

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱

نوع مقاله: پژوهشی

بهبود دقت موقعیت‌یابی در یک سامانه واقعیت افزوده سیار

سید محمد فاطمی

کارشناسی ارشد گروه مهندسی کامپیوتر - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - قزوین - ایران
پست الکترونیکی: fatemi.mamad@gmail.com

شکوه کرمانشاهانی*

استادیار گروه مهندسی کامپیوتر - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - قزوین - ایران
پست الکترونیکی: kermanshahani@eng.ikiu.ac.ir

حمیدرضا حمیدی

استادیار گروه مهندسی کامپیوتر - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - قزوین - ایران
پست الکترونیکی: hamidreza.hamidi@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

شرایط محیطی متفاوت دقت بالایی را داشته باشند. در این مقاله روشی ترکیبی جهت سنجش دقیق‌تر موقعیت مکانی ارائه شده است. این روش با توجه به میزان خطای هر کدام از موقعیت‌یاب‌ها و شرایط استفاده، ضرایبی را به آنها اختصاص می‌دهد و با گرفتن میانگین وزن‌دار آنها، موقعیت نهایی را به صورت طول و عرض جغرافیایی اعلام می‌کند. برای سنجش اعتبار این الگوریتم ترکیبی از دو موقعیت‌یاب جغرافیایی و پیمایش خودکار تلفن همراه استفاده شده است. پیمایش خودکار الگوریتمی است که از حسگرهای تلفن همراه برای موقعیت‌یابی شخص پیاده استفاده می‌کند و برای انواع سبک‌های حرکتی (سرعت تند، سرعت کند، قدم‌های کوتاه، قدم‌های بلند و ترکیبی از تمام این حرکات) آزمایش شده است. برای سنجش اعتبار الگوریتم ترکیبی تعداد ۳۰۰ آزمایش در مسافت‌های متفاوت و در شرایط مختلف انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی نسبت به استفاده تکی از الگوریتم‌های موقعیت‌یابی (در این آزمایش‌ها موقعیت‌یاب

امروزه نیاز به اطلاع دقیق از موقعیت مکانی ابزارها، اشخاص و نهادها به طرز قابل توجهی افزایش یافته است و کاربردهای بسیاری دارد که از آن جمله می‌توان به کاربرد آن در واقعیت افزوده اشاره کرد. فناوری واقعیت افزوده اطلاعات تکمیلی را به صحنه واقعی (مثل آنچه دوربین نمایش می‌دهد) اضافه می‌کند و نسبت اطلاعات به آنچه مشاهده می‌شود بر پایه سنجش موقعیت مکانی عناصر واقعی موجود در صحنه انجام می‌شود. هر چه سنجش موقعیت با دقت بیشتری انجام شود، کارایی واقعیت افزوده بیشتر می‌شود. الگوریتم‌های مختلفی برای موقعیت‌یابی ابداع شده‌اند که امروزه به صورت ابزار عمومی در دسترس کاربران هستند مانند سامانه موقعیت‌یاب جغرافیایی (جی‌پی‌اس)، پیمایش خودکار، شبکه سلولی تلفن همراه و یا ارتباطات بی‌سیم مانند وای‌فای. دقت الگوریتم‌های موقعیت‌یابی بسیار به شرایط محیط مورد استفاده، وابسته است. هیچ کدام از این الگوریتم‌ها نمی‌توانند در همه جا و با

* نویسنده مسئول

به ابزار و زیرساخت گران قیمت نیست، موقعیت‌یابی‌های ماهواره‌ای، موقعیت‌یابی با استفاده از شبکه‌های تلفن همراه، موقعیت‌یابی با استفاده از امواج وای‌فای و موقعیت‌یابی با استفاده از حسگرهای حرکتی تلفن همراه هستند [۲]. برخی از نرم‌افزارها نیز از نشانه‌ها و برچسب‌های مخصوص برای رسیدن به مقاصد خود استفاده می‌کنند [۳]. اما یکی از مشکلاتی که در این نرم‌افزارها وجود دارد، دقت پایین الگوریتم موقعیت‌یابی است که در آن تعبیه شده است [۳]. بخصوص برای نرم‌افزارهایی که قرار است موقعیت مکان‌های مختلف را با فاصله بسیار کمی از یکدیگر نشان دهد. در صورتی که اگر محاسبه موقعیت برای آنها با دقت مطلوبی محاسبه نشود، عملاً نرم‌افزار غیر قابل استفاده خواهد بود. در ادامه ویژگی‌های چند سامانه عمومی موقعیت‌یابی را مرور می‌کنیم تا عوامل موثر در دقت آنها را بشناسیم.

۱.۱. سامانه موقعیت‌یاب جغرافیایی

سامانه موقعیت‌یاب جغرافیایی^۲ متشکل از مجموعه‌ای ماهواره‌ای است که هر ماهواره به طور مداوم سیگنال‌های رادیویی را پخش می‌کند که این سیگنال‌ها معرفی کننده هر ماهواره هستند. باران، مه، برف، و شرایط جوی گوناگون، هیچ کدام اثری بر روی این امواج ندارند [۲]. برای این که بتوان موقعیت دو بعدی گیرنده را محاسبه کرد نیاز به شناسایی و تعیین فاصله حداقل سه ماهواره است. همچنین برای این که بتوان موقعیت سه بعدی گیرنده را محاسبه کرد حداقل باید فاصله چهار ماهواره اندازه‌گیری شود [۲]. خطاهای گوناگونی ممکن است به وجود بیاید تا اندازه‌گیری دقیق موقعیت مکانی گیرنده‌ها را در موقعیت‌یاب جغرافیایی با مشکل مواجه کند. این خطاها عبارت‌اند از: انحراف مدارهای ماهواره‌ای، خطای ساعت‌ها، موانع محیطی مانند ساختمان‌ها، جنگل‌ها و خطاهای دستگاه‌های گیرنده.

۲.۱. شبکه سلولی تلفن همراه

شبکه‌های تلفن‌های همراه به طور اساسی بر پایه

جغرافیایی و پیمایش خودکار) نتایج با دقت بیشتری داشته و به عنوان نمونه توانسته است درصد خطای الگوریتم موقعیت‌یاب جغرافیایی را در شرایط محیطی نامناسب، کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: واقعیت افزوده، موقعیت‌یابی جغرافیایی، پیمایش خودکار، موقعیت‌یابی شبکه تلفن همراه، موقعیت‌یابی وای‌فای.

مقدمه

فناوری‌هایی که بر پایه واقعیت مجازی^۱ ایجاد شده‌اند، کاربران را به طور کامل وارد محیط ساختگی می‌کنند و تا هنگامی که کاربر در آن محیط قرار دارد نمی‌تواند محیط واقعی پیرامون خود را ببیند [۱]. برخلاف آن، واقعیت افزوده^۲ به کاربران اجازه می‌دهد تا بتوانند علاوه بر اشیاء مجازی دنیای واقعی را نیز تماشا کنند. بنابراین واقعیت افزوده محیط ساختگی را به طور کامل جایگزین محیط واقعی نمی‌کند. اشیاء مجازی اطلاعاتی را در اختیار کاربر قرار می‌دهند که کاربر به تنهایی قادر به کشف آنها با حواس خود نیست. این اطلاعات توسط اشیاء مجازی به کاربر انتقال داده می‌شوند و به او در انجام کارهای دنیای واقعی کمک می‌کنند [۱].

از موقعیت‌یاب‌ها در نرم‌افزارهای واقعیت افزوده استفاده‌های فراوان و گوناگونی شده است. به عنوان مثال اشخاص با استفاده از دوربین تلفن‌های همراه خود و مشاهده محیط واقعی از طریق نمایشگر تلفن، می‌توانند اطلاعات مختلف ساختمان‌ها را مشاهده کنند. همچنین در سازمان‌ها و معابر بزرگ می‌توانند به دنبال مکان موردنظر خود باشند و با حرکت کردن و جهت دادن به دستگاه تلفن همراه، موقعیت مکان‌های دلخواه خود را به صورت برچسب‌هایی بر روی نمایشگر خود مشاهده کنند [۱].

مهم ترین الگوریتم‌هایی که با استفاده از آنها می‌توان فرایند موقعیت‌یابی را انجام داد و برای استفاده از آنها نیاز

1- Virtual Reality

2- Augmented Reality

3- Global Positioning System (GPS).

محیط‌های خارج از ساختمان‌ها بسیار مناسب هستند، اما استفاده از این سامانه‌ها در داخل ساختمان‌ها با مشکلاتی مواجه است. موقعیت‌یابی با استفاده از وای‌فای هم برای داخل ساختمان و هم خارج ساختمان می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. موقعیت‌یابی داخل ساختمان‌ها با استفاده از وای‌فای بسیار دقیق تر از موقعیت‌یابی با شبکه‌های تلفن همراه است [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳].

۴.۱. سامانه‌های پیمایش خودکار

سامانه پیمایش خودکار^۷، سامانه‌ای است که موقعیت تخمینی، سرعت و جهت چرخش را از هر واحد اندازه‌گیری خودکار فراهم می‌کند. هر واحد اندازه‌گیری خودکار شامل سه شتاب سنج، سه جهت نما و مغناطیس سنج است. با این وجود اگر موقعیت شروع حرکت شخص و همچنین جهت حرکت مشخص باشد، جهت‌گیری و سرعت حرکت فرد و در نتیجه موقعیت لحظه‌ای کاربر به راحتی با استفاده از روش پیمایش کور قابل محاسبه است. این روش نیازی به منبع موقعیت‌یابی خارجی نخواهد داشت [۳، ۱۴]. هنگام استفاده از روش پیمایش کور بر پایه سامانه‌های پیمایش خودکار، سامانه ردیابی به طور مداوم تغییرات را شناسایی می‌کند و موقعیت قبلی را با اطلاعات جدید بدست آمده بروز رسانی می‌کند. به دلیل این که روش پیمایش کور فقط حساس به تغییرات است، سامانه پیمایش خودکار فقط می‌تواند موقعیت و جهت تقریبی حرکت را اندازه‌گیری کند. بنابراین این روش موقعیت‌یابی به شدت وابسته به کیفیت اطلاعات اولیه شامل نقطه و جهت شروع حرکت است. اگر مکان یا جهت‌های مطلق، توسط منبع حسگر دیگری با سرعت بالا بهنگام شود، سامانه پیمایش خودکار می‌تواند موقعیت‌یابی را با دقت بسیار بالاتر ارائه دهد [۳]. در سامانه‌های پیمایش خودکار با طی شدن مسافت، به مرور انحراف‌ها و اشتباهاتی به وجود می‌آید. درصد این انحراف‌ها در طول مسیر بین یک درصد کل مسیر تا بیست درصد آن متغیر است. برای کاهش میزان انحراف

تقسیم کردن مناطق به سلول‌های متفاوت عمل می‌کنند. هر کدام از این سلول‌ها نیز دارای یک ایستگاه برای مدیریت سیگنال‌های تلفن همراه است. با حرکت کردن کاربران، دستگاه تلفن همراه به ایستگاهی (سلولی) که قدرت امواج قوی‌تری دارد، متصل می‌شود. به طور عمومی ایستگاهی که کمترین فاصله را با دستگاه تلفن همراه داشته باشد، به عنوان خدمت‌دهنده انتخاب می‌شود [۴، ۵]. با مشخص بودن موقعیت ارسال‌کننده‌های امواج و همچنین یافتن سلولی که شخص در آن قرار دارد به راحتی می‌توان موقعیت شخص را محاسبه کرد. این روش موقعیت‌یابی، ساده‌ترین روش موقعیت‌یابی با استفاده از شبکه‌های تلفن‌های همراه است و با نام «سل‌آی‌دی» شناخته می‌شود. هرچه اندازه سلول‌ها بزرگ‌تر باشد دقت اندازه‌گیری موقعیت با این روش کمتر خواهد بود. دقت اندازه‌گیری با این روش برای شبکه‌های نسل ۲ و ۳ تلفن همراه تا سی و پنج کیلومتر است. موقعیت‌یابی با استفاده از این روش را می‌توان با اضافه کردن آنتن‌های ارسال امواج بهبود بخشید [۶]. عموماً دقت موقعیت‌یابی با استفاده از شبکه‌های تلفن‌های همراه، بسیار کمتر از دقت موقعیت‌یابی با استفاده از موقعیت‌یاب جغرافیایی است [۲].

۳.۱. موقعیت‌یابی با استفاده از وای‌فای

امروزه موقعیت‌یابی با استفاده از وای‌فای^۴ مورد توجه محققان بسیار زیادی بوده است [۷]. محققان، الگوریتم‌ها و روش‌های متعددی را برای موقعیت‌یابی معرفی کرده‌اند. موقعیت‌یابی با استفاده از امواج وای‌فای نیز همانند شبکه‌های تلفن همراه دو شیوه کلی دارند. اولین روش که مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است، روش محاسبه^۵ قدرت سیگنال‌ها است. دومین روش نیز ناوبری هذلولی^۶ نام دارد. روش دوم از تفاوت زمانی دو سیگنال موقعیت‌یابی را انجام می‌دهد [۸، ۹].

موقعیت‌یابی‌هایی مانند موقعیت‌یاب جغرافیایی برای

4- Cell ID.

5- Wi-Fi positioning.

6- Multilateration.

7- Inertial Navigation System (INS).

شرایط محیطی تغییر می‌کند. به عنوان مثال موقعیت‌یابی با استفاده از ماهواره‌های موقعیت‌یاب جغرافیایی در داخل ساختمان‌ها عملکرد خوبی ندارد، بنابراین در داخل ساختمان‌ها باید ضریب موقعیت‌یاب جغرافیایی به حداقل برسد. به طور کلی مدل ریاضی پیشنهادی مبتنی بر ۴ الگوریتم عمده همانند فرمول ۱ است.

$$(۱) \\ Loc(Hybrid) = \alpha \times Loc(GPS) + \beta \times Loc(INS) + \gamma \times Loc(Cellular Network) + \delta \times Loc(WiFi)$$

به ترتیب ضرایب $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ تاثیر موقعیت‌یاب جغرافیایی، سامانه‌های پیمایش خودکار، شبکه تلفن‌های همراه و وای‌فای هستند و شرایط $\alpha, \beta, \gamma, \delta \geq 0, \alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$ برقرار است. موقعیت سنجیده شده از هر الگوریتم توسط تابع مربوطه (LOC) مدل شده است. در سامانه ترکیبی با توجه به شرایط محیطی، تشخیص داده می‌شود که ضریب هر الگوریتم موقعیت‌یاب باید به چه میزان در نظر گرفته شود. تعیین این ضرایب ممکن است به صورت خودکار و با توجه به داده دریافتی از حسگرها قابل محاسبه باشد و یا ممکن است به صورت داده قابل تنظیم توسط کاربر باشد. به عنوان مثال دقت موقعیت‌یاب جغرافیایی در شرایط ابری، غیر ابری، داخل ساختمان، خارج ساختمان و جنگل‌ها با یکدیگر متفاوت است. بنابراین در هر شرایط و محیط‌هایی باید ضریب تاثیر موقعیت‌یاب جغرافیایی بسته به میزان دقت آن اختصاص داده شود.

دسترسی به همه فناوری‌ها ممکن است در بعضی شرایط ممکن نباشد. اما سامانه پیمایش خودکار به زیرساخت‌های خاصی نیاز ندارد و امروزه در اکثر گوشی‌های تلفن‌های هوشمند حسگرهای مورد نیاز برای این سامانه وجود دارد، بنابراین در تمامی شرایط محیطی قابل استفاده است. برای تشریح روش محاسبه الگوریتم پیشنهادی هشت حالت مختلف در نظر گرفته شد که در جدول ۲ نمایش داده شده است. سامانه پیمایش خودکار

حسگرهای مکمل می‌توانند بسیار کمک کننده باشند [۳]. [۱۵]

۵.۱. مقایسه موقعیت‌یاب‌ها

جدول ۱ مقایسه دقت بین موقعیت‌یاب جغرافیایی، شبکه سلولی تلفن همراه، موقعیت‌یاب‌های وای‌فای و سامانه پیمایش خودکار را برای مکان‌هایی که پوشش سققی و دیوار ندارند (به عنوان مثال شامل داخل ساختمان‌ها و جنگل‌ها نمی‌باشد) نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقایسه دقت روش‌های مختلف موقعیت‌یابی [۲].

روش موقعیت‌یابی	مناطق تحت پوشش	خطا
موقعیت‌یاب جغرافیایی	سراسری	تا ۱۰ متر
شبکه سلولی تلفن همراه	۱۰۰ متر تا چند کیلومتر	تا چند کیلو متر
موقعیت‌یاب‌های وای‌فای	۲۰-۵۰ متر	۱/۵ متر
سامانه پیمایش خودکار	تا چند صد متر	۲۰٪ مسیر طی شده

برای محیط‌های داخل ساختمان معمولاً روش‌های موقعیت‌یابی با استفاده از شبکه‌های سلولی و موقعیت‌یاب ماهواره‌ای چندان مناسب نیستند. و برای این نوع از مکان‌ها می‌توان از موقعیت‌یابی با استفاده از وای‌فای و سامانه‌های پیمایش خودکار بهره برد.

هر کدام از موقعیت‌یاب‌ها بسته به الگوریتم پیاده سازی آن، دارای خطاهایی هستند. در ادامه به شرح روش پیشنهادی می‌پردازیم و سپس دقت آن را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

۲. الگوریتم ترکیبی موقعیت‌یابی

پس از بررسی موقعیت‌یاب‌های مختلف و بررسی عوامل موثر در خطای آنها، یک روشی ریاضی برای محاسبه دقیق‌تر موقعیت مبتنی بر ترکیب اطلاعات موقعیت‌یاب‌های مختلف پیشنهاد می‌کنیم. به هر کدام از موقعیت‌یاب‌ها ضریب تاثیری اختصاص داده شده که نشان‌دهنده میزان دقت آنها در شرایط خاص است. این ضرایب با توجه به

توسط سامانه پیمایش خودکار محاسبه شود و برحسب آن خطایش به صورت دقیق محاسبه شود. در نهایت با تشخیص این که سامانه ترکیبی در چه حالتی هست از جدول ۲ و همچنین محاسبه مسئله ریاضی در شرایط مربوطه (به روشی که در ادامه توضیح می‌دهیم)، می‌شود ضریب مربوط به هر موقعیت‌یاب را مشخص کرد.

جدول ۳: متوسط خطای موقعیت‌یاب‌ها [۳].

میزان خطا	موقعیت‌یاب جغرافیایی	وای‌فای	شبکه تلفن همراه	پیمایش خودکار
۱۵ درصد مسافت طی شده	۱۰ متر	۳ متر	۲ متر	

۱.۲. نحوه به دست آوردن ضریب تاثیر موقعیت‌یاب‌ها

برای درک بهتر روش محاسباتی در نظر گرفته شده، دو نمونه را فرمول‌بندی کرده و نحوه حل آن را توضیح می‌دهیم. به عنوان اولین مثال، فرض می‌کنیم، فقط دسترسی به موقعیت‌یاب جغرافیایی و سامانه پیمایش خودکار امکان‌پذیر است. همچنین فاصله طی شده را نیز ۵ متر در نظر می‌گیریم به عبارت دیگر در حالت اول از جدول ۲ قرار داشته باشیم. در این حالت متغیرهای مسئله فقط α, β هستند. برای نوشتن مدل ریاضی از خاصیت تناسب به شکل فرمول ۲ استفاده می‌کنیم:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{GPS\ Error}{INS\ Error} = X, \alpha + \beta = 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \quad (2)$$

برای یافتن α, β ، دستگاه خطی به شکل فرمول ۳ را حل کردیم که به طور خودکار دارای جواب‌های مثبت بود. مقدار X یا نسبت خطای موقعیت‌یاب جغرافیایی به پیمایش خودکار را از جدول ۳ به دست می‌آوریم.

$$\begin{bmatrix} -1 & X \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

مثال دیگری را برای حالت سه متغیره بررسی می‌کنیم. فرض کنید در حالت ۵ از جدول ۳-۱ قرار داریم. به عبارت دیگر به موقعیت‌یاب جغرافیایی، وای‌فای و سامانه پیمایش خودکار دسترسی داریم. همچنین فاصله طی شده را نیز ۵ متر در نظر می‌گیریم. بنابراین متغیرهای مسئله α, β, δ

همیشه در دسترس است و دیگر الگوریتم‌ها به صورت ترکیب تکی، دوتایی و یا سه تایی مدنظر قرار گرفته‌اند.

جدول ۲: حالت‌های فرضی دسترسی به موقعیت‌یاب‌ها.

حالت	موقعیت‌یاب جغرافیایی	وای‌فای	شبکه تلفن همراه	پیمایش خودکار
حالت اول	✓	-	-	✓
حالت دوم	-	✓	-	✓
حالت سوم	-	-	✓	✓
حالت چهارم	-	-	-	✓
حالت پنجم	✓	✓	-	✓
حالت ششم	✓	-	✓	✓
حالت هفتم	-	✓	✓	✓
حالت هشتم	✓	✓	✓	✓

با توجه به شرایط دسترسی به هرکدام از موقعیت‌یاب‌ها در هر لحظه، سامانه تصمیم می‌گیرد که در کدام حالت قرار دارد و با توجه به آن، ضرایب فرمول ۱ محاسبه می‌شود. برای تشخیص این که در کدام حالت از جدول ۲ قرار داریم، کفایت وجود و یا عدم وجود سیگنال‌های دریافتی را بررسی کنیم. در صورتی که سیگنالی دریافت نشد به معنی عدم دسترسی به موقعیت‌یاب مربوطه تلقی می‌شود. همین‌طور اگر قدرت سیگنال‌های دریافتی از فرستنده‌های موقعیت‌یاب‌ها مطلوب نباشند از آنها صرف نظر می‌کنیم. مهم‌ترین ویژگی جهت تعیین ضرایب موقعیت‌یاب‌ها در فرمول ۱ دقت موقعیت‌یاب مربوطه است. به این صورت که بسته به شرایط محیطی هرچه دقت موقعیت‌یاب بالاتر باشد باید ضریب بالاتری به آن اختصاص داده شود. به عنوان نمونه جدول ۲ میزان متوسط خطای موقعیت‌یاب‌ها را گزارش کرده است.

با توجه به این که خطای سامانه پیمایش خودکار به صورت ثابت در نظر گرفته نشده است، در هر زمانی که نیاز به موقعیت‌یابی داشته باشیم، کفایت ابتدا میزان حرکت طی شده توسط شخص در فاصله زمانی مشخص،

مختلف خطایشان کمتر از سامانه پیمایش خودکار نیست، بنابراین بالاترین ضریب به سامانه پیمایش خودکار اختصاص داده شده است. البته هر چه مسافت طی شده توسط شخص بیشتر شود، ضریب اختصاص داده شده برای سامانه پیمایش خودکار کاهش می‌یابد.

۲.۲. روند اجرای الگوریتم ترکیبی

روش کار الگوریتم ترکیبی پیشنهادی را می‌توان در چند مرحله مورد بررسی قرار داد. در مرحله اول باید موقعیت‌یاب‌های شرکت‌کننده معین شوند و پس از این که هر کدام از موقعیت‌یاب‌ها سنجش موقعیت را انجام دادند همه داده خروجی آن‌ها به یک مختصات تبدیل می‌شود و با توجه به شرایط محیطی خطای هر کدام از آنها مشخص می‌شود. در نهایت ضرایب اختصاص داده می‌شود و خروجی به صورت طول و عرض جغرافیایی ارائه می‌گردد. به طور کلی روند اجرای الگوریتم در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳. سنجش عملی روش ترکیبی موقعیت‌یابی

روش ترکیبی موقعیت‌یابی پیشنهادی برای ترکیب همه فناوری‌های موقعیت‌یابی طرح شده است. اما جهت سنجش عملی اعتبار این روش تنها از دو فناوری موقعیت‌یابی در دسترس استفاده شده است. فناوری‌های انتخاب شده، سامانه پیمایش خودکار و موقعیت‌یاب جغرافیایی هستند. روش کار به این صورت است که ابتدا مسافت طی شده توسط سامانه پیمایش خودکار محاسبه می‌شود. پس از آن، این مسافت ابتدا به طول و عرض جغرافیایی تبدیل شده و به نقطه اولیه (در سامانه پیشنهادی ما نقطه اولیه از موقعیت‌یاب جغرافیایی گرفته می‌شود) اضافه می‌شود. در نهایت طول و عرض جغرافیایی به دست آمده از سامانه پیمایش خودکار در ضریب تاثیرش ضرب شده و با حاصلضرب اطلاعات موقعیت‌یاب جغرافیایی در ضریب تاثیرش، جمع می‌شود. به این صورت سامانه ترکیبی، مختصات نهایی شخص را اعلام می‌کند.

می‌باشند. معادلات این وضعیت مطابق فرمول ۴ هستند:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{\beta} &= \frac{GPS\ Error}{INS\ Error} = X_1 \\ \frac{\alpha}{\delta} &= \frac{WIFI\ Error}{INS\ Error} = X_2 \\ \frac{\beta}{\delta} &= \frac{WIFI\ Error}{GPS\ Error} = X_3 \\ \alpha + \beta + \delta &= 1, \alpha \geq 0, \delta \geq 0, \beta \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

مقادیر X_1, X_2, X_3 یا نسبت خطای موقعیت‌یاب‌های مختلف را از جدول ۳ به دست می‌آوریم. و در ادامه دستگاه خطی به شکل فرمول ۵ را حل کردیم که به طور خودکار دارای جواب‌های مثبت بود.

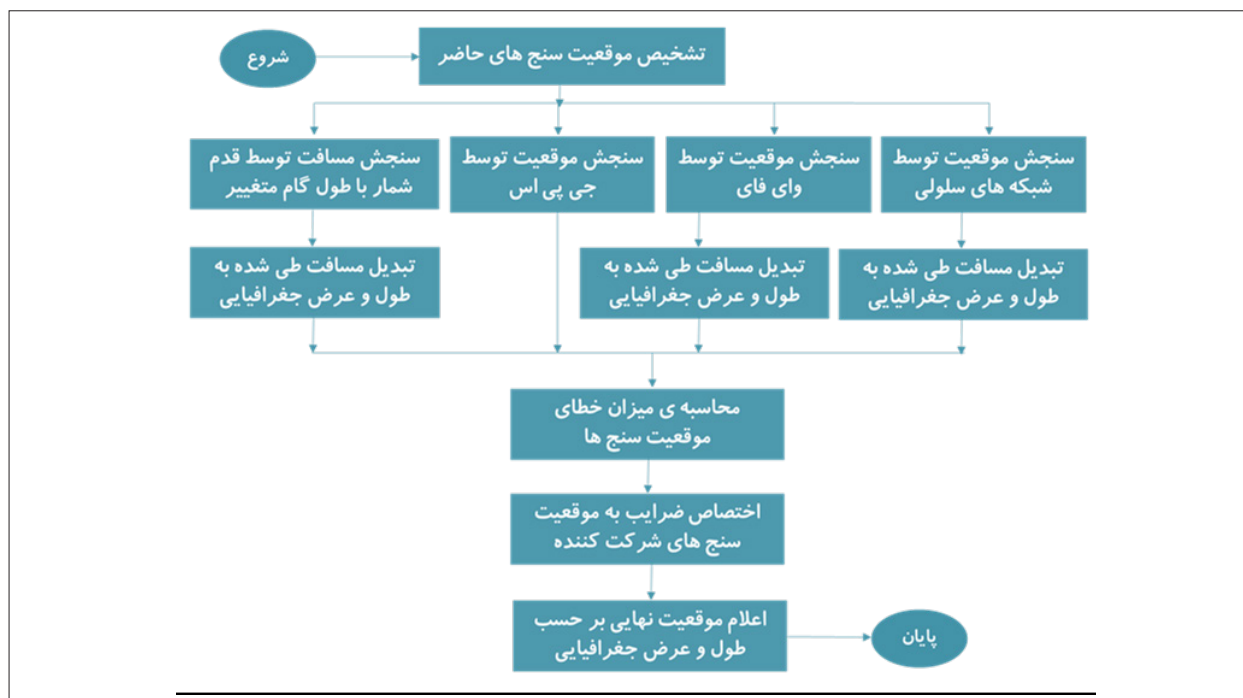
$$\begin{bmatrix} -1 & X_1 & 0 \\ -1 & 0 & X_2 \\ 0 & -1 & X_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

به همین شیوه تمامی معادله‌های موجود را حل می‌کنیم و ضرایب هر کدام از این معادلات را به دست می‌آوریم. نتایج این محاسبات برای مسافت ۵ متر در جدول ۴ قابل مشاهده است.

جدول ۴: ضرایب به دست آمده برای مدل ریاضی طرح پیشنهادی برای مسافت ۵ متر.

شرایط	α	β	γ	δ
حالت اول	۰,۹۳۰۲	۰,۰۶۹۸	۰	۰
حالت دوم	۰,۷۲۷۲	۰	۰	۰,۲۷۲۷
حالت سوم	۰,۸	۰	۰,۲	۰
حالت چهارم	۱	۰	۰	۰
حالت پنجم	۰,۶۸۹۷	۰,۰۵۱۷	۰	۰,۲۵۸۶
حالت ششم	۰,۷۵۴۷	۰,۰۵۶۶	۰,۱۸۸۷	۰
حالت هفتم	۰,۶۱۵۴	۰	۰,۱۵۳۸	۰,۲۳۰۸
حالت هشتم	۰,۶۰۲۴	۰,۰۴۷۹	۰,۱۳۵۴	۰,۲۱۴۳

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، در حالت اول به دلیل این که اختلاف خطای موقعیت‌یاب جغرافیایی و سامانه پیمایش خودکار بسیار زیاد است، بنابراین با اطمینان بسیار زیادی می‌توان از اطلاعات به دست آمده توسط سامانه پیمایش خودکار استفاده کرد. همچنین با توجه به این که در هیچ کدام از حالت‌ها، موقعیت‌یاب‌های



شکل ۱: روند عملکرد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی.

آزمایش می‌رسد، برای هر مسافت حدود ۶۰ آزمایش با شرایط محیطی متفاوت، زاویه و یا سرعت مختلف حرکت انجام شده است.

در ادامه ابتدا نتایج حاصل از آزمایش‌ها در مسافت ۱۵ متر را ارایه می‌کنیم و در انتها جمع‌بندی همه آزمایش‌ها را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

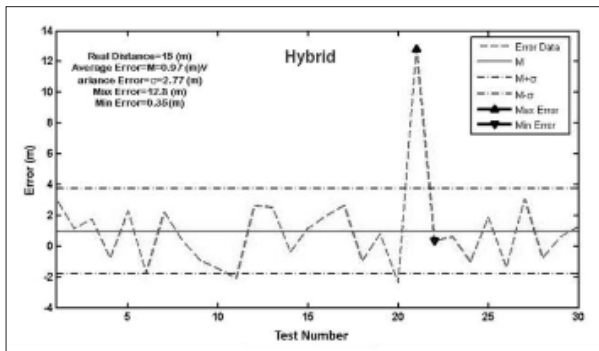
۱.۳. نتایج آزمایش در مسافت ۱۵ متر

به دلیل این که سامانه موقعیت‌یاب جغرافیایی در شرایط ابری دارای خطاهای بیشتری در محاسبات است، سامانه ترکیبی پیشنهادی را در مسافت پانزده متر برای دو وضعیت جوی مورد آزمایش قرار دادیم. در مرحله اول آزمایش‌ها شرایط جوی نیمه ابری و تمام ابری است و برای مجموعه دوم آزمایش‌ها شرایط جوی بدون ابر در نظر گرفته شده است.

شکل ۲ نتایج آزمایش‌های مدل ترکیبی برای مسافت ۱۵ متر است، که در محیطی بدون سقف و درخت و شرایط جوی نیمه ابری و تمام ابری به انجام رسیده است. اعداد روی محور افقی نشان‌دهنده شماره‌های آزمایش‌های

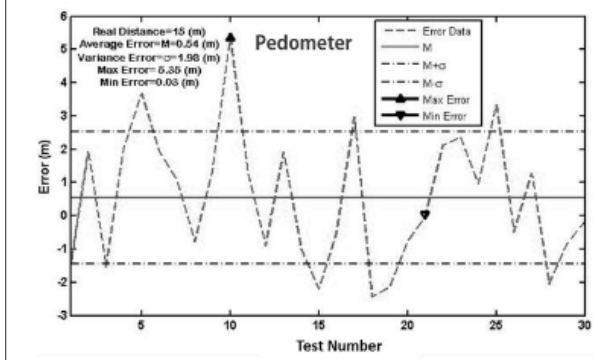
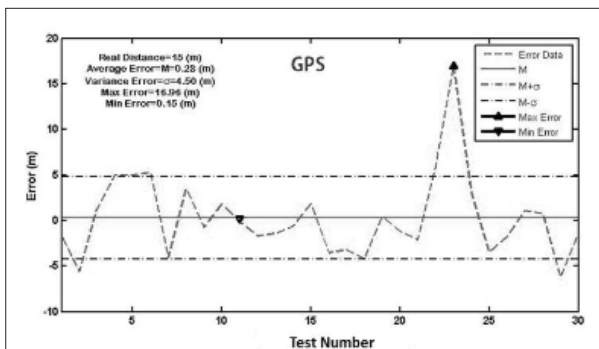
برای این که بتوانیم مقیاسی برای سنجش الگوریتم نهایی داشته باشیم. آزمایش‌هایی را در مترهای مختلف ۷ متر، ۱۵ متر، ۲۵ متر، ۳۰ متر و ۵۰ متر انجام دادیم. آزمایش‌هایی که انجام داده‌ایم در فضای باز و در برخی مواقع هوای نیمه ابری انجام شده‌اند. در تمامی آزمایش‌ها خطای موقعیت‌یاب جغرافیایی را پنج متر در نظر گرفتیم و همچنین خطای سامانه پیمایش خودکار را ۱۵ درصد مسیر طی شده در نظر گرفتیم. به عنوان مثال اگر سامانه مسافت طی شده را ۱۰ متر محاسبه کند، خطای سامانه پیمایش خودکار برابر با یک و نیم متر در نظر گرفته‌ایم. تمامی آزمایش‌ها در مسیری مستقیم انجام گرفته‌اند. سامانه ابتدا موقعیت اولیه شخص را به همراه زاویه‌ای که شخص نسبت به قطب شمال دارد به دست می‌آورد. پس از اتمام مسیر و دقیقاً در لحظه‌ای که سامانه تشخیص داد شخص متوقف شده است، موقعیت نهایی شخص اعلام می‌گردد. به دلیل این که نتایج آزمایش‌ها قابل درک باشند، مسافت بین نقطه اولیه و نقطه پایانی را به متر تبدیل کرده‌ایم و دقت الگوریتم را بر حسب آن محاسبه می‌کنیم. تعداد آزمایش‌ها در مسافت‌های مختلف به ۳۰۰

همچنین همانطور که مشاهده می‌شود خطای ۴۰ متری موقعیت‌یاب جغرافیایی به حدود ۱۲ متر در سامانه ترکیبی تبدیل شده است.



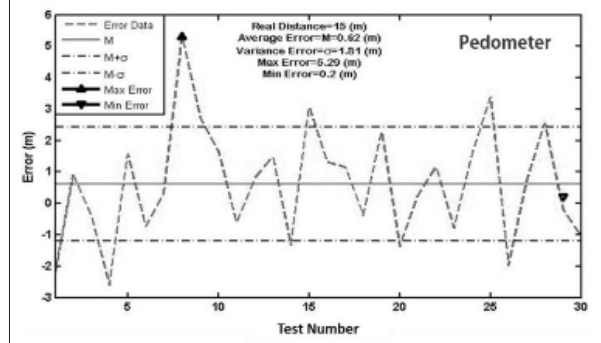
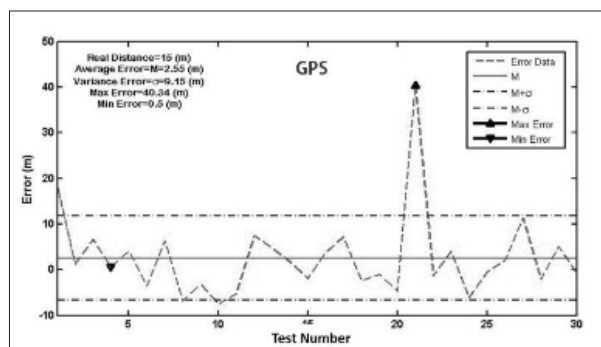
شکل ۳: نتایج سامانه ترکیبی برای مسافت ۱۵ متر و شرایط ابری

شکل ۴ نتایج آزمایش‌های پیمایش خودکار و موقعیت‌یاب جغرافیایی را برای مسافت ۱۵ متر و شرایط جوی بدون ابر و فضای آزاد و بدون درخت و سقف نشان می‌دهد.



شکل ۴: نتایج برای مسافت ۱۵ متر و شرایط بدون ابر. (بالا) موقعیت‌یاب جغرافیایی (پایین) پیمایش خودکار

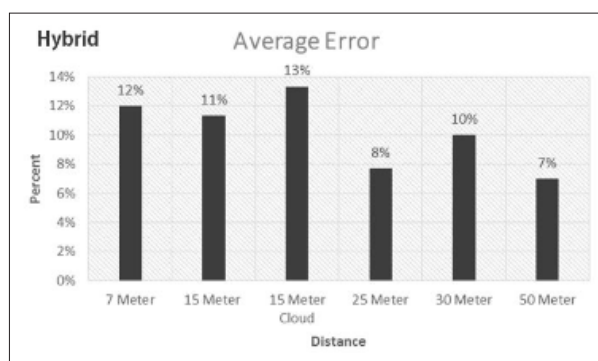
انجام گرفته است و اعداد روی محور عمودی خطای هر آزمایش بر حسب متر است. در این نمودارها واریانس خطا، حداقل و حداکثر خطا و همچنین میانگین خطا نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۲ سمت راست مشاهده می‌شود خطای موقعیت‌یاب جغرافیایی به ۴۰ متر نیز در این شرایط جوی می‌رسد و این امر نشان می‌دهد در چنین آب و هوایی باید ضریب موقعیت‌یاب جغرافیایی در مدل پیشنهادی کمتر شود. با تشخیص چنین امری توسط الگوریتم ترکیبی، خطای موقعیت‌یاب جغرافیایی از حالت نرمال به حالت ابری تبدیل می‌شود و خطای آن را از ۵ متر به ۱۰ متر افزایش داده و در محاسبات شرکت می‌دهیم.



شکل ۲: نتایج برای مسافت ۱۵ متر و شرایط ابری. (بالا) موقعیت‌یاب جغرافیایی (پایین) پیمایش خودکار

اما شکل ۳ جزئیات نتایج سامانه ترکیبی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود خطاهای چند ده متری موقعیت‌یاب جغرافیایی به حد قابل توجهی بهبود یافته است و به خطاهای بسیار کوچک تبدیل شده است و واریانس خطا از حدود ۹ متر در موقعیت‌یاب جغرافیایی به ۲/۵ متر در سامانه ترکیبی کاهش یافته است.

متوسط خطای سامانه پیمایش خودکار در اکثر مسافت‌ها حدوداً ۱۰ درصد کل مسیر طی شده است. اما متوسط خطای موقعیت‌یاب جغرافیایی بسیار متغیر است و شرایط ثابت و یکسانی در بیان موقعیت وجود ندارد. اعداد روی محور افقی بیانگر مسافت‌های مختلف است که برای هر مسیر تعداد ۳۰ آزمایش مختلف به انجام رسیده است. همچنین اعداد روی ستون نشان‌دهنده درصد خطای است. هم‌چنین اعداد روی ستون نشان‌دهنده درصد خطای اما شکل ۷ متوسط درصد خطای سامانه ترکیبی را نمایش می‌دهد. خطای سامانه ترکیبی نوسانات بسیار کمی دارد و دقت قابل قبولی را نیز از خود به نمایش گذاشته است.

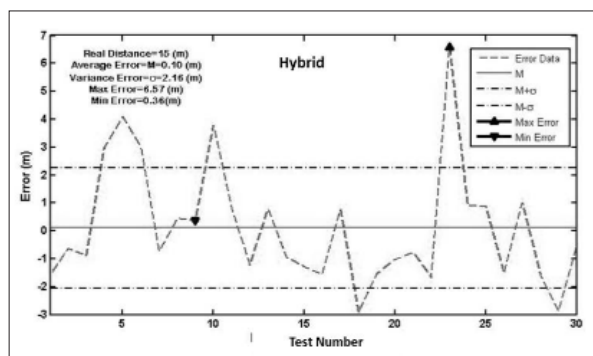


شکل ۷: متوسط خطای سامانه ترکیبی

با توجه به نتایج به دست آمده از سامانه ترکیبی پیشنهادی مشاهده شد که درصد اطمینان‌پذیری به الگوریتم پیشنهادی به حد بسیار زیادی بالاتر از هر کدام از سامانه‌های موقعیت‌یابی است. همچنین در بسیاری از حالات دقت موقعیت‌یابی همه سامانه‌های ترکیب شده از سامانه ترکیبی کمتر است.

به طور کلی اگر تعداد سامانه‌های موقعیت‌یابی که در محاسبات مدل ترکیبی ما وجود خواهند داشت بیشتر باشد، پیش‌بینی می‌شود که دقت نهایی موقعیت‌یاب بهبود بسیار زیادی داشته باشد. به این دلیل که درصد حالاتی که هر کدام از سامانه‌ها خطاهای زیادی داشته باشند، به حد قابل توجهی تصحیح می‌شوند. در آزمایش‌هایی که انجام دادیم

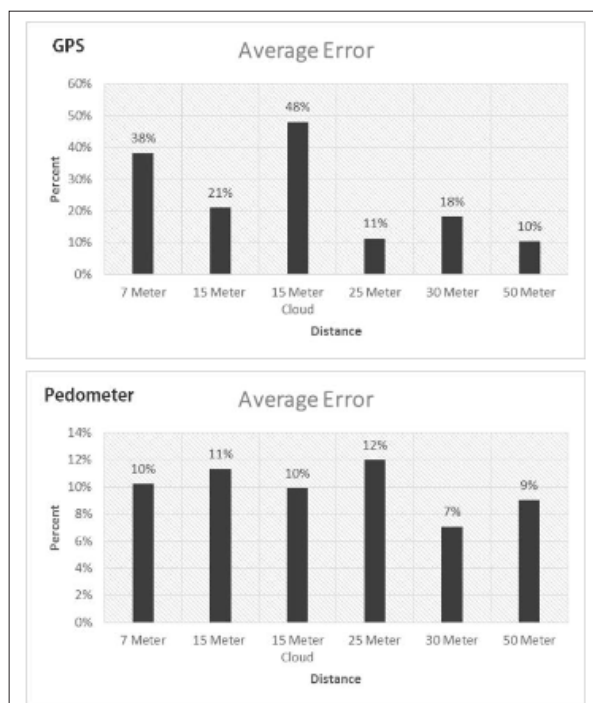
شکل ۵ جزئیات نتایج سامانه ترکیبی را برای مسافت ۱۵ متر و شرایط بدون ابر و سقف نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود خطای ۱۷ متری موقعیت‌یاب جغرافیایی به حدود ۶ متر در سامانه ترکیبی کاهش یافته است.



شکل ۵: نتایج سامانه ترکیبی برای مسافت ۱۵ متر و شرایط بدون ابر

۲.۳. مقایسه متوسط خطای روش‌های موقعیت‌یابی

شکل ۶ متوسط درصد خطای هر کدام از روش‌های موقعیت‌یابی را برای مسافت‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۶: (بالا) متوسط خطای موقعیت‌یاب جغرافیایی (پایین) متوسط خطای پیمایش خودکار

داشت که تشخیص این که در چه شرایط محیطی هستیم و چه موقعیت‌یاب‌هایی قابل استفاده هستند را به صورت خودکار انجام داد.

۴. نتیجه‌گیری

موضوع اصلی این مقاله افزایش دقت موقعیت‌یابی با ارائه روشی برای ترکیب موقعیت‌یاب‌های موجود است. الگوریتم ترکیبی، از مدلی ریاضی برای بالا بردن دقت موقعیت‌یابی ترکیبی استفاده کرده است. به این صورت که با توجه به میزان خطای هر یک از موقعیت‌یاب‌های قابل دسترس و بسته به شرایط محیطی (داخل یا خارج ساختمان، شرایط جوی) ضریب تأثیری به هر یک اختصاص می‌دهد. در نهایت با گرفتن میانگین وزن‌دار آنها موقعیت نهایی شخص را بر حسب طول و عرض جغرافیایی اعلام می‌کند.

برای سنجش دقت الگوریتم ترکیبی از دو موقعیت‌یاب موقعیت‌یاب جغرافیایی و موقعیت‌یابی با استفاده از حسگرهای تلفن همراه، استفاده شده است. اولین نتیجه این است که به اطلاعات روش ترکیبی با درصد بسیار بالاتری نسبت به هر کدام از موقعیت‌یاب‌ها در هر شرایط جوی و یا محیطی، می‌توان اطمینان کرد. دومین نتیجه تصحیح کردن خطاهای بسیار زیاد هر کدام از موقعیت‌یاب‌ها است. به عنوان مثال هر دو سامانه در بعضی شرایط دارای خطاهایی در حدود ده متر هستند و بعد از ترکیب، این خطاها به حد چند سانتی‌متر و به حدود یک متر نیز تبدیل شده است.

برآورد می‌کنیم با افزایش تعداد موقعیت‌یاب‌های شرکت‌کننده در روش ترکیبی عملکرد آن بهبود یابد، که این موضوع می‌تواند در تحقیقات آتی مورد توجه قرار گیرد. در حال حاضر خطای هر موقعیت‌یاب به صورت کلی محاسبه می‌شود و با توجه به شرایط محیطی خطای موقعیت‌یاب در کل آزمایش یکسان فرض می‌شود. پیش‌بینی می‌شود که اگر خطای هر موقعیت‌سنج در هر

با وجود این که تنها دو سامانه موقعیت‌یابی ترکیب شده بودند اما در بسیاری از حالات خطاهای بسیار بالا (بین ۵ متر تا ده متر) از هر دو سامانه پس از ترکیب به خطاهایی چند سانتی‌متری و نهایتاً یک یا دو متری در مسافت‌های بالا تبدیل شدند. بنابراین اگر تعداد موقعیت‌یاب‌ها بیشتر شود پیش‌بینی می‌شود که دقت نهایی الگوریتم به حد بسیار مطلوبی برسد.

بار محاسباتی روش ترکیبی به دو بخش الگوریتم آن برمی‌گردد. بخش اول مربوط به محاسبه ضریب تأثیر فناوری‌های موقعیت‌یابی در شرایط مختلف است. این ضرایب از حل معادلات مربوطه (مثل فرمول ۳ و ۵) به دست می‌آید که هر چه تعداد فناوری‌های شرکت‌کننده بیشتر باشد، تعداد مجهول‌ها و معادلات بیشتر می‌شود و در نتیجه هزینه محاسباتی آنها بیشتر خواهد بود. اما محاسبه این ضرایب فقط یکبار و قبل از استفاده عملی از روش ترکیبی انجام می‌شود و بعد از ثبت در جداول مربوطه (مشابه جدول ۴)، الگوریتم ترکیبی بدون بار محاسباتی از آنها برای سنجش موقعیت لحظه‌ای در بخش دوم استفاده می‌کند. در بخش دوم الگوریتم ترکیبی، ضریب تأثیر هر فناوری در موقعیت اعلام شده آن ضرب برداری شده و با هم جمع می‌شوند که یک محاسبه ساده است و بار محاسباتی قابل توجهی ندارد.

آنچه استفاده عملی از روش پیشنهادی برای تعداد بیشتر موقعیت‌یاب‌ها را دچار چالش می‌کند، تشخیص موقعیت‌یاب‌های موجود و شرایط محیطی کار توسط کاربر است. در همه آزمایش‌هایی که در این پژوهش انجام داده‌ایم تشخیص تعداد موقعیت‌یاب‌های مورد استفاده و همچنین شرایط محیطی استفاده از این موقعیت‌یاب‌ها به صورت دستی و توسط کاربر انجام می‌گرفت. اما حسگرهای موجود در گوشی‌های همراه می‌توانند اطلاعات مربوط به وضعیت استفاده از این موقعیت‌یاب‌ها و همچنین شرایط محیطی را گزارش کنند. بنابراین می‌توان انتظار

- the Field of Intelligent Transportation Systems”, Buildings, 12, 4, (428), 2022.
7. Neupane, Inoj, Belal Alsinglawi, and Khaled Rabie, “Indoor Positioning using Wi-Fi and Machine Learning for Industry 5.0”, IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops), Pages: 359-362 (2023).
 8. M. Cypriani, F. Lassabe, P. Canalda, and F. Spies, “Open Wireless Positioning System: A Wi-Fi-Based Indoor Positioning System”, in Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), IEEE 70th, pp. 1-5 (2009).
 9. Abdulqudos Y. Alnahari, Noor Azurati Ahmad, and Yusnaini Yusof, “Wireless Sensor Network Based Outdoor and Indoor Positioning System (WOIPS) Featured with IoT”, In Proceedings of the International Conference on Imaging, Signal Processing and Communication (ICISPC). Association for Computing Machinery, New York, USA, 153-157 (2017).
 10. Hamada Rizk, Moustafa Abbas, Moustafa Youssef, “Device-independent cellular-based indoor location tracking using deep learning”, Pervasive and Mobile Computing, Vol 75, 101420 (2021).
 11. M. Stella, M. Russo, and D. Begušić, “Fingerprinting based localization in heterogeneous wireless networks”, Expert Syst. Appl., vol. 41, no. 15, pp. 6738-6747 (2014).
 12. Mostafa K. Ardakani, Seyed Mohammad Fatemi, Hamid Reza Hamidi, Mojtaba Kamaliardakani, “A hybrid adaptive approach to improve position tracking measurements”, ICT Express, Vol 6, Issue 4, 273-279 (2020).
 13. C. Yang and H. Shao, “WiFi-based indoor positioning”, Commun. Mag. IEEE, vol. 53, no. 3, pp. 150-157 (2015).
 14. A. Patarot, M. Boukallel, S. Lamy-Perbal, A. Vervisch-Picois and N. Samama, “INS and GNSS fusion enhancement based on a weighted reliabilities approach”, 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Sydney, NSW, Australia, pp. 1-10 (2012).
 15. E. Edwan, M. Bourimi, N. Joram, B. Al-Qudsi, and F. Ellinger, “NFC/INS integrated navigation system: The promising combination for pedestrians’ indoor navigation,” in Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), International Symposium, pp. 1-5 (2014).
 16. H. Leppakoski, J. Collin, and J. Takala, “Pedestrian navigation based on inertial sensors, indoor map, and WLAN signals”, in Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), IEEE International Conference, pp. 1569-1572 (2012).

لحظه تغییر کند و شرایط محیطی در هر لحظه بررسی شود و بر حسب خطای لحظه‌ای محاسبات انجام شود، عملکرد بهتری را از الگوریتم شاهد باشیم.

فرمول ریاضی روش ترکیبی یکی از ساده‌ترین فرمول‌های ممکن است و شرایط و قیود زیادی را در بر نگرفته است. امید آن می‌رود که با افزودن قیود مختلف بتوان به فرمول‌های کاراتری جهت ترکیب سیستم‌های موقعیت‌یاب دست یافت. به عنوان مثال در اینجا برای یافتن ضرایب اختصاص داده شده به هر موقعیت‌یاب، از رابطه خطی مستقیم استفاده شده است که می‌توان به جای آن از روابط غیر خطی استفاده کرد. همچنین می‌توان جهت بهبود عملکرد سیستم ترکیبی پیشنهادی از اطلاعات نقشه برای ترکیب استفاده کرد تا خطاها به حداقل برسد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از همکاری اساتید و دانشجویان گروه مهندسی کامپیوتر دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) بابت همفکری و نقد طرح پژوهش کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

1. Feng, S., He, W., Zhang, X. et al., “A comprehensive survey on AR-enabled local collaboration”, Virtual Reality, 27, 2941-2966 (2023).
2. S. Vatansever and I. Butun, “A broad overview of GPS fundamentals: Now and future”, IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), Las Vegas, USA, pp. 1-6 (2017).
3. Kunhoth, J., Karkar, A., Al-Maadeed, S. et al., “Indoor positioning and wayfinding systems: a survey”, Hum. Cent. Comput. Inf. Sci., 10, 18 (2020).
4. Mogyorósi, F., Revisnyei, P., Pašić, A., Papp, Z., Törös, I., Varga, P., Pašić, A., “Positioning in 5G and 6G Networks—A Survey”, Sensors, 22, 4757 (2022).
5. Shakir, Z. D., Zec, J., Koštanec, I., Al-Thaedan, A., & Salah, M. E. M., “User equipment geolocation depended on long-term evolution signal-level measurements and timing advance”, International Journal of Electrical and Computer Engineering, 13(2), 1560. 2023.
6. Yongjie Lin, Qihang Li, Duanya Lyu, Xiaofei Wang, “A Review of Wi-Fi-Based Traffic Detection Technology in