

مقایسه چهار روش مکان‌یابی در کشاورزی به کمک سامانه موقعیت‌یاب جهانی و واحد اندازه‌گیری ماند

هادی گلی^{۱*} - سعید مینایی^۲ - علی جعفری^۳ - علیرضا کیهانی^۴ - علی حاجی احمد^۵ - حمید عبدالملکی^۶

علی محمد برقی^۷

تاریخ دریافت: ۹۲/۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۲/۷/۲۱

چکیده

به منظور ارزیابی میزان دقت روش‌های مکان‌یابی، در این تحقیق چهار روش مختلف، توسط حرکت یک روبات کنترل از راه دور بر روی یک مسیر معین مورد مقایسه قرار گرفت. روش‌های مقایسه شده عبارتند از: به کارگیری یک واحد مکان‌یاب جهانی (GPS)، تلفیق داده‌های سه واحد GPS، استفاده از یک واحد اندازه‌گیری ماند (IMU) به تنهایی و تلفیق داده‌های GPS/IMU. مقایسه این چهار روش نشان داد که استفاده از تلفیق داده‌های سامانه مکان‌یاب جهانی و واحد اندازه‌گیری ماند به کمک فیلتر کالمن، نسبت به روش‌های دیگر، دقت بالاتری در مکان‌یابی به دست می‌دهد؛ به طوری که ریشه میانگین مربعات خطای این روش ۲۳/۴cm به دست آمد. به کارگیری سه واحد GPS به طور هم‌زمان که در موقعیت‌های ثابت و با فاصله نسبتاً دور از یکدیگر نصب شده‌اند، نیز با ریشه میانگین مربعات خطای ۳۱/۳cm، در رتبه بعدی این مقایسه قرار گرفت. همچنین بررسی داده‌های به دست آمده از واحد اندازه‌گیری ماند نشان داد که کاربرد این وسیله به تنهایی، به دلیل وجود خطاهای تجمعی، برای تعیین موقعیت مناسب نمی‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تلفیق داده، سامانه مکان‌یاب جهانی، فیلتر کالمن، واحد اندازه‌گیری ماند

مقدمه

کاهش محدوده بینایی در شب و هوای مه‌آلود می‌باشند. در مطالعات انجام شده برای تعیین موقعیت، ترکیب سامانه مکان‌یاب جهانی (GPS) و سایر حسگرها مانند حسگرهای اندازه‌گیری اینرسی، حسگر تعیین امتداد قرارگیری (قطب‌نمای دیجیتال)، دوربین، رادار و حسگرهای لیزر، نتایج دقیق‌تری نسبت به استفاده تنها از سامانه مکان‌یاب جهانی ارائه نموده‌اند (Hague et al., 2000; Keicher and Seufert, 2000; Li et al., 2009; Miguel Angel, 2003; Noguchi et al., 1997; Reid et al., 2000; Stoll and Dieter Kutzbach, 2000; Subramanian et al., 2006; Tillett, 1991). یکی از راه‌های کم‌هزینه ترکیب اطلاعات به دست آمده از چندین حسگر تعیین موقعیت، به کارگیری فیلتر کالمن می‌باشد (Alonso-Garcia et al., 2011; Caron et al., 2006; Daily and Bevely, 2004; Gomez-Gil et al., 2011; Lenain et al., 2009; Rodríguez and Gómez, 2006). در پژوهش‌های متعدد، سامانه مکان‌یاب تفاضلی (DGPS) برای تعیین موقعیت با دقتی در حد چند سانتی‌متر در شرایط مزارع کشاورزی به کار گرفته شده است (Dijksterhuis et al., 1998; O'Connor et al., 1996; Thomas, 2000). ژانگ و همکاران (۱۹۹۹) یک تراکتور کشاورزی را به سامانه ناوبری هوشمند با حسگرهای ماشین بینایی و

به کارگیری انواع سامانه‌های مکان‌یاب به‌ویژه سامانه مکان‌یاب جهانی (GNSS) در حوزه کشاورزی دقیق هر روز کاربرد بیشتری پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال، در گذشته تعیین نقاط نمونه‌برداری خاک با دشواری زیادی همراه بود، در حالی که امروزه سامانه‌های مکان‌یاب و نرم افزارهایی که در این زمینه تهیه شده‌اند، به سهولت آن کمک زیادی کرده‌اند. روش‌های نوین هدایت ماشین‌های کشاورزی نیز مستلزم تعیین موقعیت دقیق آن‌ها می‌باشد. این روش‌ها موجب افزایش بازده، کاهش خستگی راننده و بهبود عملیات در هنگام

۱- استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنجان

(*- نویسنده مسئول: Email: hgoli@iausdj.ac.ir)

۲- دانشیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۳، ۴ و ۵- به ترتیب استاد، استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۶- دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۷- استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

دقیق‌تر مورد ارزیابی قرار گرفتند (Dussault et al., 2001).

استفاده هم‌زمان از سه واحد موقعیت‌یاب جهانی (GPS)

در این روش از سه حسگر GPS واقع بر انتهای پروفیل‌های سبک آلومینیومی نصب شده بر روی یک روبات مجهز به سامانه کنترل از راه دور (مطابق شکل ۱) استفاده گردید. از آنجا که موقعیت قرارگیری این سه حسگر نسبت به یکدیگر مشخص بود، تلفیق داده‌های آن‌ها موجب کاهش خطای اندازه‌گیری گردید. این سه حسگر طوری بر نقاط انتهایی پروفیل‌های آلومینیومی نصب شدند که واقع بر محیط یک دایره به شعاع ۳ متر بوده و از یکدیگر فواصل ثابت ۵/۲ متر داشته باشند. تعیین خطای این روش، با معلوم بودن موقعیت دقیق استقرار سه واحد GPS از یکدیگر، صورت پذیرفت. به این ترتیب که با در نظر گرفتن مختصات هر یک از واحدهای GPS مختصات مرکز دایره محاط بر آن‌ها محاسبه می‌شد، سپس با محاسبه اختلاف موقعیت این نقطه از نقطه متناظر بر روی مسیر خط‌کشی شده طبق شکل ۲، خطای مذکور محاسبه گردید. آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش بر روی سطح خاک و در زمینی مسطح در شهر کرج صورت پذیرفت. در تعیین دقیق مختصات جغرافیایی نقطه شروع حرکت، از آزمون استاتیکی ۲۴ ساعته استفاده گردید. بدین ترتیب مختصات این نقطه از مقادیر دارای بیشترین فراوانی استخراج گردید. این نقطه دارای عرض جغرافیایی ۳۵/۴۷۹۶۰۹۶ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰/۵۹۷۹۷۶۵ درجه شرقی بود. هدایت روبات در آزمایش‌ها، به صورت کنترل از راه دور توسط کاربر با در دست داشتن یک دسته کنترل صورت پذیرفت. معیار کنترل مسیر توسط کاربر، وزنه مخروطی شکل سنگینی (شاقول) بود که از امتداد گرانیگاه خود توسط یک نخ به وسط محور جلوی روبات متصل شده و بر روی مسیر رسم شده حرکت داده می‌شد.

استفاده از واحد اندازه‌گیری ماند (IMU)

روش دیگر مکان‌یابی به کارگیری واحد اندازه‌گیری ماند (IMU) بود. واحد اندازه‌گیری ماند مورد استفاده ساخت شرکت Sparkfun مدل SEN-02396 می‌باشد. در این واحد یک شتاب‌سنج^۴ سه محوری مدل ADXL345 مقدار مؤلفه شتاب حرکت خود را در امتداد سه محور دو به دو عمود بر هم به دست می‌داد. تراشه دیگری^۵ سرعت زاویه‌ای با بردار عمود بر سطح زمین را اندازه می‌گرفت (LY530AL) و سومی سرعت‌های زاویه‌ای با بردارهای واقع در امتداد طولی و عرضی روبات را اندازه‌گیری می‌کرد (LPR530AL).

ژیروسکوپ فیبر نوری مجهز نمودند. نتایج ارزیابی نشان داد که سامانه ناوبری هوشمند با تلفیق چندین حسگر ناوبری قادر است ماشین‌های کشاورزی را در زمین حاوی محصولات ردیفی بدون عبور از روی محصول هدایت نماید. همچنین ناگاساکا و همکاران (۲۰۰۶) از این سامانه ناوبری برای نشاکاری خودکار در مزارع برنج استفاده کردند. آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که دقت نشاکاری با این روش در حد مطلوبی است ولی برای عملیات سم‌پاشی و وجین مکانیکی به دلیل حرکت در میان ردیف‌ها دارای دقت کافی نمی‌باشد.

حسگرهای وضعیت‌سنج با ترکیبی از سه ژیروسکوپ ارتعاشی و دو شیب‌سنج در پژوهش میزوشیما و همکاران (۲۰۱۱) به کار برده شد. آزمایش‌ها در زمین‌های صاف، شیب‌دار و جاده دارای دست‌انداز انجام گرفت. در این آزمایش‌ها زوایای غلت و ناوش^۱، زاویه راستای^۲ و وسیله نقلیه و موقعیت با تصحیح خطای شیب به وسیله ترکیب با یک گیرنده GPS برآورد گردید. نتایج نشان داد که حسگر وضعیت‌سنج قادر است زوایای غلت، ناوش و راستا را به ترتیب با حداکثر ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۴۳، ۰/۶۱ و ۰/۶۴ درجه برآورد کند. همچنین خطای مکان‌یابی در زمین‌های شیب‌دار از ۲۵/۹ به ۳ سانتی‌متر و در جاده دارای دست‌انداز از ۸/۴ به ۳/۷ سانتی‌متر کاهش پیدا کرد. در تحقیقات دیگری از ترکیب سرعت GPS با حسگر INS^۳ به منظور اندازه‌گیری زاویه لغزش خودرو و تایر هنگام دور زدن استفاده شده است (Bevly et al., 2001; Ryu et al., 2002).

از آنجا که حسگرهای بسیار دقیق مانند سامانه موقعیت‌یاب تفاضلی (DGPS) علاوه بر هزینه بسیار بالا، دارای محدودیت‌های دسترسی هستند، در این پژوهش روش‌های مختلفی از تلفیق اطلاعات واحد موقعیت‌یاب جهانی و واحد اندازه‌گیری ماند به کمک فیلتر کالمن به کار گرفته شد تا روشی دقیق برای مکان‌یابی در کاربردهای کشاورزی با هزینه مناسب انتخاب شود.

مواد و روش‌ها

به کارگیری واحد موقعیت‌یاب جهانی (GPS) یکی از بهترین روش‌های مکان‌یابی، بدون نیاز به نقطه مبدا، به کارگیری گیرنده‌های GPS می‌باشد. هر چه تعداد ماهواره‌های بیشتری در دسترس واحد GPS باشد، دقت اندازه‌گیری و موقعیت‌یابی بالاتری خواهد داشت. مدل واحدهای GPS مورد استفاده در این تحقیق Ublox NEO-5M بود. از آنجا که داده‌های GPS در شرایط مطلوب (با در دسترس بودن هفت یا هشت ماهواره) دارای خطایی بین یک تا دو متر می‌باشد، در پژوهشی روش‌های دیگری به منظور تعیین موقعیت

1- Roll and pitch angles

2- Heading angle

3- Inertial navigation system

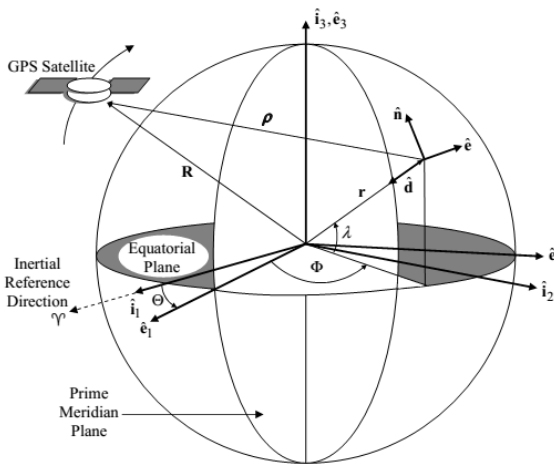
4- Accelerometer

5- Gyro



شکل ۱- دو تصویر از روبات در حال حرکت بر روی مسیر رسم شده بر روی خاک هموار، برای ارزیابی روش‌های مکان‌یابی
Fig.1. The images of the robot moving on specified path to evaluate positioning methods on flat ground

مختصات در شکل ۳ قابل مشاهده‌اند (Crassidis, 2006).



شکل ۳- توصیف دستگاه‌های مختصات مورد استفاده بر سطح زمین
 (Crassidis 2006)

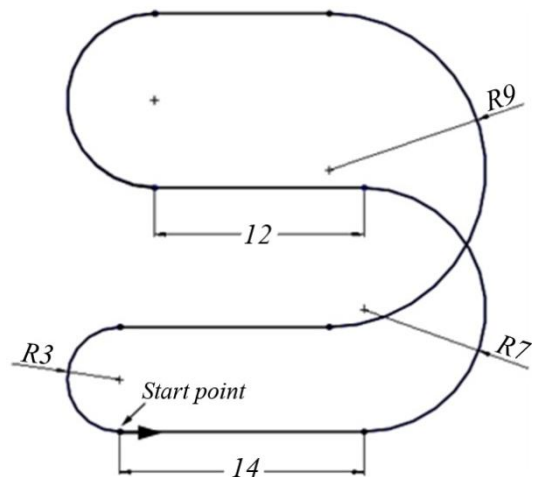
Fig.3. Definitions of Various Reference (Crassidis 2006) Frames

الف) دستگاه مختصات ماند پایه با مبدأ واقع در مرکز زمین^۲ (ECI): دستگاه مختصات ECI وابسته به حرکت هیچ یک از سیارات نیست و گردش زمین نسبت به این مختصات قابل نمایش است. در روابط زیر بردارهای توصیف شده با این مختصات با بالوند I نمایش داده می‌شوند. (مثلاً V^I یعنی بردار سرعت با توجه به مختصات ECI).

ب) دستگاه مختصات متصل به زمین با مبدأ واقع در مرکز زمین^۳ (ECEF): بر خلاف دستگاه مختصات ECI، دستگاه ECEF همراه با گردش زمین، دوران می‌کند و این زاویه دوران مطابق شکل ۳ با θ

چهارمین تراشه یک قطب‌نمای دیجیتال مدل HMC5843 بود. خروجی این چهار تراشه از طریق یک میکروکنترلر به رایانه ارسال می‌شد.

تلفیق داده‌های واحد اندازه‌گیری ماند و موقعیت‌یاب جهانی؛ در این روش داده‌های GPS به همراه داده‌های حسگر IMU در نرم افزار متلب به روش فیلتر کالمن^۱ تلفیق شدند. در تلفیق اطلاعات یکسان بودن مقیاس داده‌های تمام حسگرها ضروری است. بنابراین از روش تبدیل مختصات مرجع بدین منظور استفاده گردید.



شکل ۲- مسیر خط‌کشی شده بر روی خاک مسطح برای ارزیابی روش‌های تعیین موقعیت روبات (اندازه‌ها بر حسب متر)

Fig.2. Drawn path on flat ground to evaluate positioning methods

دستگاه‌های مختصات مرجع که جهت استخراج معادلات GPS/IMU به کار رفته‌اند، به شرح زیر می‌باشند. این دستگاه‌های

- 2- Earth-centered inertial
- 3- Earth-centered-earth-fixed (ECEF) frame

- 1- Kalman filter

نشان داده می‌شود. بردارهای توصیف شده در این دستگاه با بالوند E نمایش داده خواهند شد.

ج) دستگاه مختصات شمال - شرق - پایین^۱ (NED): این دستگاه مختصات به منظور ناوبری محلی^۲ به کار می‌رود و با مماس کردن یک صفحه با سطح زمین در نقطه مورد نظر تشکیل می‌شود. بردارهای توصیف شده در دستگاه NED با بالوند N نمایش داده خواهند شد.

د) دستگاه مختصات واقع بر بدنه وسیله نقلیه^۳: این دستگاه بر بدنه وسیله نقلیه منطبق است و همراه با آن دوران می‌کند. هر یک از بردارهای یکه این دستگاه به طور دلخواه می‌توانند با امتداد وسیله نقلیه منطبق شوند. بردارهای توصیف شده در این دستگاه با بالوند B نمایش داده شده‌اند.

تبدیل دستگاه‌های مختصات مرجع به یکدیگر

اطلاعات مخابره شده حسگرهای GPS از ماهواره‌هایی که موقعیت آن‌ها با دستگاه مختصات ECI تعیین می‌شود، با مبنای ECEF قابل انطباق است. همچنین موقعیت، سرعت و شتاب وسیله نقلیه در دستگاه NED حائز اهمیت بوده و نیز اطلاعات به دست آمده از حسگر IMU نصب شده روی بدنه روبات، در دستگاه واقع بر بدنه وسیله نقلیه معتبر است. به منظور یکسان‌سازی این اطلاعات و برای استخراج معادلات GPS/IMU، تبدیل‌های هر یک از این مختصات استخراج شده است. رابطه (۱) روش تبدیل مختصات ECI به ECEF را نمایش می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^E = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^I \quad (1)$$

برای تبدیل طول جغرافیایی (λ)، عرض جغرافیایی (Φ) و ارتفاع از سطح متوسط دریا (h) که خروجی حسگرهای GPS هستند به مختصات ECEF از روابط (۲) تا (۴) استفاده می‌شود.

$$x = (N+h) \cos \lambda \cos \Phi \quad (2)$$

$$y = (N+h) \cos \lambda \sin \Phi \quad (3)$$

$$z = [N(1-e^2)+h] \sin \lambda \quad (4)$$

در این روابط مقدار N (طول خط عمود بر بیضی‌گون^۴ در عرض جغرافیایی مورد نظر) از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \lambda}} \quad (5)$$

مقادیر a (شعاع بزرگ بیضی‌گون زمین که بر صفحه استوا واقع شده است)، b (شعاع کوچک بیضی‌گون زمین که عمود بر صفحه استوا است) و میزان خروج از مرکز بیضی‌گون (e) از مدل رایج WGS-۸۴^۵ به ترتیب عبارت‌اند از: 6378137 m ، 6356752.3 m و 0.0081818 (۸۵). سایر تبدیل‌های مورد استفاده، برای پرهیز از درازای مطالب آورده نشده‌اند.

استخراج معادلات از واحد اندازه‌گیری ماند (IMU)

واحد اندازه‌گیری ماند مورد استفاده در این تحقیق شتاب خطی و سرعت زاویه‌ای را در راستای سه محور عمود بر هم نمایش می‌دهد. به علاوه، زاویه قرارگیری راستای وسیله نقلیه نسبت به محور شمال مغناطیسی نیز توسط این واحد از طریق سه زاویه معین می‌گردد. لیکن به لحاظ سهولت تحلیل و اینکه حرکت روبات بر روی زمین نسبتاً هموار صورت گرفته و شیب چندانی نداشته است، در اینجا تحلیل معادلات در دو بعد صورت پذیرفت. به این منظور مؤلفه سرعت زاویه‌ای ($\dot{\theta}$) در امتداد عمود بر سطح زمین، به همراه دو مؤلفه شتاب خطی در امتداد محور طولی و عرضی روبات در نظر گرفته شد. ابتدا خروجی شتاب‌سنج‌ها به کمک ماتریس دوران R_B^N از مختصات واقع بر بدنه وسیله نقلیه به مختصات NED توسط رابطه (۶) تبدیل گردید.

$$a^N = R_B^N \cdot a^B \quad (6)$$

که ماتریس دوران R_B^N در رابطه (۶) از رابطه (۷) نتیجه می‌گردد.

$$R_B^N = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

سپس مؤلفه‌های سرعت، می‌توانند با انتگرال‌گیری از مؤلفه‌های شتاب به دست آیند. به همین ترتیب موقعیت متناظر با بردار شتاب از طریق انتگرال‌گیری از بردار سرعت محاسبه می‌شود. از طرفی مؤلفه‌های سرعت در دستگاه NED می‌توانند از طریق دوران مؤلفه‌های سرعت در دستگاه واقع بر بدنه روبات نیز محاسبه شوند.

$$V^N = R_B^N \cdot V^B \quad (8)$$

با مشتق‌گیری از معادله (۸) نسبت به زمان رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$\dot{V}^N = R_B^N \cdot \dot{V}^B + \dot{R}_B^N \cdot V^B \quad (9)$$

که \dot{R}_B^N در رابطه (۹) از رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$R_B^N = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\theta} \\ \dot{\theta} & 0 \end{bmatrix} R_B^N \quad (10)$$

5- World geodetic system 1984 model

1- North-east-down frame
2- Local navigation
3- Body frame
4- Ellipsoid

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + w(k) \quad (13)$$

در معادله فوق $w(k)$ نویز مدل‌سازی است. در اغلب تحقیقات مربوط به مکان‌یابی با استفاده از حسگرهای GPS و IMU این نویز را سفید، گوسی و دارای میانگین صفر فرض می‌کنند (Grewal and Andrews, 2011). معادله اندازه‌گیری نیز به قرار رابطه (۱۴) می‌باشد:

$$y(k) = Cx(k) + v(k) \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، $v(k)$ نویز اندازه‌گیری است و مانند نویز فرآیند، آن را سفید، گوسی و دارای میانگین صفر در نظر می‌گیرند. در روش فیلتر کالمن عمل تخمین در دو مرحله انجام می‌گیرد: مرحله نخست، مرحله تغییر حالت‌های فرآیند بین دو لحظه نمونه‌برداری است. این مرحله را به‌هنگام‌سازی زمانی^۴ گویند. مرحله بعد به‌هنگام‌سازی حالت فرآیند در لحظه k با دانستن مقدار $y(k)$ است. این مرحله به نام به‌هنگام‌سازی اندازه‌گیری^۵ شناخته می‌شود. در ترکیب اطلاعات واحد GPS و واحد اندازه‌گیری ماند، تلفیق ناقص^۶ داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت، که نمودار روند نمای آن در شکل ۵ نمایش داده شده است.

نتایج و بحث

در این پژوهش تعیین موقعیت روبات به چهار روش صورت پذیرفت: از طریق به‌کارگیری یک واحد GPS به‌تنهایی، تلفیق سه واحد GPS، به‌کارگیری یک واحد اندازه‌گیری ماند (IMU) و تلفیق داده‌های یک واحد GPS و یک واحد اندازه‌گیری ماند. ابتدا به‌منظور افزایش دقت در مکان‌یابی به‌کمک GPS و امکان یافتن امتداد قرارگیری روبات، از سه واحد موقعیت‌یاب جهانی مطابق شکل ۱، به‌طور هم‌زمان استفاده شد. در شکل ۶ سامانه تعیین موقعیت روبات با یک واحد GPS و سه واحد GPS هنگام حرکت بر روی مسیر ارزیابی مورد مقایسه قرار گرفته است. در هنگام انجام آزمایش‌ها، تعداد ماهواره‌های قابل دسترسی بین هفت و هشت تغییر می‌کرد. خطای تعیین موقعیت به‌وسیله یک واحد GPS (با معیار ریشه میانگین مربعات خطا) که منطبق بر وسط محور جلوی روبات واقع شده بود، برابر با $39/1$ cm به‌دست آمد که این خطا هنگام استفاده هم‌زمان از سه واحد GPS تا $31/3$ cm کاهش یافت. در روش دیگر تعیین موقعیت روبات، ترکیب اطلاعات حاصل از واحد مکان‌یاب جهانی (GPS) و واحد اندازه‌گیری ماند (IMU) به‌کار برده شد. همان‌طور که ذکر شد، واحد اندازه‌گیری ماند از سه حسگر مختلف سرعت زاویه‌ای، شتاب‌سنج و قطب‌نمای دیجیتال تشکیل شده است.

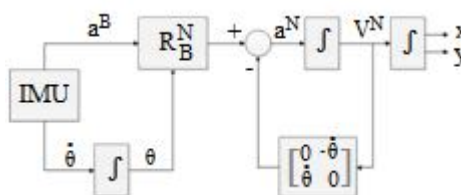
به‌عبارت دیگر رابطه (۹) را می‌توان به صورت رابطه (۱۱) بازنویسی کرد.

$$a^N = R_B^N \cdot a^B + \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\theta} \\ \dot{\theta} & 0 \end{bmatrix} \cdot v^N \quad (11)$$

مقایسه روابط (۶) و (۱۱) نشان دهنده شتاب زاویه‌ای ایجاد شده در اثر دوران نسبی دستگاه واقع بر بدنه روبات به دستگاه NED می‌باشد. در نهایت مؤلفه‌های شتاب در دستگاه NED به کمک رابطه (۱۲) قابل محاسبه‌اند.

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ -V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \dot{\theta} \\ -\dot{\theta} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \quad (12)$$

در شکل ۴ نمودار روند نمای تحلیل داده‌های IMU نمایش داده شده است.



شکل ۴- الگوریتم محاسبه موقعیت روبات به کمک داده‌های IMU در حرکت دو بعدی

Fig.4. The robot positioning algorithm using IMU data in a two dimensional motion

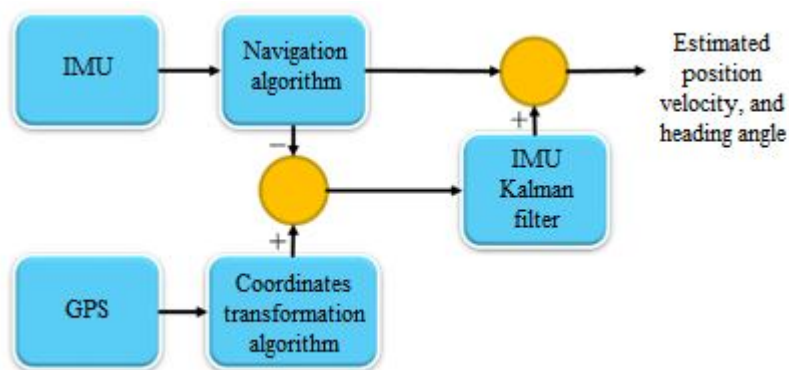
با توجه به روابط فوق انتظار می‌رود به کمک داده‌های حاصل از IMU بتوان موقعیت روبات را به‌دقت تخمین زد. لیکن به‌دلیل وجود نویز در اندازه‌گیری‌ها، انتگرال‌گیری از داده‌ها موجب ایجاد خطای تجمعی در محاسبه مسیر خواهد شد. که برای غلبه بر این مشکل، روش فیلتر کالمن به‌کار گرفته شد.

الگوریتم فیلتر کالمن

به‌کارگیری فیلتر کالمن، تخمین حالت سیستم‌های تصادفی^۱ به‌دست می‌آید. مزیت اصلی این فیلتر نسبت به سایر فیلترهای بازگشتی^۲ این است که در فیلتر کالمن برای تخمین حالت بعدی^۳ سیستم تنها از آخرین تخمین به‌دست آمده استفاده می‌کند. در این فیلتر دو متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شود که عبارت هستند از نویز فرآیند (مدل‌سازی) و نویز اندازه‌گیری. در این فیلتر معادله فرآیند به‌صورت رابطه (۱۳) است.

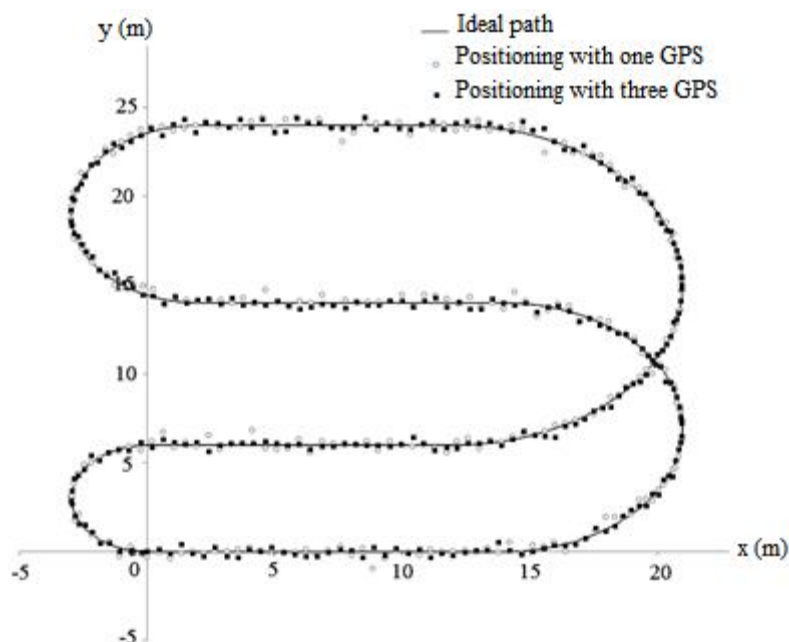
- 4- Time update
- 5- Measurement update
- 6- Loosely coupled integration

- 1- Stochastic systems state estimation
- 2- Recursive filters
- 3- Next state estimation



شکل ۵- ساختار تلفیق ناقص GPS/IMU به کمک فیلتر کالمن

Fig.5. Loosely coupled integration of GPS/IMU using kalman filter

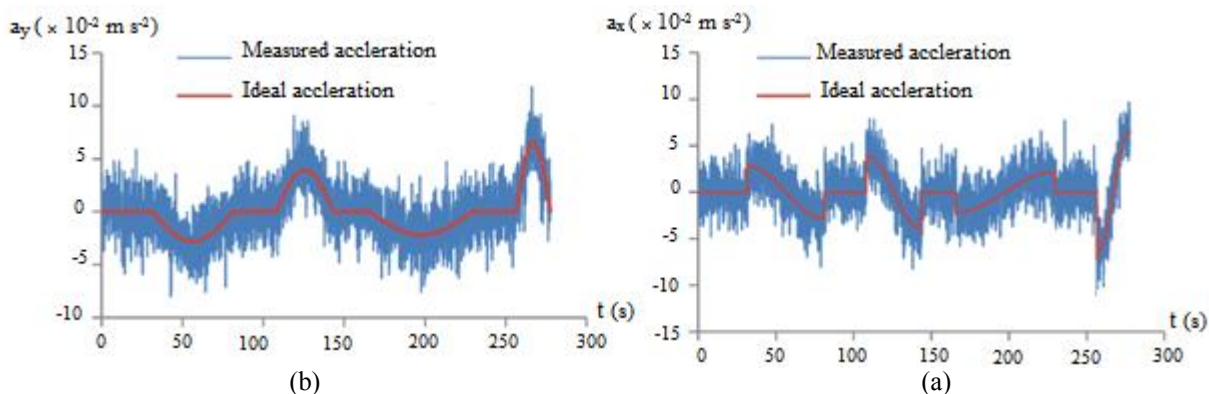


شکل ۶- نمایش مسیر حرکت روبات توسط یک واحد مکان‌یاب جهانی و تلفیق سه واحد از آن

Fig.6. Travelled path and measured position using 1 and 3 GPS

روی مسیر ارزیابی روش‌های تعیین موقعیت، نمایش داده شده است. با توجه به فراوانی قطعات آهنی روبات و نیز وجود میدان‌های مغناطیسی در اطراف برخی قطعات الکتریکی آن، واحد اندازه‌گیری ماند به دور از این قطعات، در انتهای یک لوله پلیمری و در یک محفظه پلاستیکی نصب گردید تا از اعتبار داده‌های قطب‌نمای دیجیتال کاسته نشود. لیکن ارتعاشات ناشی از روشن بودن موتور و حرکت روبات بر روی خاک، در انتهای این لوله بلند، دامنه بیشتری پیدا کرده و عامل اصلی نوسانات مشاهده شده در شکل‌های $a \gamma$ و $b \gamma$ شده است.

تعیین موقعیت روبات به کمک واحد اندازه‌گیری ماند بیشتر به حسگر شتاب‌سنج آن وابسته است، به طوری که با انتگرال گرفتن از شتاب خطی روبات در امتداد x و y نسبت به زمان، موقعیت آن را نمایان می‌سازد. انتگرال‌گیری از شتاب مستلزم در اختیار داشتن سرعت اولیه است که مقدار آن از داده‌های واحد موقعیت‌یاب به دست آمده و محاسبه اندازه مؤلفه‌های آن در امتداد x و y روبات به کمک داده‌های قطب‌نمای دیجیتال صورت گرفت. در شکل‌های $a \gamma$ و $b \gamma$ به ترتیب مقادیر شتاب طولی (در امتداد محور x) و عرضی (در امتداد محور y) نسبت به زمان آزمایش بر روی مسیر ارزیابی عملکرد روبات، به همراه مقادیر تئوری پیش‌بینی شده (مورد انتظار هنگام حرکت بر

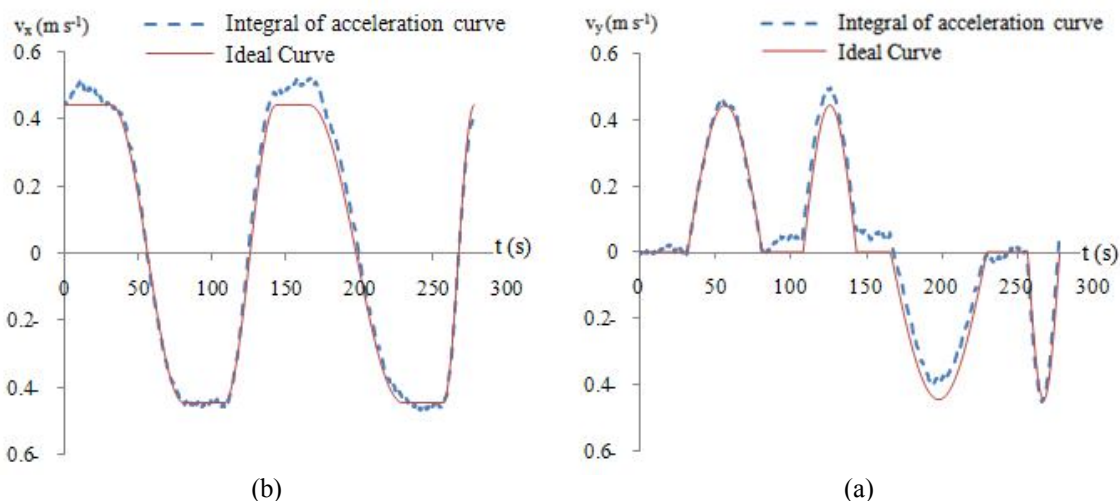


شکل ۷- داده‌های حسگر شتاب‌سنج نسبت به زمان t ، هنگام پیشروی روبات بر روی مسیر ارزیابی، به همراه نمودار پیش‌بینی شتاب براساس سرعت پیشروی ثابت در طول مسیر؛ (a) در امتداد محور طولی روبات، (b) در امتداد محور عرضی روبات

Fig.7. The robot accelerometer components and expected diagrams; (a) Along longitudinal axis, (b) Alonglateralaxis

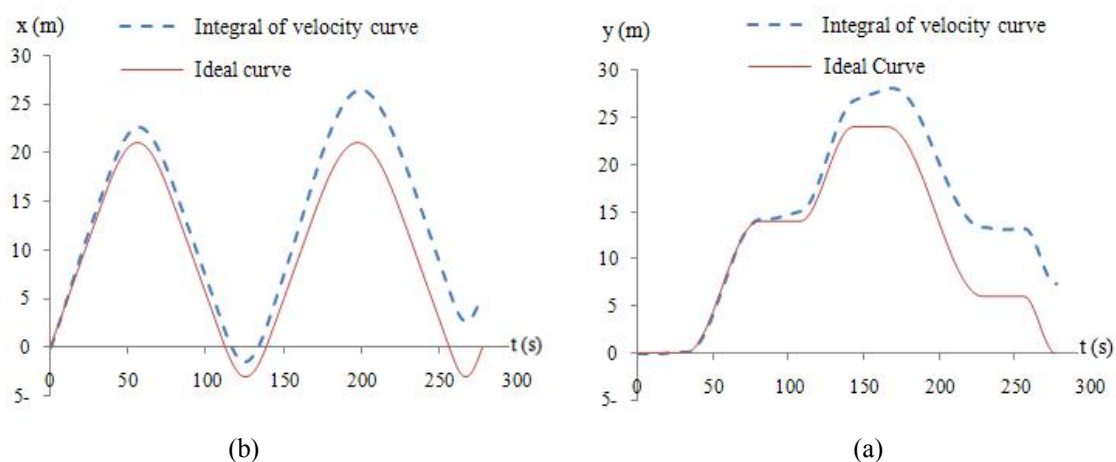
همان‌طور که دیده می‌شود، هنگام انتگرال‌گیری از مقادیر دارای نوسان شتاب، منحنی به‌دست آمده نوسان چندانی ندارد ولی به‌دلیل عدم رجوع به مقادیر حقیقی سرعت پیشروی، با گذشت زمان، محاسبه سرعت از طریق داده‌های حسگر شتاب‌سنج دچار خطای تجمعی می‌شوند. این موضوع در شکل‌های ۹ که به‌ترتیب منحنی‌های به‌دست آمده برای موقعیت طولی و عرضی روبات بر روی مسیر ارزیابی را نمایش می‌دهند، بیشتر به‌چشم می‌خورد.

با توجه به آغاز حرکت روبات، کمی پیش از شروع داده‌برداری، سرعت ثابت پیشروی روبات هنگام حرکت بر روی مسیر ارزیابی برابر ۱/۶ کیلومتر بر ساعت در امتداد محور طولی زمین آزمایش تضمین شده بود. بنابراین می‌توان از نمودارهای شتاب طولی و عرضی روبات با توجه به مقدار اولیه سرعت پیشروی انتگرال گرفت. شکل (a) و (b) به‌ترتیب نمودار مؤلفه‌های طولی و جانبی سرعت پیشروی روبات را به‌همراه نمودار پیش‌بینی آن نمایش می‌دهد.



شکل ۸- نمودار سرعت پیشروی روبات هنگام حرکت بر روی مسیر ارزیابی آن، به همراه منحنی پیش‌بینی مربوطه؛ (a) در امتداد محور طولی روبات، (b) در امتداد محور عرضی روبات

Fig.8. The robot speed components and expected diagrams; (a) Along longitudinal axis, (b) Alonglateral axis

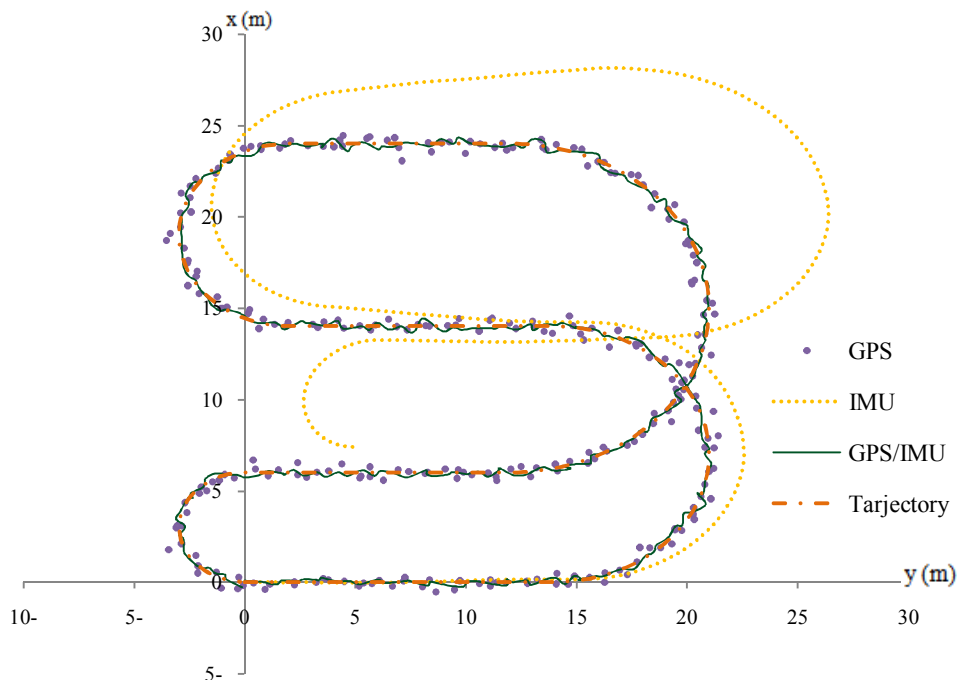


شکل ۹- منحنی به‌دست آمده از انتگرال‌گیری سرعت پیشروی روبات، همراه با منحنی پیش‌بینی مربوطه؛ (a) در امتداد محور طولی روبات، (b) در امتداد محور عرضی روبات

Fig.9. Calculated position and expected diagrams, (a) Along longitudinal axis,(b) Alonglateral axis

کاسته شود. در شکل ۱۰ مکان‌یابی روبات بر روی مسیر ارزیابی از طریق واحد مکان‌یاب جهانی (GPS)، واحد اندازه‌گیری ماند (IMU) و تلفیق اطلاعات این دو واحد به نمایش درآمده است. در این آزمایش با تلفیق داده‌های واحدهای GPS و IMU خطای تعیین موقعیت روبات ۲۳/۴cm به‌دست آمد.

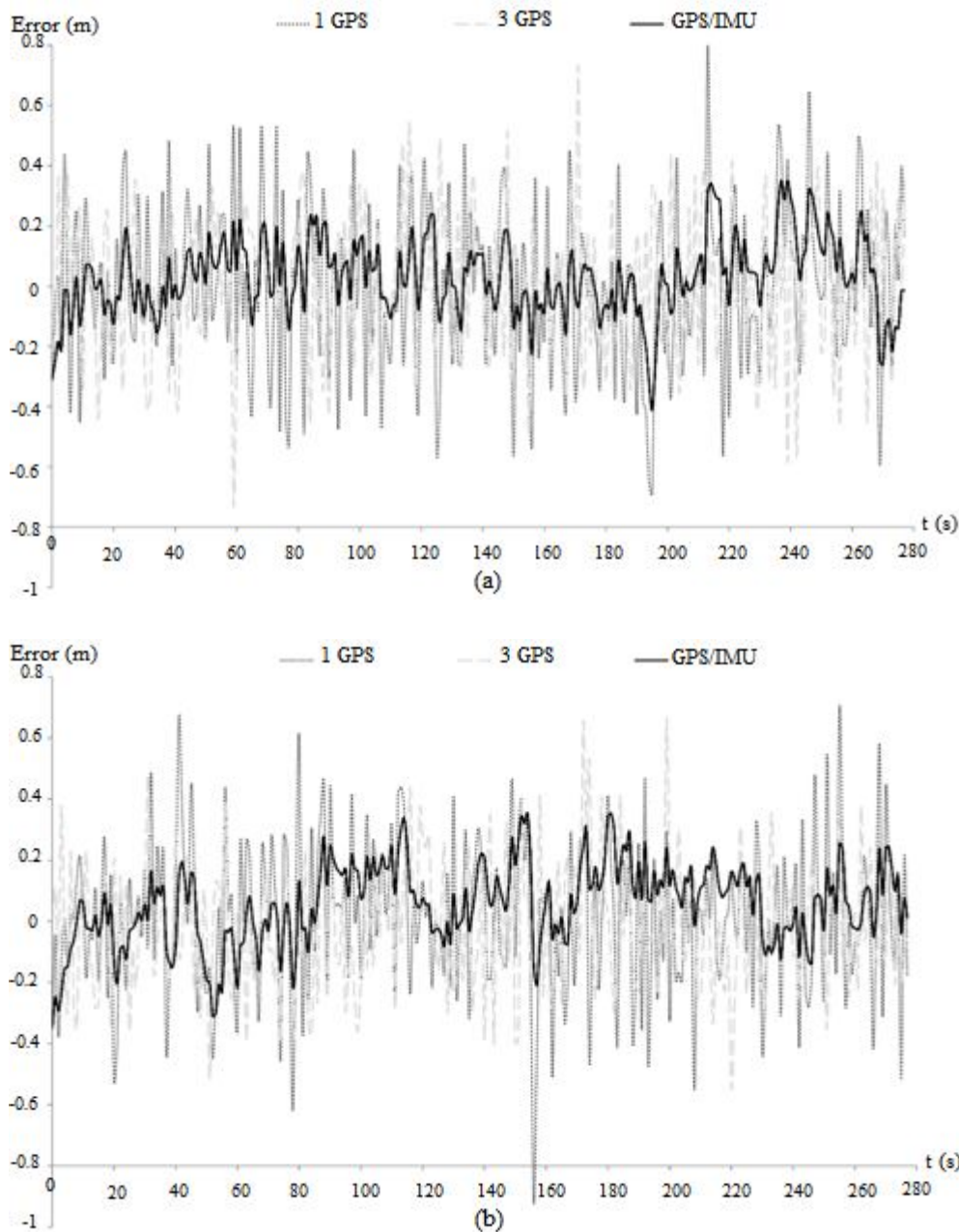
از آنجا که واحد اندازه‌گیری ماند با فواصل زمانی بسیار کمتری (در اینجا ده برابر) نسبت به داده‌های واحد مکان‌یاب جهانی به‌روز می‌شوند و از طرفی با توجه به خطای تجمعی ایجاد شده در تعیین موقعیت روبات به‌وسیله واحد اندازه‌گیری ماند، برای مکان‌یابی روبات از تلفیق داده‌های این دو واحد استفاده شد تا افزون بر کاهش زمان به‌روزرسانی اطلاعات مکان روبات، از خطای تعیین موقعیت آن نیز



شکل ۱۰- نمایش مسیر حرکت روبات توسط واحد مکان‌یاب جهانی، واحد اندازه‌گیری ماند و تلفیق آن‌ها با یکدیگر
Fig.10. Measured robot position using GPS, IMU and GPS/IMU integration

می‌باشد. از آنجا که خطای به‌کارگیری واحد اندازه‌گیری ماند با گذشت زمان افزایش زیادی پیدا می‌کند و از مقیاس خطای سایر روش‌ها فراتر می‌رود، از نمایش آن در این شکل خودداری شده است. این مقدار خطا از نمودارهای نمایش داده شده در شکل ۹ قابل مشاهده است.

در شکل ۱۱ خطای روش‌های مختلف تعیین موقعیت در دو امتداد X و Y نسبت به زمان هنگام حرکت روی مسیر ارزیابی روش‌های تعیین موقعیت نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تلفیق داده‌های GPS و IMU دارای دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌های مورد بررسی در این تحقیق



شکل ۱۱- نمودار خطای روش‌های مختلف تعیین موقعیت؛ (a) در امتداد محور X، (b) در امتداد محور Y
Fig.11. Error diagram of different positioning methods; (a) along x axis (b) along y axis

نتیجه‌گیری

همچنین بررسی داده‌های به‌دست آمده از واحد اندازه‌گیری ماند نشان داد که کاربرد این وسیله به‌تنهایی، به‌دلیل وجود خطاهای تجمعی، برای تعیین موقعیت مناسب نمی‌باشد.

تشکر و قدردانی

بخشی از این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران طی طرح پژوهشی شماره ۷۱۰۹۰۱۵/۱/۰۷ اجرا شده است، که بدین وسیله مورد تشکر و قدردانی قرار می‌گیرد.

مقایسه چهار روش تعیین موقعیت با معیار ریشه میانگین مربعات خطا نشان داد که با تلفیق داده‌های یک سامانه مکان‌یاب جهانی و یک واحد اندازه‌گیری ماند به‌کمک فیلتر کالمن، نسبت به روش‌های دیگر، دقت بالاتری در مکان‌یابی به‌دست می‌آید. گرچه روش مذکور در مقابل به‌کارگیری تجهیزات پیچیده‌تری چون DGPS دقت کمتری دارد، لیکن این روش به‌دلیل سهولت دسترسی و هزینه مناسب آن قابلیت بالایی در مکان‌یابی دارد. به‌کارگیری سه واحد GPS به‌طور هم‌زمان که در موقعیت‌های ثابت و با فاصله نسبتاً دور از یکدیگر نصب شده‌اند، نیز در رتبه بعدی این مقایسه قرار گرفت.

منابع

- Alonso-Garcia, S., J. Gomez-Gil, and J. I. Arribas. 2011. Evaluation of the use of low-cost GPS receivers in the autonomous guidance of agricultural tractors. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9: 377-388.
- Bevly, D. M., R. Sheridan, and J. C. Gerdes. 2001. Integrating INS sensors with GPS velocity measurements for continuous estimation of vehicle sideslip and tire cornering stiffness. *IEEE Proceedings of the American Control Conference* 1: 25-30. Arlington, VA.
- Caron, F., E. Duflos, D. Pomorski, and P. Vanheeghe. 2006. GPS/IMU data fusion using multisensor Kalman filtering: introduction of contextual aspects. *Information Fusion* 7: 221-230.
- Crassidis, J. L. 2006. Sigma-point Kalman filtering for integrated GPS and inertial navigation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 42: 750-756.
- Daily, R., and D. M. Bevly. 2004. The use of GPS for vehicle stability control systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 51: 270-277.
- Dijksterhuis, H., L. Van Willigenburg, and R. Van Zuydam. 1998. Centimetre-precision guidance of moving implements in the open field: a simulation based on GPS measurements. *Computers and Electronics in Agriculture* 20: 185-197.
- Dussault, C., R. Courtois, J. P. Ouellet, and J. Huot. 2001. Influence of satellite geometry and differential correction on GPS location accuracy. *Wildlife Society Bulletin* 29: 171-179.
- Gomez-Gil, J., S. Alonso-Garcia, F. J. Gómez-Gil, and T. Stombaugh. 2011. A simple method to improve autonomous GPS positioning for tractors. *Sensors* 11: 5630-5644.
- Grewal, M. S., and A. P. Andrews. 2011. *Kalman filtering: theory and practice using MATLAB*. Wiley-IEEE press.
- Hague, T., J. Marchant, and N. Tillett. 2000. Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles. *Computers and Electronics in Agriculture* 25: 11-28.
- Keicher, R., and H. Seufert. 2000. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. *Computers and Electronics in Agriculture* 25: 169-194.
- Lenain, R., B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet. 2006. High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding: Application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks. *Autonomous Robots* 21: 79-97.
- Li, M., K. Imou, K. Wakabayashi, and S. Yokoyama. 2009. Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 2: 1-16.
- Miguel Angel, S. 2003. Lateral control strategy for autonomous steering of ackerman-like vehicles. *Robotics and Autonomous Systems* 45: 223-233.
- Mizushima, A., K. Ishii, N. Noguchi, Y. Matsuo, and R. Lu. 2011. Development of a low-cost attitude sensor for agricultural vehicles. *Computers and Electronics in Agriculture* 76: 198-204.
- Nagasaka, Y., N. Umeda, Y. Kanetai, K. Taniwaki, and Y. Sasaki. 2004. Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes. *Computers and Electronics in Agriculture* 43:

- 223-234.
17. Noguchi, N., K. Ishii, and H. Terao. 1997. Development of an agricultural mobile robot using a geomagnetic direction sensor and image sensors. *Journal of Agricultural Engineering Research* 67: 1-15.
 18. O'Connor, M., T. Bell, G. Elkaim, and B. Parkinson. 1996. Automatic steering of farm vehicles using GPS. Pages 767-778. *Proceedings of the 3rd international conference on precision agriculture*, Minneapolis, Minnesota, US.
 19. Reid, J. F., Q. Zhang, N. Noguchi, and M. Dickson. 2000. Agricultural automatic guidance research in North America. *Computers and Electronics in Agriculture* 25: 155-167.
 20. Rodríguez, M., and J. Gómez. 2009. Analysis of three different kalman filter implementations for agricultural vehicle positioning. *Open Agriculture* 3: 13-19.
 21. Ryu, J., E. J. Rossetter, and J. C. Gerdes. 2002. Vehicle side slip and roll parameter estimation using GPS. *Proceedings of AVEC 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, Hirishima, Japan.
 22. Stoll, A., and H. Dieter Kutzbach. 2000. Guidance of a forage harvester with GPS. *Precision Agriculture* 2: 281-291.
 23. Subramanian, V., T. F. Burks, and A. A. Arroyo. 2006. Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation. *Computers and Electronics in Agriculture* 53: 130-143.
 24. Thomas, B. 2000. Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS. *Computers and Electronics in Agriculture* 25: 53-66.
 25. Tillett, N. 1991. Automatic guidance sensors for agricultural field machines: a review. *Journal of Agricultural Engineering Research* 50: 167-187.
 26. Zhang, Q., J. F. Reid and N. Noguchi. 1999. Agricultural vehicle navigation using multiple guidance sensors. *Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics*: Pages 293-298. Pittsburgh, PA, USA.