputs of the IMU contain noise and offset errors. First, the noise was reduced using a median filter, and the offset values were determined by recording the sensor outputs over 200 repetitions, calculating their average, and subtracting the resulting offset from the data. By integrating the gyroscope data, the system rotation angles about the three body axes, namely roll, pitch, and yaw, were obtained. Using the yaw angle derived from the gyroscope data, a rotation matrix was constructed to transform the accelerometer outputs from the body coordinate system to the global coordinate system, thereby obtaining the acceleration components in the global frame. Assuming that the experimental ground surface was flat and level, the gravitational acceleration component was removed only from the vertical acceleration data. The acceleration components in the global coordinate system were then integrated once over time to estimate velocity and integrated a second time to determine the tractor position in three directions. In addition, the tractor pitch and roll angles relative to the global coordinate system were calculated from the acceleration components in the global frame. Finally, the pitch and roll angles derived from the accelerometer data were fused with the

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

angular velocity measurements around the y- and x-axes, respectively, using an extended Kalman filter to achieve more accurate orientation estimates. Similarly, the digital compass measurements were combined with the angular velocity around the z-axis to improve the yaw angle estimation. Furthermore, the position estimates obtained from the GPS module were fused with those derived from the accelerometer data to provide a more accurate estimation of the tractor position. After preparation of the hardware and software components and completion of laboratory testing, the developed system was installed on a MF 285 tractor, and its performance in determining tractor position and heading was evaluated. The position and heading values recorded by the system were compared with the actual tractor values, and the corresponding errors were determined. Root mean square error (RMSE) and maximum error (Emax) were used to evaluate system accuracy.

Results and Discussion: Laboratory evaluation results showed that gyroscope-derived angle measurements were initially free from noise and offset; however, they gradually deviated over time due to integration drift. In contrast, pitch and roll angles derived from accelerometer data exhibited both noise and offset. Application of the Kalman filter effectively reduced noise and compensated for drift in pitch and roll estimates. Furthermore, fusion of digital compass data with gyroscope-based yaw angles using the Kalman filter successfully eliminated yaw drift. Integration of GPS and IMU data through the Kalman filter also improved positional accuracy. During road tests, the system achieved RMSE values of 6.14 m and 5.03 m in the X Y directions, respectively, with a total positional RMSE of 4.09 m. andThe maximum error (Emax) in determining position was 11.15 m in the X direction and 11.05 m in the Y direction, while the total maximum positional error reached 11.15 m.. These errors were mainly caused by interruptions in GPS signal reception at certain points along the test path, which disrupted system performance and resulted in inaccurate position estimation and Kalman filter outputs. Variance analysis of Emax values indicated that tractor forward speed had no significant effect on position determination in the X and Y directions or on total positional accuracy at the 5% probability level. Therefore, the developed system is capable of determining tractor position under different forward speed conditions.

Conclusion: The developed INS demonstrated considerable potential for application in autonomous agricultural tractor guidance systems. To enhance the system performance, the use of more accurate GPS and IMU modules is recommended. In addition, alternative noise reduction techniques and advanced versions of the Kalman filter, as well as other data fusion algorithms should be evaluated.

Keywords: ***Agricultural tractors, Inertial navigation system, Data fusion, Kalman filter, Digital compass, IMU, GPS.***

مقاله پژوهشی

تعیین جهت و موقعیت تراکتور با تلفیق داده‌های IMU و GPS و قطب‌نمای دیجیتال به کمک فیلتر کالمن

حسن مسعودی[۱و۲*]، سیده امینه شریفی[۳] و محمداسماعیل خراسانی فردوانی[۴]

۱- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- فارغ التحصیل مقطع کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۴- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲

پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

کلمات کلیدی:

تراکتورهای کشاورزی،
سامانه ناوبری اینرسی،
تلفیق داده ها،
فیلتر کالمن،
قطب نمای دیجیتال،
IMU،
GPS.

* عهده دار مکاتبات

Email: hmasoudi@scu.ac.ir

چکیده

هدایت خودکار تراکتورهای کشاورزی نیازمند تعیین دقیق جهت و موقعیت حرکت آنها است، که برای این کار می‌توان از حسگرهای مختلفی استفاده نمود. با ترکیب داده‌های GPS و IMU با فیلتر کالمن، موقعیت و جهت قرارگیری دقیق تراکتور تعیین می‌گردد. در این پژوهش، با هدف توسعه یک سامانه ناوبری اینرسی (INS) برای هدایت تراکتورهای کشاورزی، از ماژول GPS مدل NEO-6M، ماژول IMU مدل MPU6050 و ماژول قطب‌نما مدل CMPS03 استفاده شد. وظیفه اخذ داده از ماژول‌های GPS و IMU و قطب‌نما و ترکیب داده‌های آنها و نمایش و ذخیره نتایج بر عهده برد میکروکنترلر آردوینو مدل MEGA2560 بود. برنامه‌نویسی و پیاده‌سازی الگوریتم ترکیب داده‌ها و برنامه‌ریزی میکروکنترلر در محیط IDE آردوینو انجام شد. مطابق نتایج ارزیابی آزمایشگاهی، مقادیر زوایای بدست آمده از ژیروسکوپ در ابتدا بدون نویز و بدون آفست بودند، لیکن با گذشت زمان بدلیل خطاهای موجود در فرآیند انتگرال‌گیری، دچار انحراف از مقدار اولیه (دریفت) شدند. مقادیر زوایای پیچ و رول بدست آمده از داده‌های شتاب‌سنج دارای نویز و آفست بودند. استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته باعث حذف نویزها و دریفت از مقادیر زوایای پیچ و رول گردید. همچنین ترکیب مقادیر زاویه قطب‌نمای دیجیتال با مقدار زاویه یاو بدست آمده از داده‌های ژیروسکوپ با فیلتر کالمن، منجر به حذف دریفت از مقادیر زاویه یاو شد. با تلفیق داده‌های GPS و IMU به کمک فیلتر کالمن، دقت بالاتری در تعیین موقعیت تراکتور حاصل شد. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در تعیین موقعیت تراکتور در جاده توسط سامانه در راستای X برابر با ٤/٦١ متر، در راستای Y برابر با ۳/۵۰ متر و در کل ٤/۰۹ متر بدست آمد. همچنین حداکثر خطا در

تعیین موقعیت (E_{max}) در راستای X برابر با ۱۱/۱۵ متر و در راستای Y برابر با ۱۱/۰۵ متر و در کل ۱۱/۱۵ متر بوده است. با تکمیل سامانه پیشنهادی در این پژوهش می‌توان از آن برای هدایت خودکار تراکتورهای کشاورزی استفاده نمود.

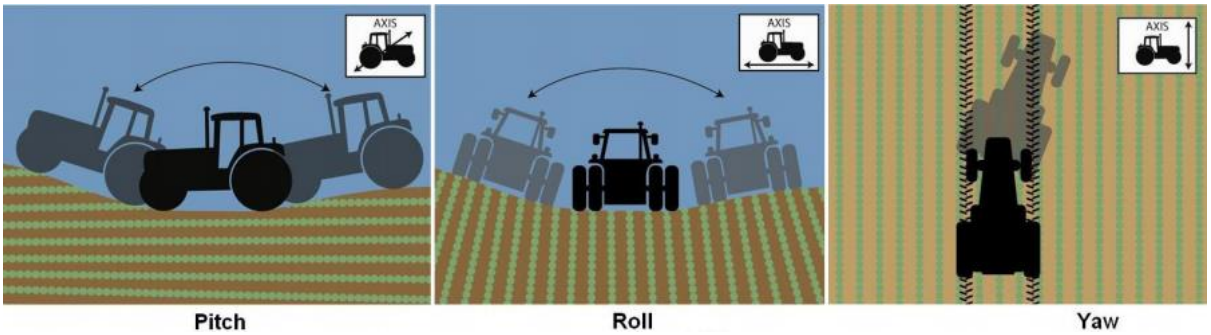
مقدمه

برای تشخیص چرخش تراکتور در سطح زمین از سه محور و زاویه عمود بر هم استفاده می‌شود که عبارتند از: زاویه رول [1]، زاویه پیچ [2] و زاویه یاو [3] و به ترتیب میزان چرخش حول محورهای طولی، عرضی و عمودی را بیان می‌کنند (شکل ۱). با توجه به ویژگی‌های خاص ژیروسکوپ‌ها، می‌توان از این حسگرها برای اندازه‌گیری سه زاویه فوق در تراکتورها استفاده نمود (۹). این زوایا با انتگرال‌گیری از خروجی حسگر ژیروسکوپ بدست می‌آیند، اما در عمل به خاطر مشکل انحراف [4] در داده‌های حاصل از ژیروسکوپ، زاویه اندازه‌گیری شده به مرور از مقدار واقعی دور می‌شود و مقدار خطا در طی زمان افزایش می‌یابد. همچنین اندازه‌گیری زوایای سه‌گانه مذکور در بسیاری از کاربردها با استفاده از سامانه‌های ناوبری اینرسی [5] (INS) انجام می‌شود. که دارای حسگرهای شتاب‌سنج برای اندازه‌گیری شتاب خطی در سه بعد و حسگرهای ژیروسکوپ برای اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای در سه جهت می‌باشند. سامانه‌های ناوبری اینرسی که از مهم‌ترین سامانه‌ها برای تعیین موقعیت، سرعت و وضعیت وسایل نقلیه می‌باشند، دارای خطای حسگرهای اینرسی و خطای محاسباتی می‌باشند (۱۳).

تشخیص دقیق موقعیت وسایل نقلیه همچون تراکتور نقش مهمی در بسیاری از سامانه‌های هدایت خودکار دارد (۴). اصولاً روش‌های نوین هدایت وسایل نقلیه نیازمند تعیین دقیق موقعیت، جهت حرکت و سرعت پیشروی آنها می‌باشد، که برای این کار می‌توان از حسگرهای مختلفی استفاده نمود (۹). ناوبری اینرسی یک تکنیک ناوبری مستقل است که در آن از داده‌های ارائه شده توسط شتاب‌سنج‌ها و ژیروسکوپ‌ها برای ردیابی موقعیت و جهت یک جسم نسبت به نقطه شروع، جهت و سرعت معین استفاده می‌شود. پیشرفت‌های اخیر در ساخت سامانه‌های میکرو الکترومکانیکی [6] (MEMS) امکان ساخت سامانه‌های ناوبری اینرسی کوچک و سبک را فراهم کرده است.

تلفیق سامانه‌های ناوبری اینرسی با سامانه‌های کمک ناوبری دیگر مانند سامانه‌های مکان‌یاب جهانی [7] (GPS) باعث بهبود قابل ملاحظه در عملکرد این سامانه‌ها می‌شود (۱۰، ۵). برای تلفیق داده‌های IMU و GPS لازم است از مباحث پیچیده‌ی ریاضی استفاده کرد. که یکی از این روش‌ها استفاده از الگوریتمی به نام فیلتر کالمن [8] (KF) است که با استفاده از پارامترهای بهینه موقعیت دقیق، سرعت پیشروی و وضعیت وسیله با کمترین میزان خطا، برآورد می‌شود. توانایی به دست آوردن تخمین در هرگام به صورت بازگشتی، باعث بکارگیری این فیلتر در بسیاری از رشته‌های علوم و مهندسی در کاربردهایی نظیر ردیابی، حذف و کاهش نویز و ... شده است. فیلتر کالمن ساده در سامانه های خطی قابل اعمال است، اما در سامانه‌های غیرخطی نمی توان از آن به طور مستقیم استفاده نمود. در اینگونه موارد از فیلتر کالمن توسعه‌یافته [9] (EKF) بهره‌گیری می‌شود. در این روش، معمولاً به کمک بسط تیلور، مدل‌های غیرخطی با مدل‌های خطی تقریب زده می‌شود. در این صورت فیلتر کالمن، بر روی سامانه خطی به دست آمده، قابل اعمال خواهد بود (۵).

1- Roll
2- Pitch
3- Yaw
4- Drift
5- Inertial navigation systems
6- Micro-Electro-Mechanical Systems
7- Global Positioning Systems
8- Kalman filter
9- Extended Kalman filter



شکل (۱) زوایای سه‌گانه نشان‌دهنده جهت چرخش تراکتور در سطح زمین (۹)

Figure (1) Triple angles showing a tractor rotation on the ground (9)

برای تلفیق داده‌های دو سامانه IMU و GPS به کمک فیلتر کالمن، لازم است که ابتدا یک مدل دینامیکی از سامانه ناوبری اینرسی یا IMU معرفی شود. هر دو داده GPS و IMU توسط الگوریتم فیلتر کالمن توسعه‌یافته که برای تخمین خطاهای سامانه IMU استفاده می‌شود، تلفیق می‌شوند. خروجی فیلتر برای تصحیح خطاهای سامانه به IMU بازگردانده می‌شود و سپس، خروجی‌های اصلاح شده IMU به عنوان راه حل نهایی ناوبری استفاده می‌شوند. یک گیرنده GPS دیفرانسیلی عملکرد بالا به همراه سینماتیک زمان واقعی[1]، موقعیت‌یابی کامل را برای خودروهای بدون راننده فراهم می‌کند. با این حال، نه تنها به اثر چند مسیره [2] حساس است بلکه قادر به تصحیح خطا در طیف گسترده‌ای از مناطق رانندگی نیست (۱۸).

در پژوهش گلی و همکاران[3] (۱۳۹۳) به منظور ارزیابی میزان دقت روش‌های مختلف مکان‌یابی، چهار روش توسط حرکت یک ربات کنترل از راه دور بر روی یک مسیر معین مورد مقایسه قرار گرفت. روش‌های مقایسه شده عبارت بودند از: بکارگیری یک GPS، تلفیق داده‌های سه واحد GPS، استفاده از یک IMU به تنهایی و تلفیق داده‌های GPS/IMU. مقایسه این چهار روش نشان داد که استفاده از تلفیق داده‌های GPS و IMU به کمک فیلتر کالمن، نسبت به روش‌های دیگر دقت بالاتری در مکان‌یابی به دست می‌دهد (۷). در پژوهش قاسم‌زاده (۱۳۹۸) برای تصحیح عملکرد سامانه ناوبری اینرسی و کاهش خطاهای حسگرهای اینرسی یک شناور دریایی، از تلفیق این سامانه با سامانه GPS و به کمک فیلتر کالمن توسعه‌یافته بهره‌گیری شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها، نشان داد که تلفیق داده‌های این دو سامانه، باعث بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد سامانه ناوبری اینرسی و تصحیح خطاهای آن گردید (۶). در پژوهش اصغری و همکاران[4] (۱۳۹۸) برای تخمین سرعت زاویه‌ای غلت پرتابه‌های با سرعت بالا با استفاده از تلفیق خروجی شتاب‌سنج‌های MEMS از دو تخمین‌گر فیلتر کالمن تعمیم‌یافته و فیلتر کالمن تعمیم‌یافته تطبیقی استفاده شد. مقایسه نتایج بدست آمده از این دو تخمین‌گر، بیانگر عملکرد بهتر تخمین‌گر تطبیقی بود (۳). در پژوهش نژاد شاهبداغی و موسوی میرکلایی (۱۳۹۸) با استفاده از ترکیب ویژگی‌های شتاب‌سنج و ژیروسکوپ، مقدار موثر خطای زاویه در فیلتر کالمن تطبیقی نسبت به ساختار کالمن بدون تطبیق، حدود ۳۴ درصد در حالت استاتیکی و حدود ۳۴/۳ درصد و ۲۹/۸ درصد به ترتیب در حالت‌های دینامیکی چرخش حول محور Y و X بهبود یافت (۱۳). در پژوهش مزیدی و همکاران[5] (۱۴۰۰) فیلتر کالمن در کاهش خطای تصادفی GPS نسبت به دو فیلتر پایین گذر و میانگین متحرک بهترین عملکرد را داشت. همچنین روش

1- Real time kinematics
2- Multipath
3- Goli *et al.*
4- Asghari *t al.*
5- Mazidi *t al.*

موقعیت‌یابی تفاضلی ارزان قیمت پیشنهاد شده منجر به کاهش ۸۹ درصدی در خطای بایاس GPS گردید (۱۱).

در پژوهش دیگری نتایج تخمین فیلتر کالمن برای اندازه‌گیری سیگنال‌های موقعیت و حالت ثبت و با داده‌های خام واحد اندازه‌گیری اینرسی و گیرنده GPS مقایسه شد. فرکانس واقعی‌سازی موقعیت از یک هرتز که مشخصه گیرنده‌های GPS است، به مقادیر نزدیک به ۵۰ هرتز افزایش یافت. علاوه بر این نشان داده شده است که چگونه فیلتر کالمن با کاهش دقت GPS و خطای اندازه‌گیری مغناطیس‌سنج سروکار دارد (۱۶). محققان از یک سامانه ناوبری مستقل مبتنی بر RTK-GPS و IMU برای ارزیابی عملکرد یک ربات متحرک استفاده نمودند. آزمایشات میدانی نشان داد که حداکثر خطا در کنترل سرعت برای آزمون سرعت و حرکت خودکار به ترتیب برابر با ۰/۲۹ و ۰/۲۲ متر بر ثانیه بود. انحراف جانبی از مسیر مستقیم کمتر از ۱۰ سانتی متر بود، لذا سامانه کنترل خودکار فرمان از عملکرد خوبی برخوردار بود (۲۰). در پژوهشی برای از بین بردن مؤثر خطاهای تصادفی IMU های مبتنی بر MEMS دو راه حل ارائه شد: اول- بهبود حذف نویز با استفاده از مدل‌های خطای تصادفی پیشرفته بر اساس فرآیندهای خودکاهنده ترکیبی[1] (ARP) و فرآیند گاوس- مارکوف مرتبه اول[2] (GMP۱)، و دوم- مدلسازی یکپارچگی GPS/INS کم هزینه با استفاده از یک سامانه منطق فازی هیبریدی[3] (FIS) و فیلتر کالمن توسعه‌یافته مرتبه دوم[4] (SOEKF). مطابق نتایج روش‌های ارائه شده بهتر از تکنیک‌های سنتی در موقعیت‌های مختلف تصادفی و دینامیکی عمل نمودند (۱۲). در پژوهشی یک روش یادگیری ماشین برای تنظیم پارامترهای فیلتر کالمن توسعه‌یافته به منظور تصحیح خطاهای GPS در موقعیت‌یابی وسیله نقلیه ارائه شد. همچنین یک شبکه عصبی مستقل از مدل برای پیش‌بینی موقعیت فعلی وسیله نقلیه طبق مسیرهای قبلی GPS آموزش داده شد. سامانه پیشنهادی برای تشخیص و کاهش خطاهای GPS و تنظیم پارامتر EKF مؤثر بود (۴). در پژوهشی به منظور بهبود دقت اطلاعات ناوبری، یک فناوری ناوبری مبتنی بر فیلتر کالمن تطبیقی با ضریب میرایی برای مهار نویز ارائه شد. این الگوریتم به طور مداوم واریانس نویز اندازه‌گیری و واریانس نویز سامانه را با جمع‌آوری مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده به روز نموده و توانست نویز سفید را فرونشاند. داده‌های GPS و IMU آزمایشات جاده‌ای جمع‌آوری شده و توسط dSPACE و سیمولینک پردازش شدند. براساس نتایج، دقت الگوریتم پیشنهادی ۲۰ درصد بیشتر از فیلتر کالمن تطبیقی سنتی بود، همچنین دقت ناوبری یکپارچه به دلیل کاهش تأثیر نویز محیط بهبود یافت (۸). در پژوهشی برای توسعه سامانه ناوبری که به طور خودکار یک نشاءکار برنج را در مسیرهای از پیش تعیین شده در مزرعه هدایت کند، یک الگوریتم تلفیق حسگرها برای ترکیب داده‌های سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی[5] (RTK-GNSS) و واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) به کار گرفته شد، که جهت حرکت مطلق را در سامانه مختصات UTM محاسبه نمود. نتایج آزمایشات نشان داد که خطاهای جانبی و جهت‌گیری از مسیرهای مستقیم به ترتیب کمتر از ۸ سانتی متر و ۳ درجه بودند و گردش‌های انتهای مسیر مطابق با الگوی مورد نیاز به خوبی اجرا شدند (۲۱).

با توجه به توسعه استفاده از سامانه‌های هدایت خودکار تراکتورها و ماشین‌های کشاورزی در دنیا، برای عقب نماندن از قافله این نوع فناوری و نیز بهره‌مندی کشور از مزایای فراوان سامانه‌های هدایت خودکار ماشین‌های کشاورزی نیازمند توسعه و بومی‌سازی این نوع سامانه‌ها در داخل کشور هستیم. بنابراین این پژوهش با

1- Autoregressive Processes
2- First-order Gauss-Markov Process
3- Fuzzy Inference System
4- Second-Order Extended Kalman Filter
5- Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System

هدف توسعه یک سامانه ناوبری اینرسی بومی برای تعیین جهت و موقعیت تراکتورهای کشاورزی با تلفیق داده های GPS و IMU و قطب‌نمای دیجیتال به کمک الگوریتم فیلتر کالمن توسعه‌یافته اجرا شد تا بتوان از خروجی مربوطه برای هدایت خودکار تراکتورها استفاده نمود.

مواد و روش ها

اجزای واحد اندازه‌گیری اینرسی:

مطابق شکل ۲-الف واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) در سامانه‌های ناوبری معمولاً شامل سه ژیروسکوپ متعامد و سه شتاب‌سنج متعامد هستند که به ترتیب سرعت زاویه‌ای و شتاب خطی را اندازه‌گیری می‌کنند. با پردازش سیگنال‌های این حسگرها می‌توان موقعیت و جهت قرارگیری سکویی که روی آن نصب شده‌اند را ردیابی کرد. جهت‌گیری IMU را می‌توان با چرخش‌های رول، پیچ و یاو از موقعیت اولیه به ترتیب حول محورهای x ، y و z مشخص کرد (۱۹).

تقریباً همه IMU ها در یکی از دو دسته‌ی با سکوی پایدار[1] و بدون سکوی پایدار یا استراپ داون[2] قرار می‌گیرند. تفاوت بین این دو دسته در دستگاه مرجعی است که ژیروسکوپ‌ها و شتاب‌سنج ها در آن کار می‌کنند. مطابق شکل ۲-ب دستگاه مرجع متصل به سامانه ناوبری اینرسی، دستگاه مختصات بدنه[3] و دستگاه مرجعی که وسیله نقلیه در آن حرکت می‌کند، دستگاه مختصات جهانی[4] نامیده می‌شود. در سامانه‌های ناوبری اینرسی بدون سکوی پایدار، حسگرهای اینرسی به‌طور صلب بر روی شاسی نصب می‌شوند و بنابراین مقادیر خروجی در دستگاه مختصات بدنه به جای دستگاه مختصات جهانی اندازه‌گیری می‌شوند. برای تعیین جهت وسیله نقلیه، سیگنال‌های ژیروسکوپ انتگرال‌گیری می‌شوند. برای ردیابی موقعیت وسیله نقلیه، سه سیگنال شتاب‌سنج با استفاده از جهت‌گیری اعلام شده از خروجی ژیروسکوپ، به دستگاه مختصات جهانی منتقل می‌شوند. سپس سیگنال‌های شتاب جهانی مانند الگوریتم سامانه با سکوی پایدار انتگرال‌گیری می‌شوند (۱۹).

اجزای سخت‌افزاری سامانه:

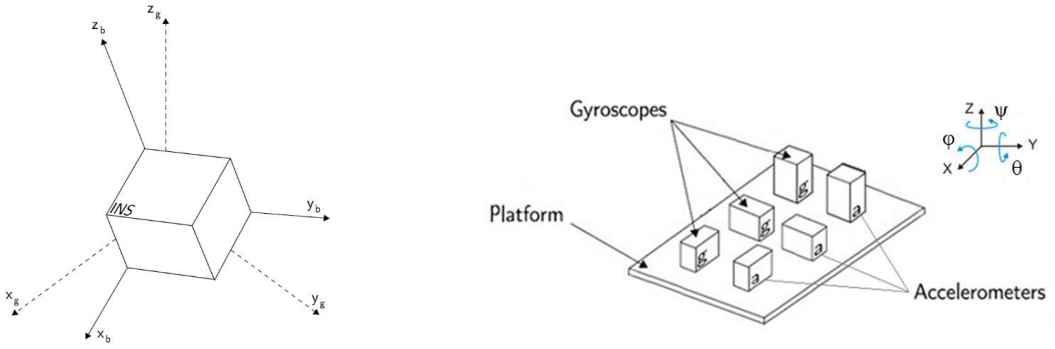
شکل ۳-الف تصویر سامانه اینرسی ساخته شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. این سامانه از نوع بدون سکوی پایدار بوده و اجزای سخت‌افزاری تشکیل‌دهنده آن بر روی یک شاسی چوبی نصب شده و مطابق مدار الکترونیکی شکل ۳-ب به برد پردازنده مرکزی متصل شدند. برنامه رایانه‌ای موردنیاز برای این سامانه در محیط برنامه‌نویسی آردوینو[5] و با زبان C نوشته و در حافظه برد میکروکنترلر ریخته شد.

اجزای اصلی بخش سخت‌افزاری سامانه در شکل ۴ و مشخصات آنها در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. پردازنده سامانه یک برد آردوینو از نوع MEGA2560 است که یک برد بر پایه میکروکنترلر ATmega2560 می‌باشد (شکل ۴-الف). برد MEGA2560 دارای کلیه امکانات مورد نیاز جهت بکارگیری میکروکنترلر موجود برروی برد می‌باشد. این برد دارای سرعت پردازش تا ۱۶ مگاهرتز است که برای حل معادلات پیچیده مناسب است (۲). ماژول IMU مورد استفاده از نوع MPU6050 بوده و تمامی حسگرهای مورد نیاز برای ۱۰ درجه آزادی روی آن قرار گرفته است (شکل ۴-ب). ارتباط این ماژول با میکروکنترلرها از طریق رابط I2C برقرار می‌شود. اجزای تشکیل‌دهنده ماژول MPU6050 شامل حسگر ژیروسکوپ سه محوره، حسگر شتاب‌سنج سه محوره و حسگر بارومتر با دقت بالا ۱۶ بیتی می‌باشد. همچنین دارای بافر FIFO با ظرفیت ۱۰۲۴ بایت و حسگر دما با رنج اندازه‌گیری ۴۰- تا ۸۵+ درجه سانتیگراد می‌باشد. ماژول NEO-6M (شکل ۴-ج) یکی از حرفه‌ای‌ترین

1- Stable platform
2- Strapdown
3- Body frame
4- Global frame

5- Arduino IDE

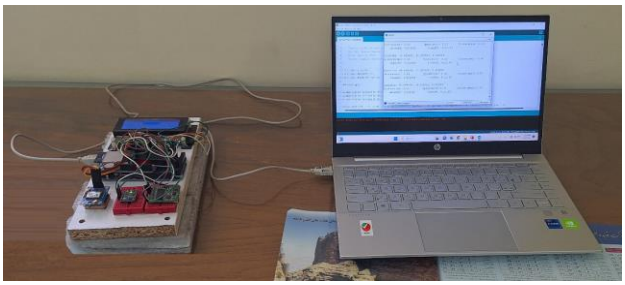
ماژول‌های GPS است که ساخت شرکت U-blox آلمان است و از آنتن اکتیو نیز پشتیبانی می‌کند. پروتکل ارتباطی این ماژول از نوع UART است. این ماژول دارای حافظه داخلی EEPROM به منظور ذخیره تنظیمات است و از سرویس‌های WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN پشتیبانی می‌کند. ماژول GPS NEO-6M می‌تواند تا ۲۲ ماهواره را در ۵۰ کانال ردیابی کند و به بالاترین سطح حساسیت در صنعت یعنی ۱۶۱- دسی بل دست یابد. این تراشه قادر به ردیابی ۵ موقعیت در هر ثانیه با دقت ۲/۵ متر در حالت افقی می‌باشد. ماژول قطب‌نما CMPS03 (شکل ۴-د) برای مسیریابی وسایل نقلیه و ربات‌ها مناسب است. با استفاده از این ماژول می‌توان جهت حرکت تراکتور را تشخیص داد. پهنای پالس PWM خروجی ماژول متناسب با زاویه قرارگیری ماژول نسبت به شمال مغناطیسی است که از یک میلی‌ثانیه برای زاویه ۰ درجه تا ۳۶/۹۹ میلی‌ثانیه برای ۳۵۹/۹ درجه تغییر می‌کند (۱).



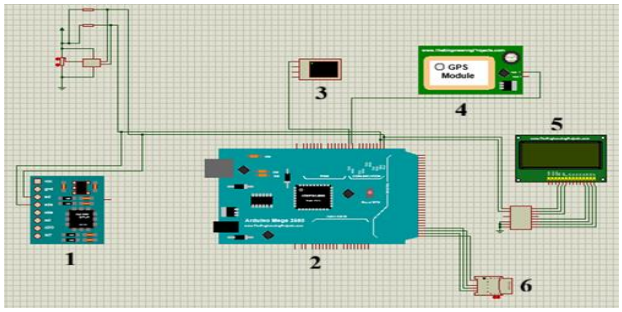
(الف) (ب)

شکل (۲) اجزاء تشکیل‌دهنده یک واحد اندازه‌گیری اینرسی در سامانه‌های ناوبری (۱۹)

Figure (2) Components of an inertial measurement unit in navigation systems (19)



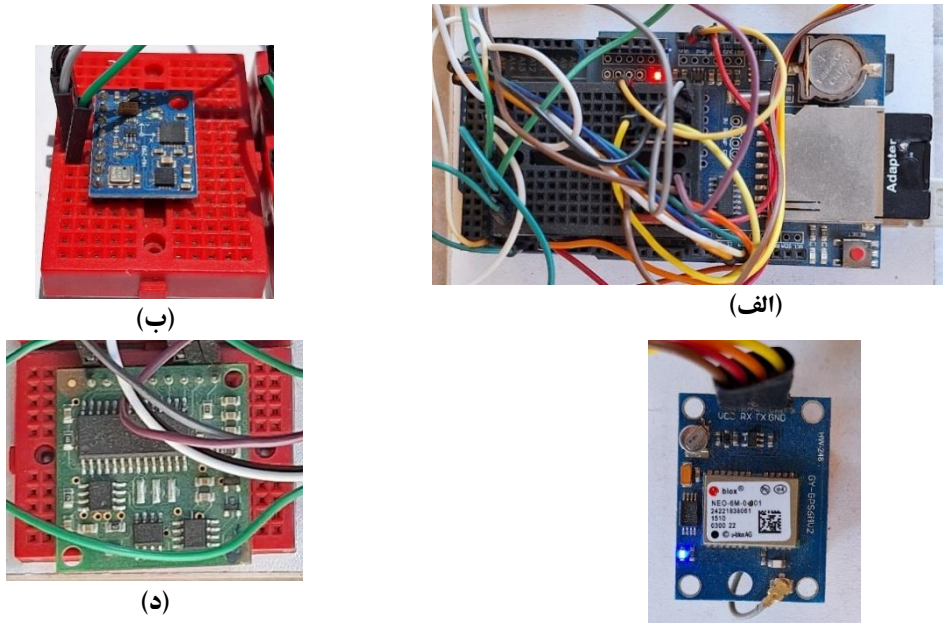
(الف)



(ب)

شکل (۳) الف- سامانه ناوبری اینرسی ساخته شده ب- مدار الکترونیکی سامانه طراحی شده در محیط نرم‌افزار پروتئوس (۱- ماژول IMU، ۲- میکروکنترلر آردوینو Mega، ۳- اسیلوسکوپ ٤- ماژول GPS، ٥- نمایشگر LCD، ٦- کارت حافظه SD)

Figure (3) a- The built inertial navigation system, b- Electronic circuit of the system designed in the Proteus software (1- IMU Module, 2- Arduino Mega microcontroller, 3- Oscilloscope, 4- GPS Module, 5- LCD, 6-SD card memory)



(ب) (الف)

(د) (ج)

شکل (٤) اجزاء سخت‌افزاری سامانه ناوبری اینرسی شامل الف- برد میکروکنترلر آردوینو Mega ب- ماژول IMU ج- ماژول GPS د- ماژول قطب‌نما

Figure (4) Hardware components of the inertial navigation system include: a- Arduino Mega microcontroller board, b- IMU module, c- GPS module, d- Compass module

جدول (۱) مشخصات اجزاء سخت‌افزاری سامانه ناوبری اینرسی

Table (1) Specifications of the hardware components of the inertial navigation system

قطعه Part	مدل Model	سازنده Manufacturer	ولتاژ کاری Voltage	دامنه کاری Range	رزولیشن Resolution	پروتکل ارتباطی Connection
برد میکروکنترلر Microcontroller	MEGA2560	Arduino	7-9V	–	–	Digital, Analogue, UART
ماژول IMU IMU Module	MPU6050	InvenSense/TDK	3.3-5V	Acceleration: ± 2g, Angular velocity: ±250 °/s	Acceleration: 6.1e-5g, Angular velocity: 7.6e-3 °/s	Serial, I2C
ماژول GPS GPS Module	NEO-6M	U-blox	2.7-3.6V	1 kHz	-161 dBm	UART, USB, SPI
ماژول قطب‌نما Compass Module	CMPS03	China	5V	0-359.9 degree	0.1 degree	I2C / PWM

الگوریتم تعیین جهت و موقعیت تراکتور:

سامانه اینرسی ساخته شده مطابق شکل ۵ بصورتی بر روی تراکتور نصب شد که محور X_t سامانه در راستای طولی تراکتور به سمت جلو و محور Y_t سامانه در راستای عرضی تراکتور به سمت چپ قرار گرفته و تشکیل دستگاه مختصات بدنه را دادند. محورهای X، Y و Z دستگاه مختصات جهانی (به نام دستگاه NWU) نیز به ترتیب به سمت شمال، غرب و بالا در نظر گرفته شدند.

مراحل تعیین جهت و موقعیت تراکتور از داده‌های ماژول IMU در شکل ۶ آمده است. خروجی‌های IMU شامل سه سیگنال سرعت زاویه‌ای از حسگر ژیروسکوپ (شامل $\alpha x, \alpha y,$

αz) و سه سیگنال شتاب خطی از حسگر شتاب‌سنج (شامل Gx, Gy, Gz) می‌باشد. در حالت ایستا این داده‌ها دارای نویز و آفست بودند. ابتدا نویزها با استفاده از فیلتر میانه حذف شدند و مقادیر آفست نیز با ثبت مقدار خروجی‌ها به تعداد ۲۰۰ تکرار و میانگین‌گیری از آنها تعیین شده و از داده‌ها حذف شدند. سپس با انتگرال‌گیری از داده‌های ژیروسکوپ، مقدار زاویای دوران سامانه در راستای سه محور بدنه xt، yt و zt که به ترتیب زوایای رول، پیچ و یاو می‌باشند، بدست آمد. مقدار زاویه یاو بیانگر جهت قرارگیری[1] تراکتور بر روی سطح زمین نسبت به محور X دستگاه مختصات جهانی است (شکل ۵). با داشتن مقدار زاویه یاو (ψ) از داده‌های ژیروسکوپ، ماتریس دوران بصورت رابطه ۱ برای انتقال خروجی‌های شتاب‌سنج از دستگاه مختصات بدنه به دستگاه مختصات جهانی تشکیل شد و مقادیر مولفه‌های شتاب در دستگاه مختصات جهانی (شامل Gpx, Gpy, Gpz) بدست آمدند:

$$T^{LB} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \qquad (۱)$$

سپس با فرض صاف و مسطح بودن زمین مورد آزمایش، مقدار شتاب ثقل فقط از داده‌های مولفه عمودی شتاب حذف گردید. با داشتن مقادیر مولفه های شتاب در دستگاه مختصات جهانی ، با یک بار انتگرال‌گیری از آنها در طی زمان مقادیر سرعت و با انتگرال‌گیری دوم مقادیر موقعیت تراکتور در سه جهت بدست آمد همچنین با داشتن مقادیر مولفه‌های شتاب در دستگاه مختصات جهانی، مقادیر زوایای پیچ و رول تراکتور نسبت به دستگاه مختصات جهانی از روابط ۲ و ۳ محاسبه گردید (۱۵):

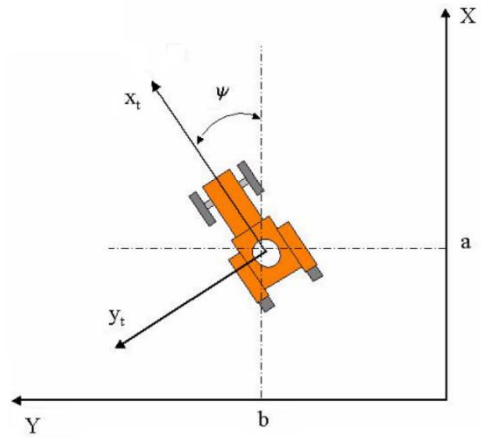
$$\theta = -tan^{-1}\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right) \times 180/\pi \qquad (۲)$$

$$\varphi = tan^{-1}\left(\frac{a_y}{a_z}\right) \times 180/\pi \qquad (۳)$$

که در این روابط θ و φ زاویای پیچ و رول برحسب درجه و az, ay, ax مولفه‌های شتاب در راستای z, y, x برحسب g می‌باشند. در نهایت با ترکیب مقادیر زوایای پیچ و رول حاصل از داده‌های شتاب‌سنج به ترتیب با مقادیر سرعت زاویه‌ای حول محورهای y و x به کمک فیلتر کالمن توسعه‌یافته مقدار زاویه پیچ و رول دقیق‌تر بدست آمد. با ترکیب مقدار خروجی قطب نمای دیجیتال با مقدار سرعت زاویه ای حول محور z مقدار دقیق‌تر زاویه یاو تعیین شد. همچنین با ترکیب مقادیر موقعیت حاصل از ماژول GPS با مقادیر موقعیت حاصل از شتاب‌سنج، موقعیت دقیق تر تراکتور بدست آمد.

آزمون و ارزیابی سامانه:

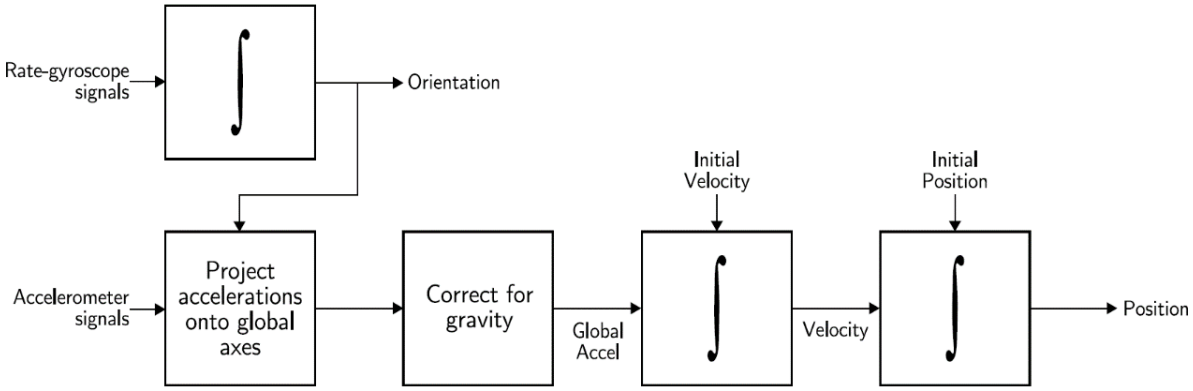
سامانه‌ی ساخته شده پس از آماده‌سازی اجزاء سخت‌افزاری و نرم‌افزاری آن و راه‌اندازی در محیط آزمایشگاه، بر روی یک تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ نصب شده و عملکرد آن در تعیین موقعیت و جهت تراکتور ارزیابی شد (شکل ۷-الف). مسیری صاف و هموار بر روی جاده آسفالت با مختصات ذکر شده در شکل ۷-ب برای حرکت تراکتور انتخاب شد (A نقطه شروع و D نقطه پایان). این مسیر بطول ۳۶۵ متر دارای خطوط مستقیم، شکسته و در برخی جاها دارای درختان بلندی بود که بالای مسیر را می‌پوشاندند. سپس تراکتور در سه سرعت پیشروی مختلف (۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ متر بر ثانیه) و در چهار تکرار در وسط این مسیر توسط راننده هدایت شد.



شکل (۵) دستگاه مختصات بدنه و جهانی اتخاذ شده برای سامانه

Figure (5) Body and global coordinate system adopted for the system

[1] Orientation



شکل (٦) مراحل تعیین جهت و موقعیت تراکتور از داده‌های IMU در سامانه ناوبری بدون سکوی پایدار

Figure (6) Steps for determining the direction and position of the tractor from IMU data in a navigation system without a stable platform



(الف)



(ب)

محل: دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

طول مسیر: ۳۶۵ متر

طول جغرافیایی: ۴۸/۶۵۹۴۲۷۶۱ درجه

عرض جغرافیایی: ۳۱/۳۰۳۶۴۸۷۰ درجه

ارتفاع از سطح دریا: ۲۰ متر

Location: Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
Path length: 365 m
Longitude: 48.65942761°
Latitude: 31.30364870°
Altitude: 20 m

شکل (۷) ارزیابی میدانی سامانه بر روی یک تراکتور

Figure (7) Field evaluation of the system on a tractor

سامانه در حین آزمون و بصورت لحظه ای موقعیت و جهت تراکتور را روی LCD نمایش داده و آنها را در کارت حافظه ذخیره می‌نمود. پس از پایان آزمون‌ها، مقادیر موقعیت و جهت ثبت‌شده برای تراکتور توسط سامانه با مقادیر موقعیت و جهت مطلوب تراکتور مقایسه شد و میزان خطا در تعیین موقعیت و جهت استخراج گردید. مقادیر واقعی جهت و موقعیت تراکتور از روی داده‌های ذخیره شده در کارت حافظه SD استخراج شدند و مقادیر مطلوب از روی شکل مسیر بدست آمدند، و خط وسط جاده بعنوان مسیر مطلوب در نظر گرفته شد. شاخص‌های تعیین دقت سامانه، جذر میانگین مربعات خطا[1] (RMSE) و خطای بیشینه[2] (Emax) بودند و به ترتیب از روابط ۴ و ۵ محاسبه شدند (۹ و ۴) :

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(d_i - a_i)^2}{n}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (۴)$$

$$E_{max} = \max|d_i - a_i|_{i=1}^{n} \quad (۵)$$

که در این روابط، d_i مقادیر مطلوب، a_i مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد نمونه است. نتایج بدست آمده در قالب طرح کاملاً تصادفی تجزیه و تحلیل شدند، تا تاثیر عامل سرعت پیشروی بر عملکرد سامانه مشخص شود. متغیر وابسته خطای بیشینه موقعیت (E_{max}) و متغیر مستقل سرعت پیشروی تراکتور بود.

نتایج و بحث

در آزمایشات عملی مقادیر خروجی حسگرها در آزمایشگاه و در حالت‌های مختلف اندازه‌گیری و ثبت شد. سپس با بررسی داده‌های بدست آمده از هر حسگر بر اساس تغییرات داده‌های دریافتی، عملیات مختلف برای حصول نتایج دقیق‌تر بر روی آنها انجام شد.

داده‌های خروجی ژیروسکوپ

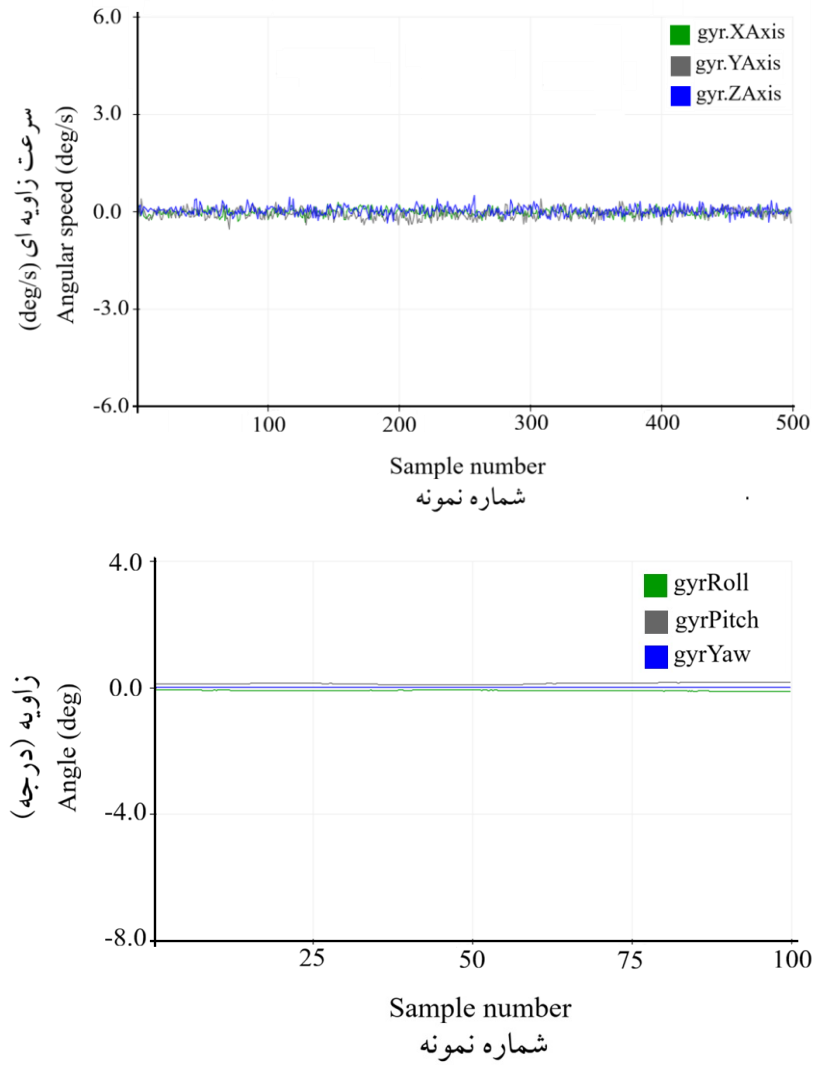
مقادیر داده های خام بدست آمده از خروجی حسگر ژیروسکوپ در شکل ۸-الف دیده می‌شود. هر سه مقدار خروجی این حسگر شامل سرعت چرخش حول محورهای x و y و z دارای نویز می‌باشند، ولی آفستی در آنها دیده نمی‌شود. با انتگرال‌گیری از داده‌های خام سرعت‌های زوایه‌ای بدست آمده از ژیروسکوپ در طی زمان می‌توان مقادیر زوایای چرخش سامانه حول هر یک از محورهای مختصات را بدست آورد. در شکل ۸-ب مشاهده می‌شود که مقادیر زوایای سه گانه اویلر در ابتدا بدون نویز و بدون آفست هستند، لیکن با گذشت زمان بدلیل خطاهای موجود در فرآیند انتگرال‌گیری (مانند خطاهای بایاس، ضریب مقیاس و نصب)، دچار انحراف از مقدار اولیه (دریفت) می‌شوند (۱۷). مقدار این انحراف ثابت نبوده و بطور خطی با گذشت زمان برای هر سه زاویه افزایش می‌یابد. هر چه بازه زمانی انتگرال‌گیری از مقادیر داده‌های ژیروسکوپ کوتاه‌تر باشد، مقدار دریفت کمتر خواهد بود. فرکانس کاری میکروکنترلر و حجم کدهای برنامه، محدودکننده این خواسته هستند. راهکارهای مختلفی برای حذف دریفت و بهبود عملکرد سامانه ارائه شده است. یکی از راهکارهای حذف دریفت، ترکیب داده‌های حسگرهای ژیروسکوپ و شتاب‌سنج با استفاده از فیلتر کالمن است.

داده‌های خروجی شتاب‌سنج:

مطابق شکل ۹-الف داده‌های خام خروجی از شتاب‌سنج‌ها دارای نویز و آفست می‌باشد که برای داشتن مقادیر دقیق نهایی باید مقدار آفست از داده‌ها حذف و نویزها تا حد امکان کاهش یابند. با داشتن مقادیر شتاب سامانه در سه جهت x، y و z تنها مقدار دو زاویه پیچ و رول برای سامانه قابل محاسبه است. مقادیر زوایای پیچ و رول با استفاده از روابط ۲ و ۳ محاسبه شدند. در شکل ۹-ب مشاهده می‌شود که مقدار هر دو زاویه دارای نویز و آفست است. بنابراین حذف نویزها و آفست‌ها ضروری است. آفست به راحتی قابل حذف است، ولی نویزها جزء ذات خروجی حسگرهای شتاب‌سنج بوده و به راحتی قابل حذف نمی‌باشند.

[1] Root Mean Square Error
[2] Maximum Error

برای کاهش نویزهای مقادیر زوایای پیچ و رول بدست آمده از داده‌های شتاب‌سنج و همچنین حذف دریفت از مقادیر زوایای پیچ و رول بدست آمده از داده‌های ژیروسکوپ، این دو گروه داده با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته با یکدیگر ترکیب شدند. مقدار آفست مقادیر نیز از داده اصلی کسر شد. همانطور که در شکل ۹-ج دیده می‌شود، خوشبختانه استفاده از فیلتر کالمن باعث حذف نویزها و دریفت از مقادیر زوایای پیچ و رول گردید.

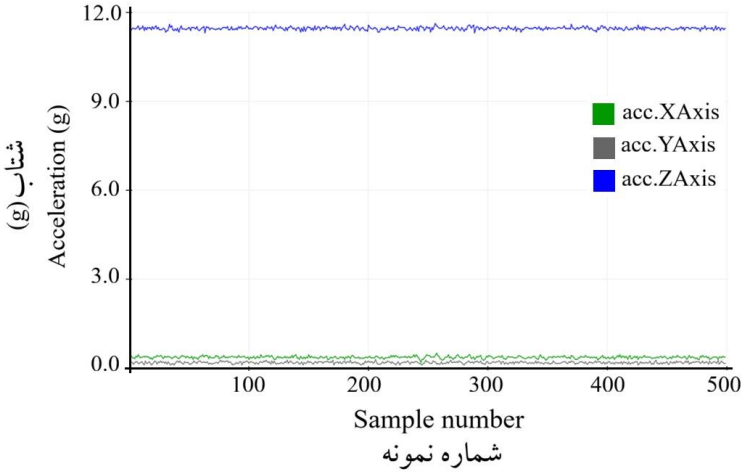


(الف)

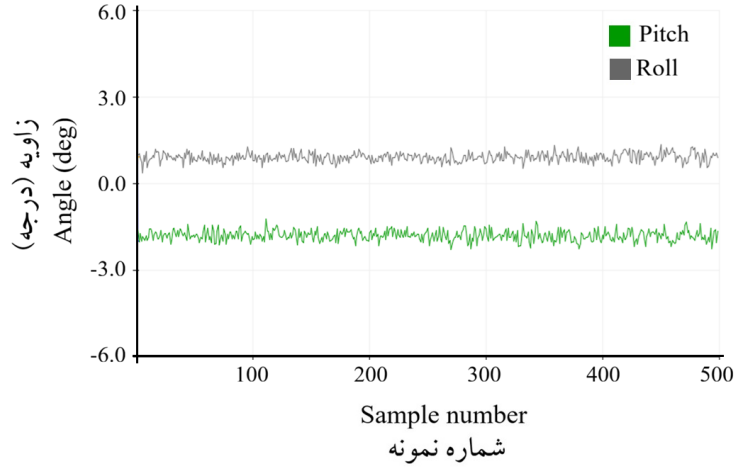
(ب)

شکل (۸) الف- داده‌های خام خروجی از حسگر ژیروسکوپ و ب- زوایای بدست آمده از مقادیر خروجی ژیروسکوپ

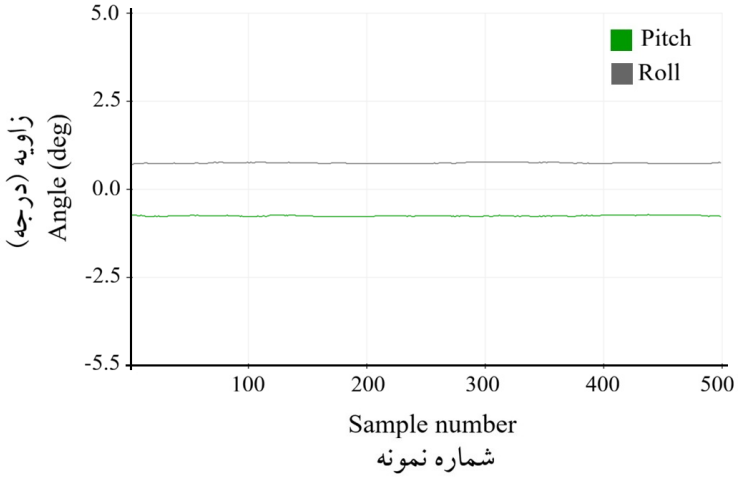
Figure (8) a- Raw data output from the gyroscope sensor, b- Angles obtained from the gyroscope output data



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۹) الف- داده‌های خام خروجی از شتاب‌سنج (برحسب g) و ب- مقادیر زوایای پیچ و رول محاسبه شده از داده‌های شتاب‌سنج (برحسب درجه) و ج- مقادیر زوایای پیچ و رول حاصل از ترکیب داده‌های شتاب‌سنج و ژیروسکوپ با فیلتر کالمن (برحسب درجه)

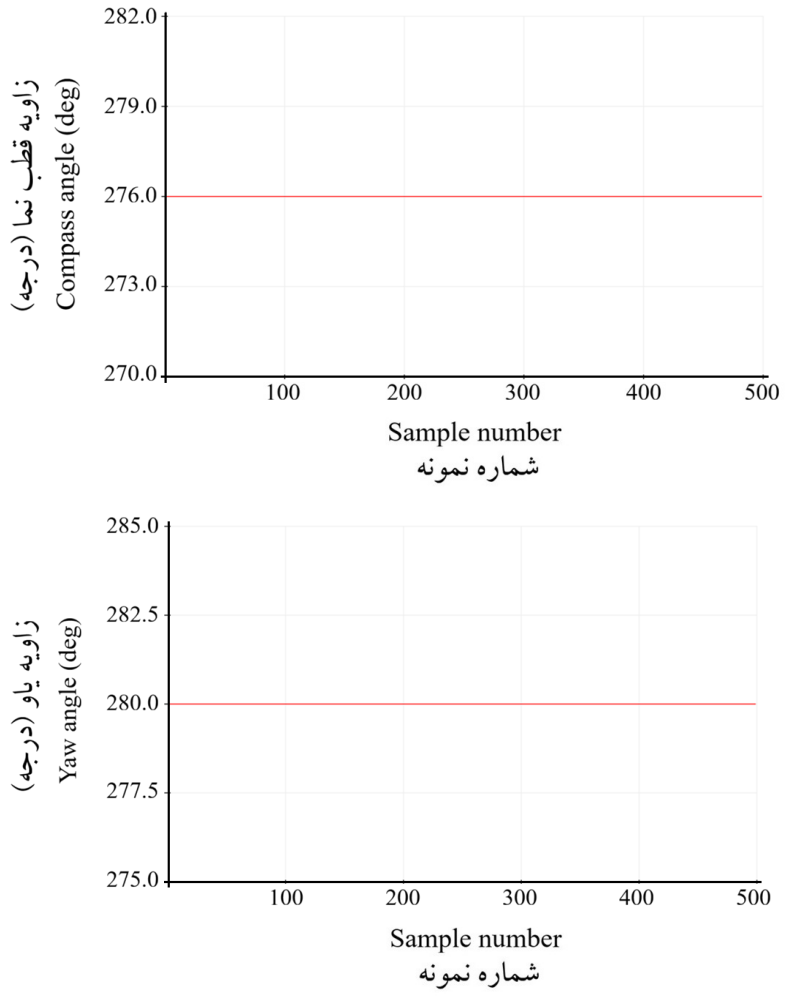
Figure (9) a- Raw data output from the accelerometer (g), b- Roll and pitch angles calculated from the accelerometer data (degree), c- Roll and pitch angles obtained by fusing the accelerometer and gyroscope data by the Kalman filter (degree)

داده‌های خروجی قطب‌نمای دیجیتال:

قطب‌نمای دیجیتال دارای یک خروجی است که بیانگر راستای قرارگیری ماژول قطب نما نسبت به جهت شمال مغناطیسی است. مطابق شکل ۱۰-الف داده‌های خروجی این حسگر بدون نویز و بدون دریفت است، لیکن در اثر امواج الکترومغناطیسی موجود در محیط دچار نویز می‌شود. برای حذف دریفت از مقدار زاویه یاو حاصل از داده‌های ژیروسکوپ، می‌توان از مقدار خروجی قطب‌نما استفاده نمود. ترکیب مقادیر زاویه قطب‌نمای دیجیتال با مقدار زاویه یاو بدست آمده از داده‌های ژیروسکوپ با فیلتر کالمن در شکل ۱۰-ب آمده است. دیده می‌شود که دریفت از مقادیر زاویه یاو حذف شده است. و مقادیر زاویه یاو بدون نویز و بدون دریفت می‌باشد.

تعیین موقعیت تراکتور در جاده:

شکل ۱۱ مسیر طی شده توسط تراکتور در سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه در یکی از تکرارها را در کنار مسیر واقعی تعیین شده نشان می‌دهد. مقادیر موقعیت حاصل از سامانه INS بر روی مسیر واقعی قرار گرفته و آن را کاملاً پوشانده است، لذا تعیین موقعیت تراکتور از خروجی سامانه INS مقدور می باشد. برای مقایسه دقت سامانه در تعیین موقعیت، میانگین مقادیر مختصات نقاط مسیر بدست آمده از داده‌های سامانه در هر سرعت پیشروی (حاصل از چهار تکرار) استخراج شد و با مقادیر واقعی مقایسه گردید.

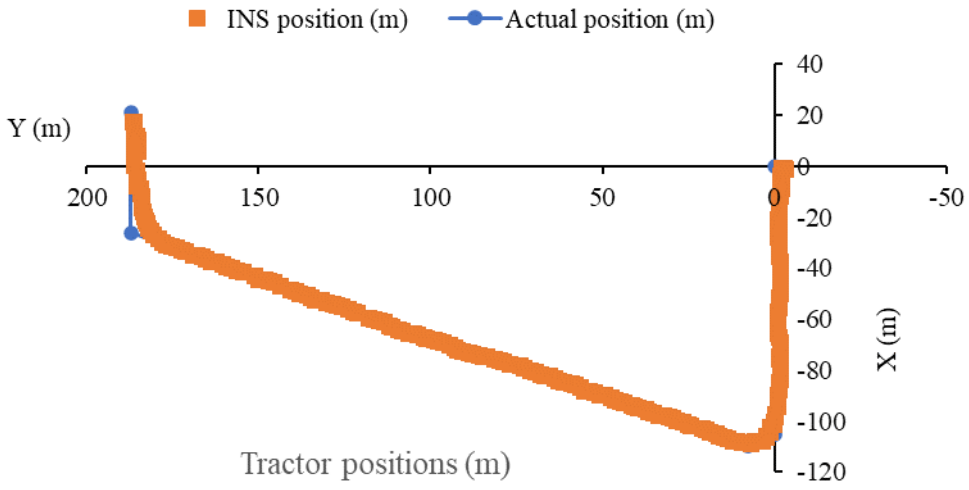


(الف)

(ب)

شکل (۱۰) الف- مقدار زاویه خروجی از قطب‌نمای دیجیتال (برحسب درجه) و ب- ترکیب مقادیر زاویه قطب‌نمای دیجیتال با مقدار زاویه یاو ژیروسکوپ

Figure (10) a- The angle value output from the digital compass (degree), b- The combination of the digital compass angle value with the gyroscope yaw angle value



شکل (۱۱) مسیر واقعی طی شده توسط تراکتور و موقعیت تعیین‌شده از داده‌های سامانه INS
Figure (11) Actual path traveled by the tractor and position determined from the INS system data

مطابق نتایج جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در تعیین موقعیت توسط سامانه در راستای X برابر با ۴/۶۱ متر و در راستای Y برابر با ۳/۵۰ متر و در کل ۴/۰۹ متر بوده است. همچنین حداکثر خطا در تعیین موقعیت (Emax) در راستای X برابر با ۱۱/۱۵ متر و در راستای Y برابر با ۱۱/۰۵ متر و در کل ۱۱/۱۵ متر بوده است (جدول ۲). این خطاها ناشی از قطع شدن داده‌های GPS در برخی از نقاط مسیر حرکت می‌باشد که منجر به اختلال در عملکرد سامانه و درنتیجه محاسبه نادرست مقادیر موقعیت‌ها و خروجی فیلتر کالمن گردید. این مقادیر خطا برای هدایت تراکتور در مزرعه بدون انجام عملیات زراعی می‌تواند قابل استفاده باشد، لیکن برای انجام عملیات زراعی توسط تراکتور و نیز هدایت خودکار تراکتور در جاده (بدون راننده) کافی نمی‌باشد. لذا لازم است برای افزایش دقت تعیین موقعیت تراکتور توسط سامانه INS از حسگرها و ماژول‌های دقیق‌تر کمک گرفت و با تلفیق داده‌های حسگرها با الگوریتم‌های مختلف، دقت تعیین موقعیت را بهبود بخشید.

تجزیه واریانس مقادیر حداکثر خطا در تعیین موقعیت توسط سامانه INS در جدول ۳ بیانگر آن است که تاثیر سرعت پیشروی در تعیین موقعیت در راستای X و Y و همچنین موقعیت کل در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نبوده است، و لذا عملکرد سامانه در تعیین موقعیت تراکتور به سرعت پیشروی تراکتور وابسته نیست و سامانه می‌تواند در سرعت‌های مختلف پیشروی موقعیت تراکتور را تعیین نماید.

جدول (۲) مقادیر حداکثر خطا در تعیین موقعیت تراکتور
Table (2) Maximum Error in Tractor Position Estimation

سرعت پیشروی Forward Speed	میانگین (m) Average (m)	واریانس (m) Variance (m)
1.5 m/s	3.5445	8.8653
2.5 m/s	2.7598	4.1382
3.5 m/s	3.2568	6.9043

جدول (۳) تجزیه واریانس مقادیر حداکثر خطا در تعیین موقعیت تراکتور توسط سامانه

Table (3) Analysis of Variance (ANOVA) of Maximum Error in Tractor Position Estimation

راستا Direction	منابع تغییرات SV	مجموع مربعات SS	درجه آزادی DF	میانگین مربعات MS	F	P-value
X	سرعت تراکتور Tractor speed	3.5369	2	1.7684	0.2238	0.8001^{ns}
Y	سرعت تراکتور Tractor speed	11.5857	2	5.7928	1.1295	0.3302^{ns}
کل Total	سرعت تراکتور Tractor speed	12.6085	2	6.3042	0.9500	0.3896^{ns}

نتیجه‌گیری

مقایسه سه روش تعیین جهت قرارگیری تراکتور (ژیروسکوپ، شتاب‌سنج و تلفیق داده‌ها با فیلتر کالمن) نشان داد که زوایای رول و پیچ بدست آمده با فیلتر کالمن دارای دقت بالاتری نسبت به مقادیر بدست آمده برای این دو زاویه از طریق داده‌های ژیروسکوپ و شتاب‌سنج به تنهایی است.

زوایای رول و پیچ بدست آمده با فیلتر کالمن بدون نوسان و دریفت و دارای دقت بالاتری نسبت به مقادیر بدست آمده برای این دو زاویه از طریق داده‌های ژیروسکوپ و شتاب‌سنج به تنهایی است و استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته می‌تواند در تعیین جهت قرارگیری تراکتور با دقت مناسب بسیار موثر باشد.

بررسی مقادیر بدست آمده برای موقعیت تراکتور از داده‌های IMU نشان داد که کاربرد این ماژول به تنهایی، به دلیل وجود خطاهای تجمعی که منجر به دریفت می‌شود، برای تعیین موقعیت مناسب نمی‌باشد. همچنین به کارگیری واحد GPS به تنهایی قادر به تعیین موقعیت با دقت پائین است. با تلفیق داده‌های GPS و IMU به کمک فیلتر کالمن، می‌توان به دقت بالاتری در تعیین موقعیت تراکتور دست یافت.

برای بهبود عملکرد سامانه پیشنهاد می‌شود از ماژول‌های GPS و IMU دقیق‌تری استفاده شود. برای حذف نویز از داده‌های حسگرها، الگوریتم‌های دیگر نیز تست شوند. همچنین نسخه‌های دیگر فیلتر کالمن و نیز سایر الگوریتم‌های تلفیق داده‌ها استفاده شوند. ارزیابی عملکرد نسخه نهایی سامانه در شرایط مزرعه‌ای و در حین انجام عملیات زراعی توسط تراکتور ضروری است.

سپاس گزاری

از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز بابت حمایت مالی از این پژوهش در قالب پژوهانه به شماره SCU.AA1400.225 تقدیر و تشکر می‌شود. همچنین از گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد بابت فراهم‌سازی امکانات موردنیاز برای آماده‌سازی، ارسال و پیگیری مقاله کمال تشکر را دارد.

References

1. Anonymous. 2022. CMPS03 compass module. https://www.arduino.cc. (accessed June 2022) Arduino Company. 2019. Arduino MEGA 2560 Rev3. https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3. (accessed October 2019)
2. Asghari, A., Nasrollahi, S., and Ghahremani, N. 2019. Implementation of roll angle and angular velocity estimation algorithm for a high-speed projectile using accelerometers output data. Journal of Control, 13(2): 67-80. https://doi.org/10.29252/joc.13.2.67. (In Persian)
3. Baek, S., Liu, Ch., Watta, P., and Murphey, Y.L. 2017. Accurate vehicle position estimation using a Kalman filter and neural network-based approach. IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), Honolulu, HI, USA. https://doi.org/10.1109/SSCI.2017.8285360
4. Ghasemzadeh, S.V. 2019. Modelling and simulating of inertial navigation systems in INERTIAL, ECEF and NED coordinate systems. Aerospace Mechanics Journal, 14(4): 75-89. https://sid.ir/paper/101818/en. (In Persian)
5. Ghasemzadeh, S.V. 2020. Precise navigation of a marine vessel using the integration of INS and GPS systems and the use of an extended Kalman filter. Aerospace Mechanics Journal, 15(1): 153-165. (In Persian)
6. Goli, H., Minaei, S., Jafari, A., Keyhani, A.R., Hajiahmad, A., Abdolmaleki, H., and Borghaee, A.M. 2014. Comparison of four different methods for agricultural positioning using GPS and IMU. Journal of Agricultural Machinery, 4(2): 285-295. https://doi.org/10.22067/jam.v4i2.20849. (In Persian)
7. Liu, Y., Fan, X., Lv, Ch., Wu, J., Li, L., and Ding, D. 2018. An innovative information fusion method with adaptive Kalman filtering for integrated INS/GPS navigation of autonomous vehicles. Mechanical Systems and Signal Processing, 100: 605-616. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.07.051
8. Masoudi, H., and Khorasani Ferdavani, M.E. 2012. Tractor three angles measurement system using gyroscope. 7th National Congress on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization, 5-7 September 2012, Shiraz University, Iran. (In Persian)
9. Mazidi, M., Abbaspour-Fard, M.H., and Aqkhani, M.H. 2013. Investigation of automatic localization and guidance of agricultural vehicles using GPS data. 8th National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystems) and Mechanization of Iran, 29-31 February, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian)
10. Mazidi, M., Abbaspour-Fard, M.H., and Akbarzadeh-T., M.R. 2021. Low-cost differential positioning for precision agriculture applications in less developed areas. Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery, 10(2): 23-32. (In Persian)
11. Navidi, N., Landry, R. Jr., Cheng, J., and Gingras, D. 2016. A new technique for integrating MEMS-based low-cost IMU and GPS in vehicular navigation. Journal of Sensors, 2016: 1-16. https://doi.org/10.1155/2016/5365983
12. Nezhadshahbodaghi, M., and Mosavi, M. R. 2019. Three-dimensional angles measurement using IME based on MEMS technology by adaptive Kalman filter. Electronic and Cyber Defense, 7(2): 81-91. https://sid.ir/paper/243224/en (In Persian)
13. Park, K., Kim, W., and Seo, J. 2020. Effects of initial attitude estimation errors on loosely coupled smartphone GPS/IMU integration system. In 2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2020), 13-16 October, BEXCO, Busan, Korea. pp. 800-803.
14. Pedley, M. 2013. Tilt sensing using a three-axis accelerometer. Freescale Semiconductor Application Note, 1: 2012-2013.
15. Romaniuk, S., and Gosiewski, Z. 2014. Kalman filter realization for orientation and position estimation on dedicated processor. ACTA Mechanica et Automatica, 8(2): 88-94. https://doi.org/10.2478/ama-2014-0016
16. Sharifi, A., and Eslami, A. 2025. Implementation of a single degree of freedom rotary inertial navigation system based on low-cost inertial sensors. 23rd International Conference of the Iranian Aerospace Society, 20-22 May, Tehran, Iran. http://openaccess.ir/c/HN-AERO2025/paper_1515405
17. Wang, Sh., Deng, Zh., and Yin, G. 2016. An accurate GPS-IMU/DR data fusion method for driverless car based on a set of predictive models and grid constraints. Sensors, 16(280): 1-13. https://doi.org/10.3390/s16030280

18. Woodman, O.J. 2007. An introduction to inertial navigation. Technical report Number 696. Published by the University of Cambridge, Computer Laboratory. https://doi.org/10.1.1.63.7402

19. Xiang, Y., and Noguchi, N. 2014. Development and evaluation of a general-purpose electric off-road robot based on agricultural navigation. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 7(5): 14-21. Retrieved from https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/1328

20. Yin, X., Du, J., Noguchi, N., Yang, T., and Jin, Ch. 2018. Development of autonomous navigation system for rice transplanter. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(6): 89–94. Retrieved from https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/3023