



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Improving the Accuracy of PDR-Based Indoor Positioning in Emergency Scenarios by Modeling Complex Human Movement Behaviors

S.A. Nobakht¹, R. Ali Abbaspour¹, A. Chehregan^{*2}¹ GIS Division, School of Surveying and Geospatial Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran² Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ABSTRACT

Received: 23 April 2026
 Reviewed: 07 June 2026
 Revised: 17 July 2026
 Accepted: 23 August 2026

KEYWORDS:

Indoor Positioning
 Pedestrian Dead Reckoning (PDR)
 Map Matching
 Smartphone Sensors
 Critical Conditions

* Corresponding author

✉ chehregan@sut.ac.ir

☎ (+9841) 33459235

Background and Objectives: Positioning in indoor spaces and environments without Global Navigation Satellite System signals is one of the major challenges in the development of location-based services in smart cities. Among various approaches, infrastructure-independent methods such as smartphone-based Pedestrian Dead Reckoning are considered a reliable solution, especially in critical conditions and when infrastructures are damaged or destroyed. This research aims to present an innovative approach by providing a two-dimensional model for simulating and analyzing specific human movement activities in critical environments, including normal walking, crawling on hands and knees, and belly crawling.

Methods: The proposed process consists of data collection, signal segmentation, gait cycle detection, step counting, movement type recognition, step length estimation, direction determination, and internal coordinate calculation. Data was collected in two phases: training and testing. The signals were segmented using the Pruned Exact Linear Time algorithm and the Functional Pruning Optimal Partitioning algorithm. Subsequently, movement type was recognized by employing Dynamic Time Warping, and step length was estimated using the Weinberg model.

Findings: In the proposed approach, the accuracy of path estimation under different conditions reached an average of 0.17 percent. Furthermore, the direction of movement was determined by fusing data from the accelerometer, gyroscope, and magnetometer using the Gradient Descent Algorithm. The results showed that in the primary Pedestrian Dead Reckoning method, for a path with an average length of 238.226 meters, the mean error was approximately 2.97 ± 1.04 meters. Subsequently, the use of a particle filter based on map matching reduced the error to 0.35 ± 0.07 meters.

Conclusion: The results of this study indicate that designing an intelligent and self-adaptive processing chain for analyzing motion signals can significantly enhance the accuracy and robustness of the Pedestrian Dead Reckoning method in indoor environments and critical conditions. Furthermore, the findings confirm that the smartphone sensor-based Pedestrian Dead Reckoning method can provide accurate and reliable positioning even when the type of movement or the way the device is carried changes.



NUMBER OF REFERENCES

32



NUMBER OF FIGURES

19



NUMBER OF TABLES

4

مقاله پژوهشی

افزایش دقت تعیین موقعیت داخلی مبتنی بر PDR در سناریوهای اضطراری با مدل سازی رفتارهای حرکتی پیچیده انسان

سید علی نوبخت^۱، رحیم علی عباسپور^۱، علیرضا چهرقان^{۲*}^۱ گروه سیستم های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران^۲ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند (تبریز)، تبریز، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: تعیین موقعیت در فضاهای داخلی و محیط های فاقد سیگنال GNSS، یکی از چالش های مهم در توسعه خدمات مکان مینا در شهرهای هوشمند است. در این میان، روش های مستقل از زیرساخت مانند پیمایش عابر پیاده (PDR) مبتنی بر تلفن های هوشمند، به ویژه در شرایط بحرانی و تخریب زیرساخت ها، راهکاری قابل اعتماد محسوب می شوند. این پژوهش با هدف ارائه رویکردی نوآورانه، مدلی دوبعدی برای شبیه سازی و تحلیل فعالیت های حرکتی خاص افراد در محیط های بحرانی شامل راه رفتن عادی، حرکت چهاردست و پا و سینه خیز ارائه می دهد.

روش ها: فرآیند پیشنهادی شامل برداشت داده، قطعه بندی سیگنال، شناسایی چرخه گام، شمارش گام ها، تشخیص نوع حرکت، برآورد طول گام، تعیین جهت حرکت و محاسبه مختصات داخلی است. داده ها در دو فاز آموزشی و آزمایشی گردآوری شدند و سیگنال ها با استفاده از الگوریتم های PELT و FPOP قطعه بندی گردیدند. سپس با بهره گیری از DTW نوع حرکت تشخیص داده شد و طول گام با مدل وینبرگ برآورد گردید.

یافته ها: در فرآیند پیشنهادی دقت تخمین مسیر در شرایط مختلف به میانگین ۰/۱۷ درصد رسید. همچنین جهت حرکت با تلفیق داده های شتاب سنج، ژيروسکوپ و مغناطیس سنج و با استفاده از الگوریتم GDA تعیین شد. نتایج نشان داد در روش اولیه PDR برای مسیری با طول متوسط ۲۳۸/۲۲۶ متر، خطای میانگین حدود $1/04 \pm 2/97$ متر حاصل شد. در ادامه، استفاده از فیلتر ذرات مبتنی بر تطبیق نقشه، خطا را به $0/07 \pm 0/35$ متر کاهش داد.

نتیجه گیری: نتایج این پژوهش نشان می دهد که طراحی یک زنجیره پردازشی هوشمند و خودتطبیق برای تحلیل سیگنال های حرکتی، می تواند دقت و پایداری روش PDR را در محیط های داخلی و شرایط بحرانی به شکل قابل توجهی افزایش دهد. همچنین یافته ها تأیید می کنند که روش PDR مبتنی بر حسگرهای تلفن هوشمند، حتی در صورت تغییر نوع حرکت یا نحوه حمل دستگاه، قابلیت ارائه موقعیت یابی دقیق و پایدار را دارد.

تاریخ دریافت: ۰۳ اردیبهشت ۱۴۰۵
تاریخ داری: ۱۷ خرداد ۱۴۰۵
تاریخ اصلاح: ۲۶ تیر ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش: ۰۱ شهریور ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

تعیین موقعیت داخل ساختمان
PDR
تطبیق نقشه
حسگرهای تلفن همراه هوشمند
شرایط بحرانی

* نویسنده مسئول

chehregan@sut.ac.ir

۰۴۱-۳۳۴۵۹۲۳۵ ①

مقدمه

بلوتوث، تگ های RFID یا لنگرهای UWB هستند، سیستم های PDR به طور مستقل و تنها با استفاده از حسگرهای داخلی تلفن همراه مانند شتاب سنج، ژيروسکوپ، مغناطیس سنج و غیره عمل می کنند [۴-۶]. این توانمندی، PDR را در مکان هایی که زیرساخت های موقعیت یابی در آن ها موجود نیست، مانند فضاهای زیرزمینی، شرایط اضطراری یا مناطقی با قطعی نیروی الکتریسیته به گزینه ای ارزشمند تبدیل می کند [۴].

سیستم های PDR از نظر شیوه حمل دستگاه و سناریوهای ترکیبی، انعطاف پذیری بالایی دارند. تحقیقات نشان می دهد الگوریتم های PDR می توانند صرف نظر از اینکه تلفن همراه هوشمند در دست، در جیب، در کیف یا کنار گوش در حین تماس تلفنی قرار گرفته باشد، به درستی عمل کنند [۷-۱۰]. این ویژگی «غیروابسته به موقعیت دستگاه» عملکرد پایدار را در رفتارهای طبیعی کاربران تضمین می کند و نیازی به محدودیت در نحوه حمل دستگاه نیست. علاوه بر این، سیستم های PDR می توانند به عنوان فناوری مکمل بسیار خوبی عمل کنند و با

سامانه های تعیین موقعیت داخلی به عنوان زیرساختی برای خدمات مبتنی بر مکان در محیط هایی فاقد دسترسی به سیگنال های سامانه ماهواره ای ناوبری جهانی پدید آمده اند. این سامانه ها از روش های فناورانه متنوعی برای دستیابی به موقعیت در داخل ساختمان ها و فضاهای بسته بهره می برند [۱-۳]. تنوع فناوری های موجود نشان دهنده ی توازن پیچیده میان دقت، هزینه، مصرف انرژی و پیچیدگی پیاده سازی در کاربردهای موقعیت یابی داخلی است و انتخاب بهینه سیستم وابسته به الزامات کاربردی خاص و محدودیت های محیطی می باشد. روش موقعیت یابی عابر پیاده (PDR) به عنوان یکی از فناوری های برجسته در موقعیت یابی داخلی شناخته می شود.

یکی از مهم ترین مزایای PDR، عملکرد بدون نیاز به زیرساخت آن است که امکان موقعیت یابی داخلی خودکار را بدون استفاده از ایستگاه های پایه یا تجهیزات از پیش نصب شده فراهم می کند. برخلاف روش های مرسوم موقعیت یابی داخلی که وابسته به نقاط دسترسی نظیر Wi-Fi،

کرده است. این روش طیف وسیعی از ویژگی‌ها شامل مقادیر حداکثر و حداقل شتاب، واریانس، انرژی سیگنال، فرکانس گام و همچنین ویژگی‌های فیزیکی کاربر مانند قد را در نظر می‌گیرد. رویکرد مذکور به جای استفاده از پارامترهای دستی-تنظیم شده و وابسته به کاربر خاص، از یادگیری ماشین نظارت شده برای یادگیری روابط طول گام از نمونه‌های آموزشی بهره می‌برد. این پژوهش بر الگوهای راه رفتن عادی با سرعت‌های مختلف متمرکز بوده است. طول گام برای گام‌های برداشته شده با فرکانس‌ها و شدت‌های حرکتی متفاوت تخمین زده شده است. روش پیشنهادی به گونه‌ای طراحی شده که قادر به مدیریت تغییرات در الگوهای گام‌زنی ناشی از ویژگی‌های کاربر و سبک‌های حرکتی مختلف باشد. الگوریتم پیشنهادی در محیط‌های داخلی کنترل شده توسعه و اعتبارسنجی شده است. این پژوهش عمدتاً بر محیط‌های آزمایشگاهی متمرکز بوده که در آن‌ها امکان اندازه‌گیری دقیق طول گام واقعی فراهم بوده است.

در زمینه برآورد جهت حرکت، مشکل انحراف تدریجی ناشی از انحراف گیری از داده‌های ژيروسکوپ، مهم‌ترین مانع در دستیابی به دقت مطلوب است. [۲۰] در مطالعه خود، روش تصحیح انحراف جهت مبتنی بر کالیبراسیون مغناطیس‌سنج دوماحوره را ارائه دادند. این مطالعه روشی برای تصحیح انحراف سمت ارائه کرده که مبتنی بر کالیبراسیون مغناطیس‌سنج دو محوری با استفاده از الگوریتم برازش بیضی است. در این روش، پیش از آغاز فرآیند موقعیت‌یابی، یک چرخش فعال در محل انجام می‌گیرد. با به‌کارگیری روش تصحیح برازش بیضی، ضرایب جبران‌کننده برای خطاهای اندازه‌گیری مغناطیس‌سنج دو محوری به دست می‌آید تا تداخل مغناطیسی محیطی حذف شود. داده‌های تصحیح‌شده مغناطیس‌سنج مستقیماً برای محاسبه اطلاعات سمت به کار می‌روند. این روش، تشخیص قله برای شناسایی گام را با تخمین طول گام خطی تلفیق می‌کند تا به موقعیت‌یابی خودمختار بدون نیاز به ادغام سنسور متعارف مانند فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF) دست یابد. روش ارائه شده در این تحقیق برای الگوهای عمومی راه رفتن عابر پیاده طراحی شده است. گام‌ها با استفاده از روش تشخیص قله شناسایی می‌شوند و جهت حرکت برای هر گام در حین راه رفتن پیوسته تخمین زده می‌شود. مدل تخمین طول گام خطی به کار رفته در این سیستم، الگوهای راه رفتن نسبتاً یکنواخت را فرض می‌کند.

در حوزه ترکیب PDR و تطبیق با نقشه، مطالعه [۲۱] به طور جامع به بررسی نقش تطبیق نقشه در سیستم‌های موقعیت‌یابی داخلی پرداخته است. این پژوهش به بررسی نقش تطبیق نقشه در کاهش خطای تجمعی در سیستم‌های موقعیت‌یابی ناوبری مبتنی بر حرکت پرداخته است. الگوریتم‌های تطبیق نقشه، محدودیت‌های فیزیکی محیط از جمله دیوارها، راهروها و موانع را بر مسیرهای تخمین‌زده‌شده توسط PDR اعمال می‌کنند. اساس این روش بر این اصل استوار است که حرکات کاربر نمی‌توانند از موانع فیزیکی عبور کنند. بنابراین، هرگاه مسیرهای تخمین‌زده‌شده بیانگر عبور از موانع باشند، الگوریتم به‌طور خودکار

روش‌های دیگر موقعیت‌یابی ترکیب شوند تا سامانه‌های ترکیبی قوی‌تری شکل بگیرد [۸، ۱۱، ۱۲].

پیچیدگی حرکات انسانی و محدودیت حسگرهای ارزان‌قیمت تلفن‌های هوشمند، دقت روش PDR را با چالش مواجه می‌کند. در این پژوهش، فعالیت‌های حرکتی افراد در شرایط بحرانی مانند راه رفتن عادی، حرکت چهاردست‌وپا و سینه‌خیز با فرض قرارگیری تلفن در جیب بررسی شده است. تغییر نوع حرکت و خستگی کاربر باعث تغییر الگوهای حسگر و افزایش خطای تجمعی PDR می‌شود. برخلاف فرض سیستم‌های کلاسیک مبنی بر حرکت یکنواخت، کاربران در محیط‌های بحرانی با موانع متعدد و الگوهای حرکتی متغیر روبه‌رو هستند. همچنین همه داده‌های حسگر نشان‌دهنده جابجایی واقعی نبوده و شامل گذار بین حالات حرکتی نیز می‌شوند.

از این رو در این پژوهش با ارائه رویکردی دو بعدی، علاوه بر جداسازی حالات حرکتی مختلف و انتخاب سیگنال‌های معنادار، کاهش خطای تجمعی از طریق جبران‌سازی سیستماتیک این انحرافات مورد ارزیابی قرار گرفته است. پس از مقدمه در ادامه، بخش دوم به بررسی و مرور مطالعات انجام شده می‌پردازد. بخش سوم به بیان تعاریف و رویکرد پیشنهادی مسئله اختصاص یافته و در بخش چهارم پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج انجام می‌گیرد. بخش آخر نیز به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها می‌پردازد.

پیشینه تحقیق

روش موقعیت‌یابی PDR به عنوان یک راهکار مستقل از زیرساخت، توجه محققان بسیاری را در حوزه موقعیت‌یابی داخلی به خود جلب کرده است [۱۷-۱۳]. [۱۸] در سال ۲۰۲۰ در مطالعه‌ای مبتکرانه، یک الگوریتم تشخیص گام ارائه دادند که بر مبنای شناسایی الگوهای تناوبی در سیگنال شتاب‌سنج عمل می‌کند. در این روش، با بهره‌گیری از تحلیل‌های آماری مبتنی بر واریانس سیگنال، پیک‌های مربوط به گام‌برداری با دقت بالایی شناسایی می‌شوند. این الگوریتم قادر است به صورت پویا آستانه تشخیص را با توجه به تغییرات الگوی حرکتی کاربر تنظیم نماید. اگرچه این روش از عملکرد مطلوبی برخوردار است، اما دقت آن در شرایط غیراستاندارد مانند الگوهای حرکتی بسیار متغیر یا هنگام استفاده با جایگذاری‌های مختلف سنسور روی بدن کاهش می‌یابد. علاوه بر این، عملکرد الگوریتم به کالیبراسیون اولیه مناسب آستانه واریانس وابسته است.

در بخش تخمین طول گام، وابستگی پارامترهای حرکتی به ویژگی‌های فیزیکی کاربران همواره به عنوان یک چالش مطرح بوده است. [۱۹] در سال ۲۰۲۰ با ارائه یک رویکرد انتخاب ویژگی سیستماتیک برای الگوریتم‌های یادگیری ماشین، گامی مؤثر در جهت شخصی‌سازی سیستم برداشتند.

این مطالعه یک رویکرد سیستماتیک برای انتخاب ویژگی در الگوریتم‌های یادگیری ماشین مورد استفاده در تخمین طول گام ارائه

واینبرگ برای تخمین طول گام، میانگین خطای مطلق و نسبی موقعیتیابی به ترتیب برابر با ۰/۷۶ متر و ۲/۹۵ درصد بوده است. همچنین با استفاده از روش لادتو، میانگین خطای مطلق و نسبی موقعیتیابی به ترتیب ۰/۹۲ متر و ۳/۵۷ درصد به دست آمده است. همچنین این مطالعه پارامترهای جنسیت عابر پیاده و سرعت راه رفتن را مورد بررسی قرار داده است.

سعادت زاده و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۲۵] در یک مطالعه به ارزیابی تحلیلی روشهای تعیین موقعیت داخل ساختمان پرداختند. در این مطالعه معیارهای تأثیرگذار شامل استفاده از انواع فیلتر حذف نویز و فیلتر تلفیقی، معیار الگوریتم طبقه بندی داده های حسگرها، معیار تعیین نقطه اولیه، استفاده از Landmark ها بعنوان نقاط چک و نقشه طرح برای تنظیم موقعیت تخمینی، معیار تشخیص و تخمین طول گام و معیار تخمین جهت کاربر با ادغام حسگرهای مختلف گوشی هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان مزایا و معایب هر یک از روشهای مبتنی و مستقل از زیرساخت با یکدیگر مقایسه و مورد ارزیابی قرار می گیرند. همچنین سعادت زاده و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۲۶] در مطالعه دیگری به ارزیابی مؤلفه های مؤثر روش تعیین موقعیت داخلی بر اساس تشخیص نوع حرکت کاربر پرداخته می شود. ابتدا نمونه های حرکتی با استفاده از بردارهای ویژگی حاصل از داده های حسگرها و سه الگوریتم طبقه بندی درخت تصمیم گیری، ماشین بردار پشتیبان و K نزدیکترین همسایه ارزیابی می شوند. بردارهای ویژگی پیشنهادی به طور قابل توجهی در مقایسه با ویژگی های تحقیقات پیشین در سه الگوریتم طبقه بندی بهبود حاصل می کنند. از منظر الگوریتم طبقه بندی، ماشین بردار پشتیبان با صرف بیشترین زمان پردازش بهترین عملکرد را با دقت ۳/۹۹ درصد ارائه می دهد. در مرحله دوم به منظور محلی سازی، تشخیص گام بر اساس تعریف دو حد آستانه بالا و پایین و حد آستانه زمانی بر مقادیر نرم شتاب انجام می شود. مولفه جهت نیز از ترکیب داده های شتاب سنج، مغناطیس سنج و ژيروسکوپ بدست می آید. آزمایشات محلی سازی در حالی که کاربر گوشی را روبه روی خود نگه داشته برای دو حالت پیاده روی و دویدن در سه مسیر (مربع، دایره، مستطیل) انجام می شوند. میانگین دقت نهایی حاصل از پیاده روی برای سه مسیر به ترتیب برابر با ۱/۵۵، ۱/۲۸ و ۲/۳۴ بدست آمدند. دقت نهایی برای دویدن نیز برای سه مسیر به ترتیب برابر با ۲/۷، ۲/۶ و ۳/۵۳ حاصل شد.

مرور منابع پیشین نشان می دهد که مطالعات به طور عمده بر مدل سازی حرکت کاربر در شرایط عادی و با الگوهای یکنواخت (مانند راه رفتن مستقیم و یکنواخت) متمرکز بوده اند. در حالی که در شرایط بحرانی واقعی (مانند آتش سوزی، زلزله و غیره)، الگوهای حرکتی از ویژگی های کاملاً غیرایستا، غیرخطی و چندوجهی برخوردارند. این ویژگی ها شامل حرکات اجتنابی ناگهانی، توقف های اضطراری، تغییر جهت های سریع و حتی حرکات سینه خیز است که توسط سیستم های موجود PDR نادیده گرفته می شوند. این پژوهش با توسعه یک رویکرد

موقعیت ها را به نزدیکترین مسیر ممکن تصحیح می کند. این پژوهش نیز بر الگوهای راه رفتن عادی عابر پیاده متمرکز بوده است. در این راستا، مسیرهای تخمین زده شده توسط PDR شامل طول گام و جهت حرکت، در برابر محدودیت های نقشه تطبیق داده شده اند. روش مذکور برای حرکت پیوسته راه رفتن با به روزرسانی دوره ای موقعیت به کار گرفته می شود.

در حوزه مکان یابی داخلی برای عملیات امدادی، چالش اصلی ارائه سیستم هایی است که در محیط های فاقد زیرساخت و شرایط غیرقابل پیش بینی قادر به ارائه موقعیتیابی دقیق باشند. [۲۲] در سال ۲۰۱۸ در مطالعه ای مبتکرانه، یک سیستم مکان یابی خودکار برای آتش نشانان ارائه دادند که بر مبنای تلفیق داده های PDR با شبکه ای از گره های رادیویی تشکیل شده در حین حرکت عمل می کند. در این روش، با بهره گیری از مکانیزم توزیع خودکار گره های رادیویی، یک شبکه موقت ایجاد شده و موقعیت نسبی کاربر با دقت قابل قبولی محاسبه می شود. این سیستم قادر است به صورت پویا توپولوژی شبکه را با توجه به شرایط متغیر محیطی بازسازی نماید. مهم ترین مزیت این روش، استقلال از زیرساخت های از پیش نصب شده و قابلیت اجرا در محیط های ناشناخته است. اگرچه این سیستم از عملکرد مطلوبی برخوردار است، اما دقت آن در مقایسه با سیستم های وابسته به زیرساخت کمتر بوده و هزینه اجرایی مربوط به گره های رادیویی از محدودیت های آن محسوب می شود. علاوه بر این، عملکرد سیستم به مدیریت بهینه توپولوژی پویای شبکه وابسته است.

در حوزه موقعیتیابی پرسنل امداد رسانی در معادن زیرزمینی، چالش اصلی ارائه سیستم هایی است که در محیط های فاقد زیرساخت و بدون دسترسی به GPS قادر به ارائه موقعیتیابی دقیق باشند. Zhao و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۲۲ در مطالعه ای کاربردی، یک سیستم موقعیتیابی مبتنی بر سنسور MEMS ارائه دادند که بر مبنای تلفیق الگوریتم PDR با فیلتر کالمن توسعه یافته عمل می کند. در این روش، با بهره گیری از سنسور اینرسیال MPU9150 برای جمع آوری داده های حرکتی و میکروپروسسور CC2530 برای پردازش، پارامترهای حرکتی از جمله اندازه گام و جهت یابی با دقت بالایی محاسبه می شوند. مهم ترین مزیت این روش، دقت بالای آن در محیط های زیرزمینی بدون نیاز به زیرساخت های خارجی است. استفاده از روش کواترنیون برای تخمین زاویه جهت گیری و به کارگیری فیلتر کالمن توسعه یافته برای تصحیح داده ها، این قابلیت را به سیستم می دهد که خطای انباشته شده سنسورها را به طور مؤثری کاهش دهد و دقت را در مسافت های طولانی حفظ نماید. اگرچه این سیستم از عملکرد مطلوبی برخوردار است، اما روش ها ارائه شده برای موقعیتیابی پرسنل امداد رسانی در حین راه رفتن عادی در تونل های معدنی طراحی شده بود.

خلیلی و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۲۴] موقعیت عابر پیاده بر اساس روش PDR و با استفاده از طول گام ها و جهت های تخمین زده شده، محاسبه شده است. در مسیری به طول ۲۵/۸ متر، با به کارگیری روش

برداشت داده و قطعه‌بندی سیگنال

برای برداشت داده‌ها از اپلیکیشن HyperIMU که یک برنامه رایگان می‌باشد استفاده شده است. فرکانس برداشت داده‌ها بر روی ۵۰ هرتز (۲۰ میلی‌ثانیه) تنظیم شد. در این برنامه با استفاده از حسگرهای شتاب‌سنج، مغناطیس‌سنج،ژیروسکوپ و جاذبه‌سنج برداشت داده انجام می‌گیرد. با توجه به اینکه حسگر مغناطیس‌سنج دو نوع داده خام و کالیبره شده ارائه می‌دهد، در این پژوهش از نوع داده‌های کالیبره شده استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن رویکرد این پژوهش که شامل تعیین موقعیت در شرایط بحرانی و به تبع آن تغییر حالت حرکت در طول مسیر می‌باشد، تفکیک سیگنال به بخش‌های مجزای حرکتی ضرورت دارد.

تشخیص گام

برای ناوبری دقیق در روش PDR، شناسایی دقیق قدم‌های مجزا از سیگنال‌های شتاب‌سنج مهم است. الگوریتم‌های پایه‌ای شناسایی قله، اساس اکثر سیستم‌های تشخیص گام در کاربردهای موقعیت‌یابی داخلی را تشکیل می‌دهند. رویکرد بنیادی براساس رابطه (۱) شامل شناسایی ماکزیمم‌های محلی در سیگنال‌های بزرگی شتاب است که با برخورد پاشنه پا یا جداشتن پنجه پا در حین راه رفتن مطابقت دارند. شرط پایه‌ای شناسایی قله را می‌توان به صورت تشخیص قله‌ها هنگامی که مقدار شتاب جاری از مقادیر قبل و بعد از خود در یک بازه تعریف‌شده بیشتر باشد، بیان کرد.

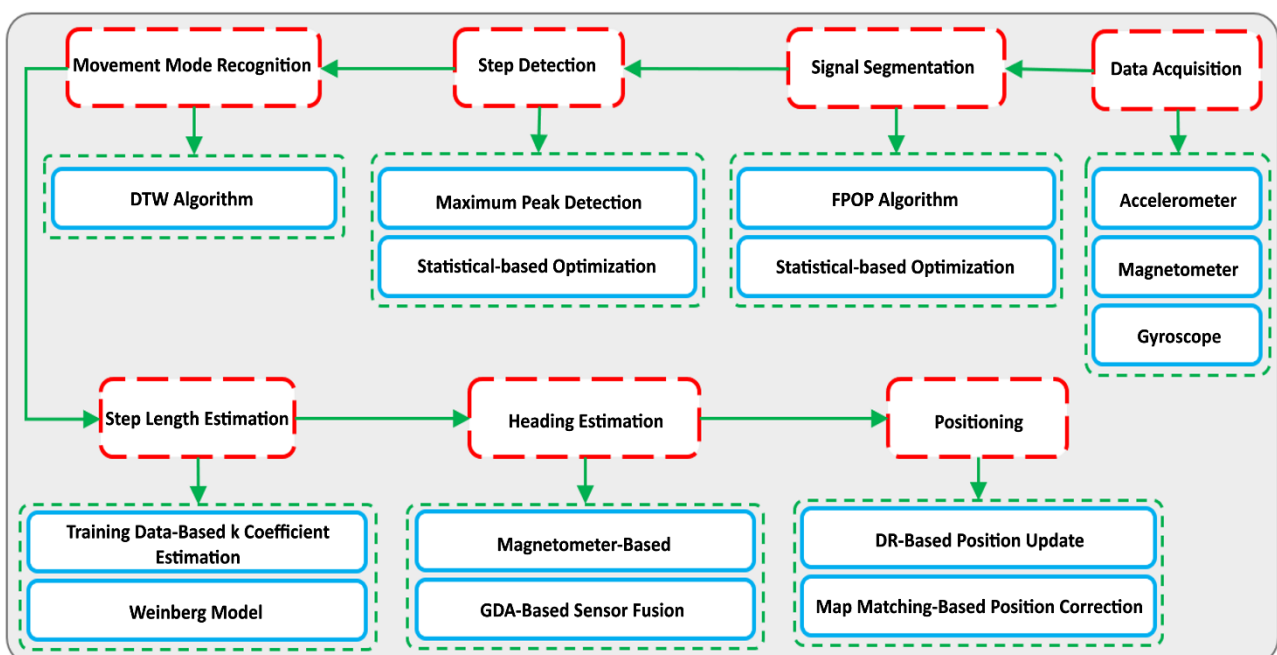
$$a_{norm} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1)$$

a_x ، a_y و a_z مقدار شتاب در راستای سه محور و a_{norm} مقدار نهایی شتاب می‌باشد.

دو بعدی شناسایی و طبقه‌بندی حالات حرکتی پیچیده، بر این شکاف غلبه می‌کند. نوآوری در این است که سیستم پیشنهادی به جای اتکا به یک مدل ثابت، قادر است به صورت پویا و بر اساس داده‌های حسگری بلادرنگ، نوع حرکت کاربر را تشخیص داده و پارامترهای مربوط به تخمین گام و جهت را با آن تطبیق دهد. همچنین یک معماری PDR خودتطبیق طراحی شده است که خطای تجمعی را بدون نیاز به هیچ گونه زیرساخت خارجی مدیریت می‌کند.

روش تحقیق

مراحل رویکرد پیشنهادی تعیین موقعیت مبتنی بر PDR در شکل (۱) نمایش داده شده و شامل زنجیره‌ای از مراحل از جمع‌آوری داده تا برآورد موقعیت است. این مراحل شامل قطعه‌بندی داده‌ها به بخش‌های حرکت و سکون، پیش‌پردازش، تشخیص حالت حرکتی، شناسایی گام، تخمین طول گام، تعیین جهت حرکت و در نهایت محاسبه موقعیت می‌باشد. داده‌ها در شرایط شبیه‌سازی شده بحرانی مانند آتش‌سوزی و با تغییرات مداوم حالت حرکتی گردآوری شده‌اند، بنابراین ابتدا سیگنال با استفاده از $FPOP$ و $PELT$ به بخش‌های معنادار حرکت و سکون تفکیک می‌شود. سپس برای تشخیص حالت حرکت از DTW (رجوع شود به [۲۷]، [۲۸] و [۲۹])، برای شناسایی گام از نقاط بیشینه، و برای تخمین طول گام از مدل وینبرگ (برای برآورد ضریب K) استفاده شده است. جهت حرکت نیز با ادغام حسگرها و الگوریتم GDA تعیین می‌شود و در نهایت با بهره‌گیری از Map Matching و Particle Filter، دقت و پایداری PDR بهبود می‌یابد.



شکل ۱: مراحل رویکرد پیشنهادی

Fig. 1: Proposed Approach

منظور پیاده‌سازی مدنظر قرار گرفت. شکل (۳) حالات حرکت انتخاب شده این پژوهش را نشان می‌دهد. همچنین به منظور شناسایی حالت حرکت از الگوریتم DTW استفاده می‌شود [۲۷-۲۹]. برای استحکام بهتر این الگوریتم از ابتدای نقطه بیشینه تا نقطه بیشینه بعدی، برای سیگنال آزمایشی و مقایسه آن با طول دو گام از داده آموزشی استفاده می‌گردد. تخمین طول گام

به منظور برآورد طول گام، مدل‌های متنوعی توسعه داده شده‌اند؛ اما در این پژوهش از مدل وینبرگ برای تخمین طول گام استفاده شده است. به دلیل سادگی و دقت نسبی، این روش به یکی از ارکان اصلی در کاربردهای موقعیت‌یابی و ناوبری در محیط‌های داخلی مبتنی بر گوشی هوشمند تبدیل شده است [۳۰]. رابطه (۲) ریشه چهارم، دینامیک غیرخطی راه‌رفتن را بهتر از مدل‌های خطی ساده نمایش می‌دهد.

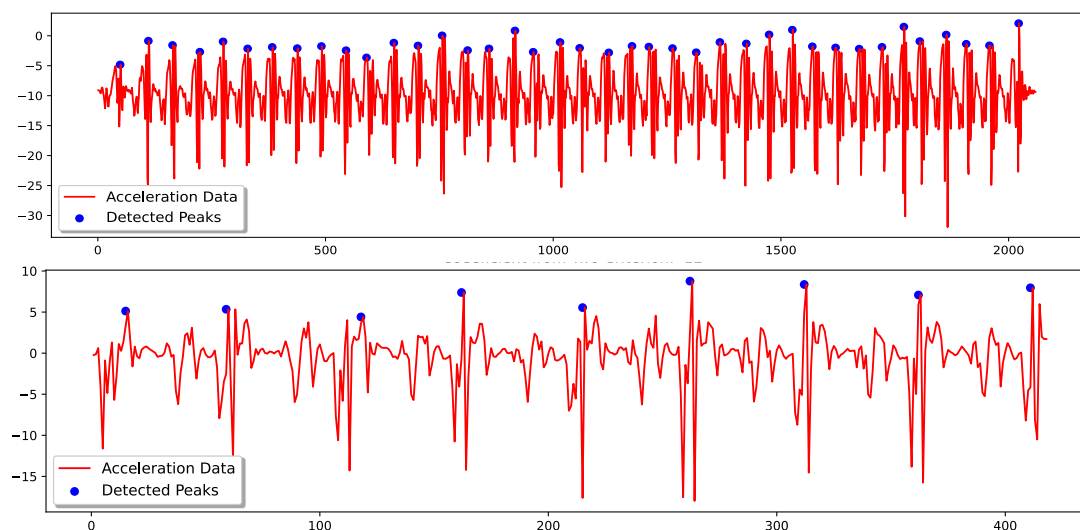
(۲)

$$SL = K \times \sqrt[4]{a_{Max} - a_{Min}}$$

a_x ، a_y و a_z مقدار شتاب در راستای سه محور و a_{norm} مقدار نهایی شتاب می‌باشد. شناسایی قله شتاب هر دو گام بر اساس الگوریتم شناسایی قله مفهوم ساده‌ای را دنبال می‌کند. عاملی که این روش را چالشی کرده است تقسیم سیگنال شتاب به پنجره‌های مجزا می‌باشد به نحوی که در هر پنجره تنها یک نقطه بیشینه وجود داشته باشد. لازم به ذکر است که طول سیگنال در هر حرکت با طول سیگنال بعدی متفاوت می‌باشد. در رویکرد این پژوهش هر سیگنال را براساس طول اولیه تقسیم کرده و سپس به کمک روش‌های آماری این تقسیم‌بندی بهینه شده است. در ادامه در شکل (۲) چند مدل برآورد تشخیص گام نمایش داده شده است. به منظور برآورد تعداد گام، طول این قطعه از سیگنال را به میانگین فواصل نقاط بیشینه تقسیم کرده و عددی که بدست می‌آید حاصل تعداد دو گام در طول سیگنال می‌باشد.

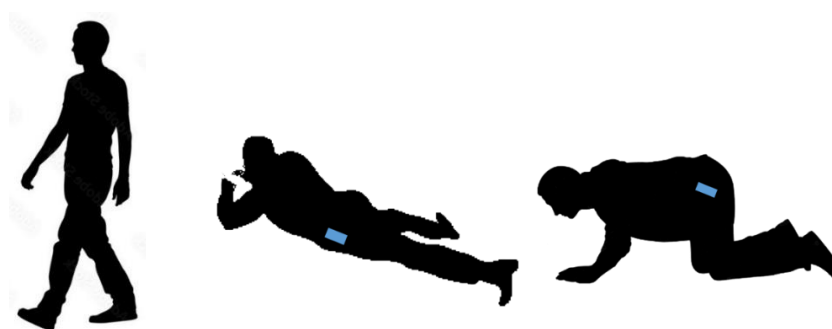
شناسایی حالت حرکت

با توجه به رویکرد تعیین موقعیت که براساس حرکت در شرایط خاص در نظر گرفته شده است، حرکت عادی مثل پیاده‌روی عادی ولی با شتاب و حالات حرکت غیر معمول مثل چهاردست و پا و سینه‌خیز به



شکل ۲: تشخیص گام با استفاده از تشخیص نقطه اوج

Fig. 2: Peak Detection-Based Step Detection



شکل ۳: حرکات منتخب در این پژوهش

Fig. 3: Selected Movements in This Study

$$X_i = X_{i-1} + L_i \times \cos \Psi_i, \quad Y_i = Y_{i-1} + L_i \times \sin \Psi_i \quad (3)$$

در این رابطه، X_i و Y_i موقعیت تخمینی کاربر و L_i و Ψ_i به ترتیب طول و جهت حرکت کاربر در گام i هستند. فرض بر این است که مکان اولیه مشخص است و می‌توان آن را به صورت پیش فرض یا کدهای QR در ساختمان بدست آورد.

فرآیند تعیین موقعیت در این روش متشکل از مراحل متوالی و به هم پیوسته‌ای است که با جمع‌آوری داده‌های خام از حسگرهای گوشی هوشمند آغاز می‌شود. در گام بعدی این داده‌ها با استفاده از رویکردهای قطعه‌بندی سیگنال به داده‌های معنادار حرکتی و داده‌های حالت گذار از حرکتی به حرکت دیگر تقسیم شده‌اند. در مرحله بعد داده‌ها تحت پیش‌پردازش قرار گرفته تا نویززدایی شده و کیفیت آن‌ها برای پردازش‌های بعدی افزایش یابد. در مرحله بعد، الگوریتم‌های تشخیص گام، قدم‌های برداشته شده توسط کاربر را شناسایی و شمارش می‌کنند. در ادامه، حالات حرکتی کاربر تشخیص داده می‌شود. سپس با استفاده از اطلاعات به دست آمده، طول هر گام تخمین زده شده و جهت حرکت کاربر تعیین می‌گردد. پس از انجام این محاسبات، موقعیت نهایی کاربر بر اساس روش PDR تعیین می‌شود. در پایان، به منظور افزایش دقت موقعیت به دست آمده، از تکنیک تطبیق نقشه استفاده می‌شود تا خطای تجمعی روش PDR کاهش یابد.

رویکرد ارزیابی

برای ارزیابی دقت رویکرد در تخمین طول مسیر پیموده شده، از یک روش اعتبارسنجی مبتنی بر مقایسه با مقادیر مرجع استفاده شد. بدین منظور، یک مسیر آزمون با طول مشخص طراحی و پیاده‌سازی گردید. طول واقعی این مسیر با استفاده از متر نواری در شرایط میدانی و با دقت سانتیمتر اندازه‌گیری شد. در بخش‌هایی از مسیر که دارای پیچ‌ها و انحنای متعدد بودند، اندازه‌گیری با دقت بیشتری انجام پذیرفت تا از ثبت دقیق کلیه تغییرات مسیر اطمینان حاصل شود. در گام بعد، نقشه مسیر با استفاده از نرم‌افزار اتوکد ترسیم و طول آن مجدداً محاسبه گردید تا صحت اندازه‌گیری‌های میدانی تأیید شود.

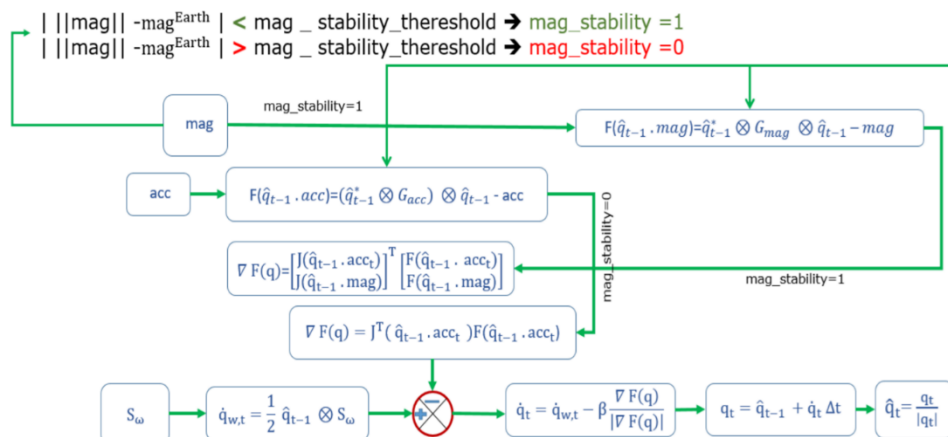
که در آن SL طول گام تخمین زده شده، K ضریب وینبرگ، a_{Max} بیشینه شتاب عمودی در طول یک گام و a_{Min} کمینه شتاب عمودی در طول یک گام می‌باشد. به منظور تخمین ضریب وینبرگ برای هر حالت حرکت طول ثابتی در نظر گرفته و چندین بار در این مسیر برداشت داده انجام می‌شود. سپس به کمک روش حداقل مربعات با داشتن پارامترهای SL ، a_{Max} و a_{Min} ضریب K برآورد می‌گردد. برای اینکه ضریب K با دقت بیشتری برآورد شود، طول مسیر باید بزرگتر از طول فضای پیمایش داخلی در نظر گرفته شود.

تخمین جهت حرکت

در این پژوهش برای تخمین جهت از الگوریتم گرادیان نزولی (GDA) که بیشتر با نام الگوریتم Madgwick شناخته می‌شود، استفاده شده است. این الگوریتم یک روش بهینه و محاسباتی کارآمد برای همجوشی داده‌های حسگرهایژیروسکوپ، شتاب‌سنج و مغناطیس‌سنج به منظور تخمین زاویه سمت می‌باشد. به دلیل سادگی، پایداری و نیاز کم به منابع محاسباتی، به طور گسترده در واحدهای اندازه‌گیری اینرسی (IMU) و سیستم‌های مرجع وضعیت و جهت (AHRS) مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم GDA با ترکیب ویژگی‌های مکمل حسگرهای IMU، محدودیت‌های ذاتی هر کدام را جبران می‌کند. به طوری کهژیروسکوپ‌ها اندازه‌گیری دقیقی از وضعیت ارائه می‌دهند [۳۱]. این الگوریتم برای جلوگیری از مشکلات تکینگی (singularity) در زوایای اولیه، از نمایش کوانترنیونی استفاده می‌کند که توصیف کارآمدی از وضعیت سه‌بعدی ارائه می‌دهد. همچنین، با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی گرادیان نزولی، خطای اندازه‌گیریژیروسکوپ را بر اساس مشاهدات شتاب‌سنج و مغناطیس‌سنج تصحیح می‌کند [۳۲]. شکل (۴) فلوچارت این الگوریتم را نشان می‌دهد.

تعیین موقعیت و بهبود آن به روش تطبیق نقشه

در این مرحله، موقعیت نقاط مسیر پیموده شده با استفاده از رابطه (۳) و بر اساس موقعیت اولیه کاربر، طول گام تخمین زده شده و زاویه سمت تعیین می‌گردد. به منظور افزایش دقت تخمین موقعیت از رویکرد تطبیق نقشه با بهره‌گیری از الگوریتم فیلتر ذرات استفاده شده است.



شکل ۴: فلوچارت الگوریتم GDA

Fig. 4: GDA Algorithm Flowchart

نتایج و بحث

به منظور پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی و ارزیابی نتایج، داده‌ها به کمک تلفن همراه هوشمند Samsung Galaxy A34 توسط مردی ۴۲ ساله با وزن ۱۰۵ کیلوگرم و قد ۱۸۵ سانتیمتر برداشت شد. این تلفن همراه، فاقد حسگر فشارسنج می‌باشد. برای برداشت داده‌های آموزشی به منظور تشخیص نوع حرکت و تخمین طول گام برای محاسبه ضریب K در مدل وینبرگ برای حالت‌های چهار دست‌وپا و سینه‌خیز، محیط ساختمان مرکزی پردیس ۲ دانشکدگان فنی دانشگاه تهران و برای حالت پیاده‌روی عادی، دور زمین فوتبال دانشکده تربیت بدنی دانشگاه تهران (شکل ۵)) انتخاب شد. کلیه فرآیند پردازش داده‌ها و پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط Python انجام شده است.

قطعه‌بندی داده‌ها

برای قطعه‌بندی داده‌ها از دو الگوریتم PELT و FPOP استفاده شد. به علت دامنه‌های متفاوتی که در برداشت ترکیبی داده‌ها موجود است؛ هیچکدام از این دو روش، پاسخگوی قطعه‌بندی داده‌ها نخواهد بود. در شکل (۶) قطعه‌بندی به روش PELT با مقدار جریمه (P) متفاوت نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با تغییر در مقادیر جریمه، نقاط تغییر متفاوتی بدست می‌آید که حتی اگر بتوان در این سیگنال، مقدار بهینه را پیدا کرد در سیگنال‌های بعدی، دیگر این مقدار بهینه نخواهد بود. بنابراین لازم بود در این الگوریتم تغییراتی داده شود تا بتوان به کمک آن همه سیگنال‌ها را قطعه‌بندی کرد. برای این منظور مقداری که برای جریمه در نظر گرفته شد مقدار کمی بود تا با کوچکترین تغییری در اندازه شتاب، الگوریتم آن را به عنوان نقطه تغییر ثبت کند.

دقت رویکرد در تخمین طول مسیر با استفاده از معیار خطای نسبی مورد سنجش قرار می‌گیرد که با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

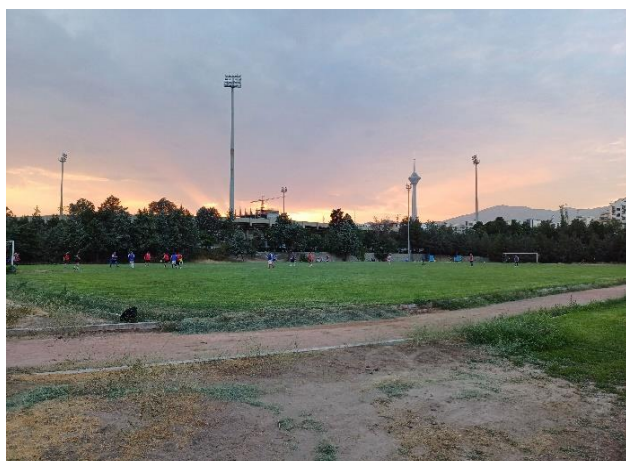
$$(۴) \quad \text{خطا نسبی} = \frac{|\text{طول تخمین زده شده} - \text{طول واقعی}|}{\text{طول واقعی}} \times 100\%$$

این معیار امکان مقایسه سیستماتیک بین مقادیر تخمین زده شده توسط سامانه PDR و مقادیر مرجع واقعی را فراهم می‌سازد و مبنای مناسبی برای تحلیل کارایی سامانه در تخمین طول مسیر پیموده شده ارائه می‌دهد.

به منظور ارزیابی دقت تعیین موقعیت رویکرد پیشنهادی، از روش مقایسه‌ای سیستماتیک بین مسیر بازسازی شده توسط رویکرد و مسیر واقعی استفاده شده است. رویکرد پیشنهادی با برآورد موقعیت‌های متوالی کاربر، مجموعه‌ای از نقاط را تولید می‌کند که با اتصال آن‌ها، مسیر حرکت بازسازی می‌شود. برای سنجش کمی دقت تعیین موقعیت، از معیار میانگین خطای افقی استفاده شده است. این شاخص با محاسبه میانگین فاصله اقلیدسی بین موقعیت‌های تخمین‌زده‌شده و نقاط متناظر بر روی مسیر واقعی محاسبه می‌گردد (رابطه ۵)).

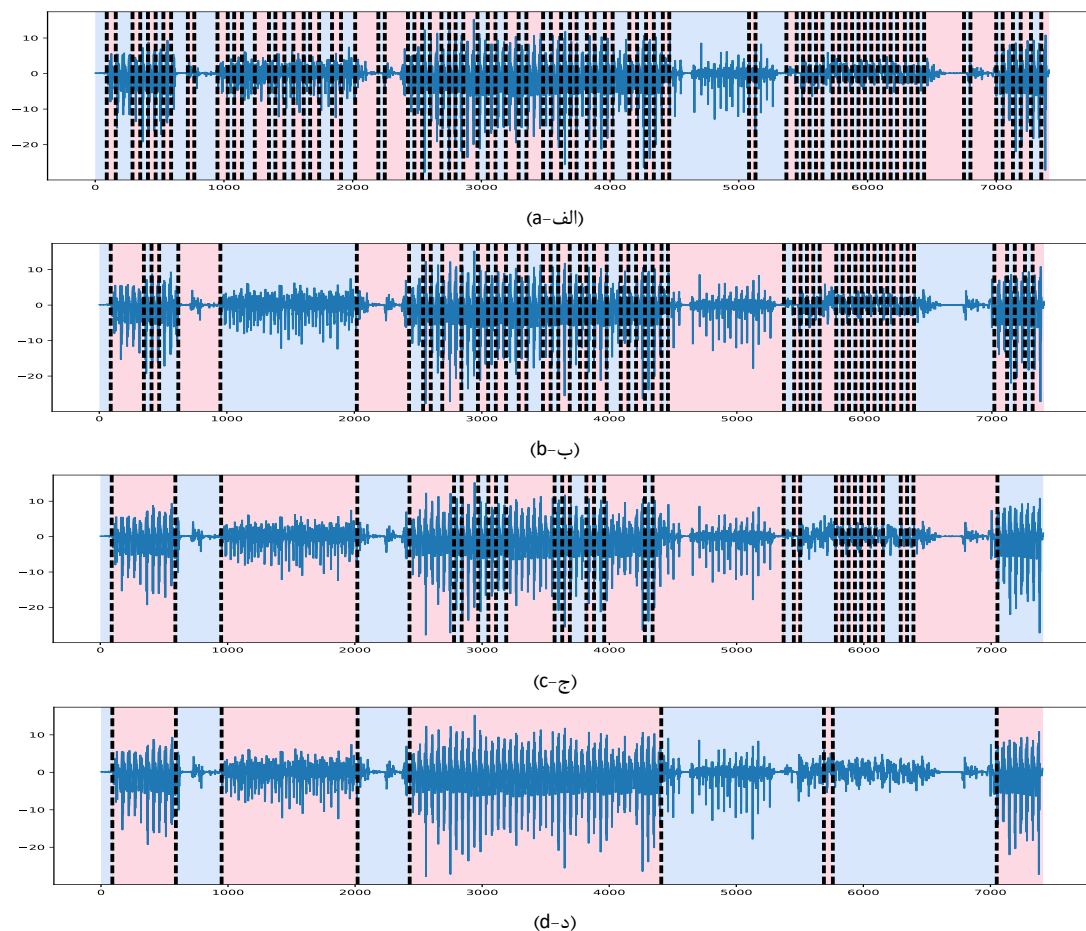
$$(۵) \quad MHE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^{est} - x_i^{ref})^2 + (y_i^{est} - y_i^{ref})^2$$

آن n تعداد نقاط، x_i^{est} و y_i^{est} مختصات نقطه i -ام تخمین‌زده‌شده توسط سامانه، و x_i^{ref} و y_i^{ref} مختصات نقطه مرجع متناظر بر روی مسیر واقعی می‌باشد. این معیار به عنوان شاخصی پایه برای ارزیابی عملکرد کلی سامانه در تخمین موقعیت به کار می‌رود.



شکل ۵: زمین فوتبال دانشکده تربیت بدنی و یکی از کلاس‌های دانشکدگان فنی دانشگاه تهران

Fig. 5: Football Field of the Faculty of Physical Education and One of the Classrooms in the College of Engineering, University of Tehran



شکل ۶- قطعه‌بندی سیگنال حاصل از تغییر حالت حرکت توسط الگوریتم PELT، (الف) $P = 5$ ، (ب) $P = 10$ ، (ج) $P = 20$ ، (د) $P = 30$
 Fig. 6: Signal Segmentation of Motion Mode Transitions Using the PELT Algorithm: (a) $P = 5$, (b) $P = 10$, (c) $P = 20$, and (d) $P = 30$

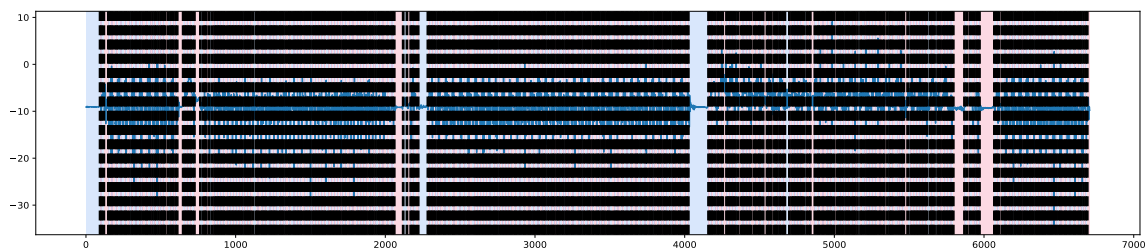
برای برآورد طول یک سیکل کامل باید تعداد یک سیکل حرکت کامل (هر دو گام) برآورد می‌شد. اما چالش در حالت‌های حرکت غیرعادی است. این حالت‌های حرکت، سیگنالی بسیار نامنظم ایجاد می‌کند. در شکل (۱۱-الف) سیگنال تولید شده در حالت پیاده‌روی معمولی و در شکل (۱۱-ب) سیگنال تولید شده از حالت حرکتی غیرعادی به صورت دو زانو نشان داده شده است.

از آنجائیکه انسانها در حالت پیاده‌روی معمولی بدون خستگی طی مسیر می‌کنند، همین عامل باعث نظم ریتمیک در سیگنال پیاده‌روی معمولی می‌شود. در مقابل، راه رفتن غیرعادی آدمی را خسته می‌کند و دائما شکل حرکت تغییر می‌کند و به تبع آن شکل سیگنال دائما تغییر کرده و نظم ریتمیک خود را از دست می‌دهد. در این پژوهش به کمک دو رویکرد آماری و سپس مقایسه بین سه محور، طول یک سیکل کامل بدست می‌آید. به این صورت که با انتخاب یک بازه بزرگ برای پنجره داده، سیگنال را تکه تکه کرده و در هر تکه نقاط پیک و فاصله بین این نقاط محاسبه شده و چنانچه انحراف از میانگین فواصل نقاط از مقدار معلومی (که مقدار آن با بررسی انواع حرکت به صورت تجربی بدست آمد) بیشتر باشد، اندازه بازه را کوچکتر کرده و تا برآورده شدن نتیجه همین فرایند ادامه می‌یابد.

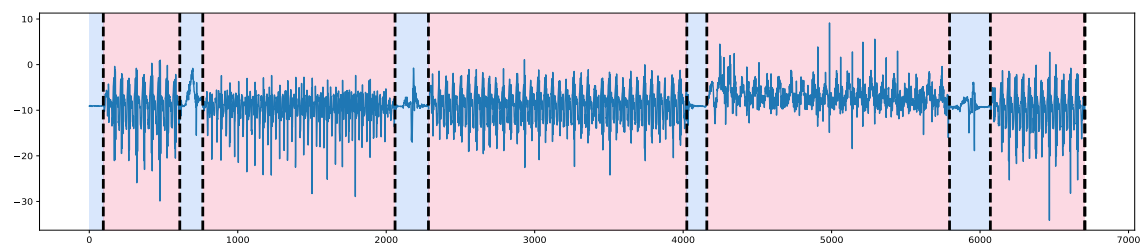
برای این منظور مقداری که برای جریمه در نظر گرفته شد مقدار کمی بود تا با کوچکترین تغییری در اندازه شتاب، الگوریتم آن را به عنوان نقطه تغییر شکل ثبت کند. طبق شکل (۷) فاصله نقاط تغییر در محل تغییر واقعی در حالت حرکت بیشتر از نقاط دیگر می‌شود. خروجی این مرحله در شکل (۸) نمایان است که حالات حرکت از هم جدا می‌شود. با استفاده از همین رویکرد و به کمک الگوریتم FPOP قطعه‌بندی سیگنال انجام و نمایی از آن در شکل (۹) نشان داده شده است. بنابراین در ادامه کار پیاده‌سازی، این روش قطعه‌بندی برای باقی مراحل مورد استفاده قرار گرفت.

تشخیص گام

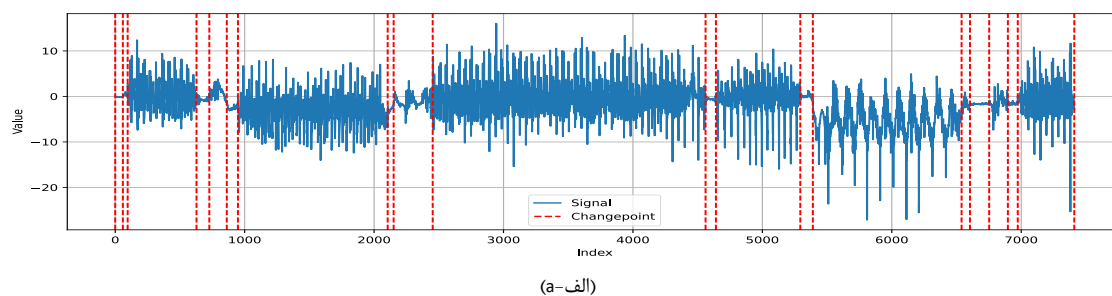
شناسایی قله شتاب هر دو گام بر اساس الگوریتم شناسایی قله مفهوم ساده‌ای را دنبال می‌کند. عاملی که این روش را چالشی کرده است، تقسیم سیگنال شتاب به پنجره‌های مجزا می‌باشد؛ به نحوی که در هر پنجره، تنها یک نقطه بیشینه وجود داشته باشد. لازم به ذکر است که طول سیگنال در هر حرکت با طول سیگنال بعدی متفاوت است. در رویکرد این پژوهش، هر سیگنال را براساس طول اولیه تقسیم کرده و سپس به کمک روش‌های آماری این تقسیم‌بندی بهینه شده است. در ادامه در شکل (۱۰) نمونه‌ای از برآورد تشخیص گام نمایش داده شده است.



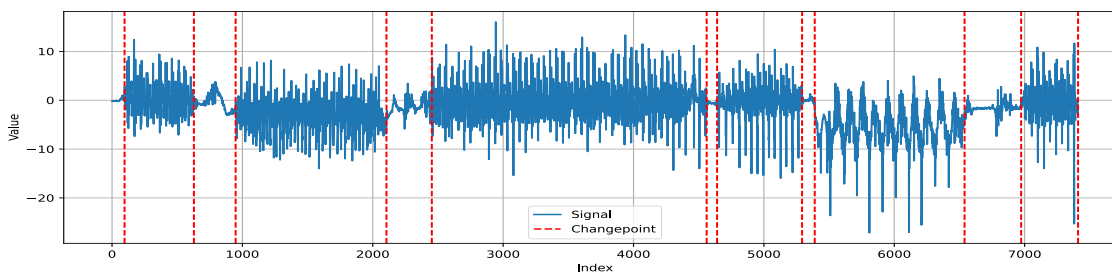
شکل ۷: مرحله اول تعمیم الگوریتم PELT برای قطعه‌بندی سیگنال؛ $P = 1$
 Fig. 7: First Stage of the Generalized PELT Algorithm for Signal Segmentation; $P=1$



شکل ۸: قطعه‌بندی نهایی با روش PELT و رویکرد آماری
 Fig. 8: Final Signal Segmentation Using the PELT Algorithm and a Statistical Approach

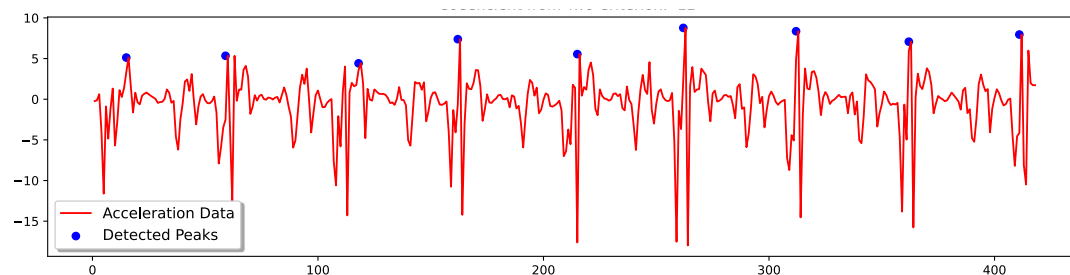


(الف-ا)

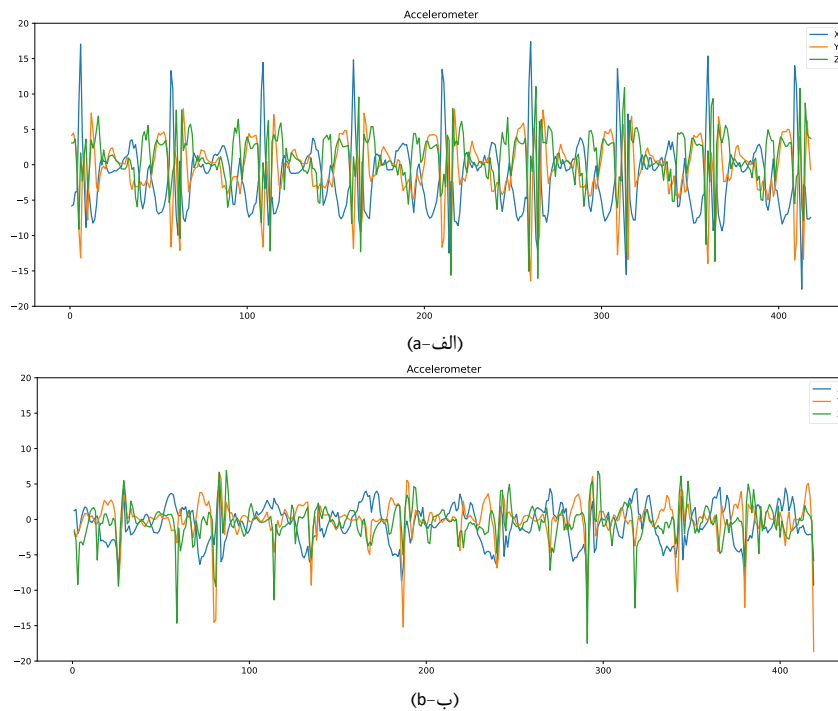


(ب-ب)

شکل ۹: قطعه‌بندی سیگنال توسط الگوریتم FPOP با رویکرد آماری، (الف) $\beta = 10$ (ب) قطعه‌بندی نهایی
 Fig. 9: Signal Segmentation Using the FPOP Algorithm with a Statistical Approach: (a) $\beta = 10$, and (b) Final Segmentation



شکل ۱۰: تشخیص گام با استفاده از تشخیص نقطه اوج
 Fig. 10: Step Detection Using Peak Detection



شکل ۱۱: مقایسه دو سیگنال حرکتی (الف): پیاده‌روی عادی و (ب): حالت حرکت غیرعادی روی دو زانو
Fig. 11. Comparison of Two Motion Signals: (a) Normal Walking and (b) Walking on Both Knees

چهارم اختلاف بین بیشینه شتاب عمودی (a_{Max}) در طول یک گام و کمینه شتاب عمودی (a_{Min}) در طول یک گام به دست می‌آید. چالش اصلی در این روش بدست آوردن ضریب K است. برای بدست آوردن این ضریب از طول مسیر بلند استفاده شد. طول مسیر بلند تعداد سیکل‌های برداشت شده را افزایش داده و باعث می‌شود پاسخ حداقل مربعات به مقدار واقعی نزدیک‌تر باشد. سپس با میانگین‌گیری ضرایب K از برداشت چندین مرتبه مسیر خطای این ضریب را کاهش و دقت آن افزایش داده شد. برای پیاده‌روی عادی مسیر دور زمین فوتبال دانشکده تربیت‌بدنی مطابق شکل (۱۳) و برای حرکات غیر معمول راهروهای دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی دانشکدگان فنی دانشگاه تهران انتخاب و برداشت انجام شد. همچنین در جدول (۱) نتایج ضریب K ارائه شده است. در شکل (۱۴) نقشه پلان طبقه دوم دانشکده نقشه‌برداری و مسیر حرکت نشان داده شده است. نتایج حاصل از محاسبه طول و ارزیابی دقت طول پیموده شده در جدول (۲) مشاهده می‌شود.

تخمین جهت حرکت

همانطور که در بخش قبلی ذکر گردید، جهت حرکت به کمک الگوریتم GDA تخمین زده شد.

ارزیابی تعیین موقعیت

برداشت‌های تعیین موقعیت در طبقه دوم ساختمان مرکزی پردیس شماره دو دانشکدگان فنی دانشگاه تهران انجام شده است. در شکل (۱۵) نقشه موقعیت ساختمان مرکزی و مدل تولید شده قسمتی از ساختمان مرکزی مشاهده می‌شود.

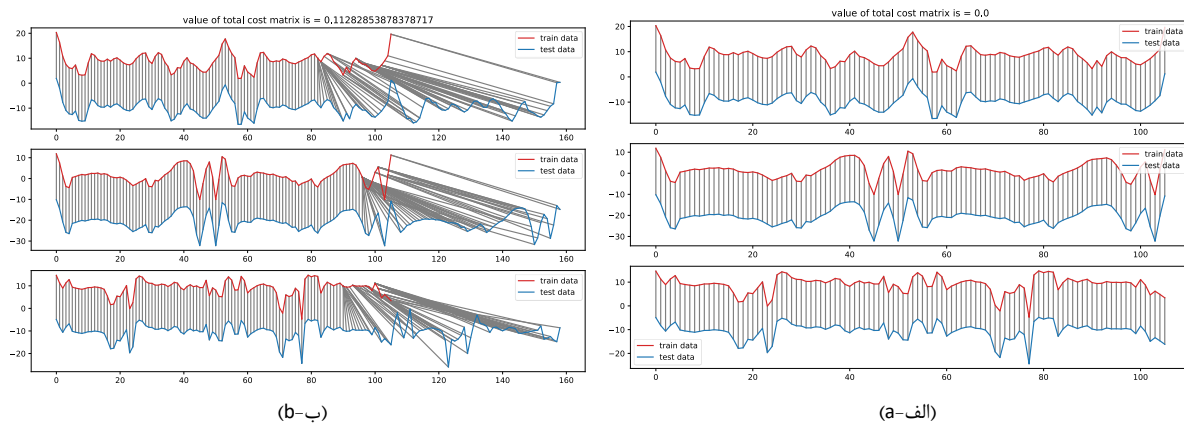
با بررسی چندین سیگنال حرکت غیرعادی، مشاهده شد که می‌توان بین محورهای X ، Y و Z محوری را پیدا کرد که نظم ریتمیک سیگنال، از دو محور دیگر بهتر باشد. بنابراین برای انتخاب طول یک سیکل کامل، محوری که تعداد و انحراف معیار فواصل نقاط پیک به ترتیب قبل و پس از حذف داده‌های پرت، پایین‌تر باشد و داده‌های پرت کنار گذاشته شده و تعداد تکرار کمتر و داده‌های حذف نشده بیشتری داشته باشد را ملاک قرار می‌دهیم. در نهایت برای محاسبه تعداد گام، طول سیگنال را به نصف میانگین طول گام تقسیم کرده و تعداد گام برآورد می‌شود.

تشخیص حالت حرکت

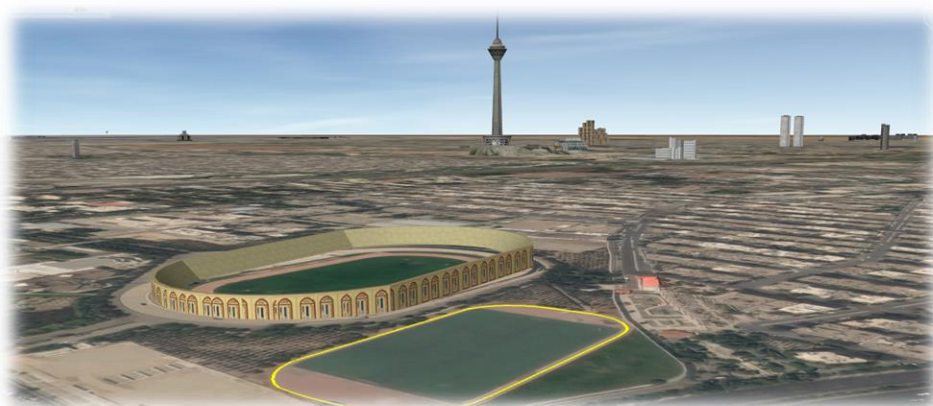
همانطور که در بخش قبل بیان شد، برای شناسایی نوع حرکت از الگوریتم DTW استفاده گردید. برای درک بهتر نحوه کارکرد این الگوریتم ابتدا یک سیگنال واحد، در دو نقش، هم به عنوان داده آموزشی و هم به عنوان داده آزمایشی در الگوریتم وارد شد. مطابق شکل (۱۲) یک بار اندازه دو سیگنال براساس شکل (۱۲-الف) برابر و بار دیگر اندازه سیگنال آزمایشی مطابق شکل (۱۲-ب) $1/5$ برابر اندازه سیگنال آموزشی در نظر گرفته شد. ماتریس هزینه کلی در حالتی که طول دو سیگنال برابر باشد، صفر و در حالتی که طول آن‌ها نابرابر باشد، غیرصفر بدست آمده است. می‌توان نتیجه گرفت انتخاب هم اندازه داده آموزشی و آزمایشی الگوریتم DTW را بهینه می‌کند. از آنجاییکه اندازه سیکل کامل در سه حرکت این پژوهش متفاوت است؛ بنابراین این خصوصیت DTW تشخیص نوع حرکت را بهبود می‌دهد.

تخمین طول گام

مطابق رابطه (۲)، طول گام از ضریب K (ضریب وینبرگ) در ریشه



شکل ۱۲: مقایسه ماتریس هزینه در حالت‌های (الف) تساوی و (ب) نامتساوی بودن طول دو سیگنال
Fig. 12: Comparison of Cost Matrices for (a) Equal-Length Signals and (b) Unequal-Length Signals



شکل ۱۳: برآورد ضریب K در پیاده‌روی عادی پیرامون زمین چمن دانشکده تربیت بدنی دانشگاه تهران (کادر زرد) به طول ۳۸۳/۲۰ متر
Fig. 13: Estimation of the K Coefficient from Normal Walking Around the Football Field of the Faculty of Physical Education, University of Tehran (Highlighted by the Yellow Box), Covering a Distance of 383.20 m

جدول ۱: ضریب K مدل وینبرگ حاصل از کمترین مربعات و میانگین‌گیری در سه حالت حرکت

Table 1: Weinberg Model K Coefficient Estimated Using the Least Squares Method and Averaging Across Three Motion Modes.

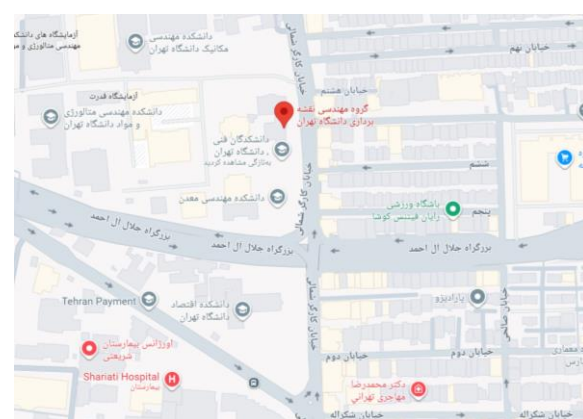
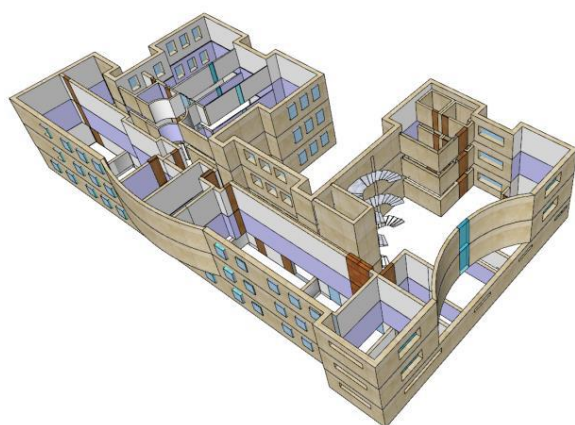
سینه‌خیز	چهاردست و پا	پیاده‌روی عادی	نوع حرکت
Prone Crawling	Crawling on Hands and Knees	Normal Walking	Movement Mode
۰/۲۱۰۷۹۰۲	۰/۱۶۹۳۹۸۵	۰/۳۲۶۱۷۳۴۶۵	ضریب K برآورد شده
0.2107902	0.1693985	0.326173465	Estimated K Coefficient



شکل ۱۴: نقشه پلان طبقه دوم دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی و مسیر حرکت (خط سبز رنگ)
Fig. 14: the Second Floor Plan of the Faculty of Surveying and Geospatial Engineering, and the Walking Trajectory (Green Line)

Table 2: Estimated Path Length and Positioning Accuracy Results for the Walking Trajectories on the Second Floor of the Faculty

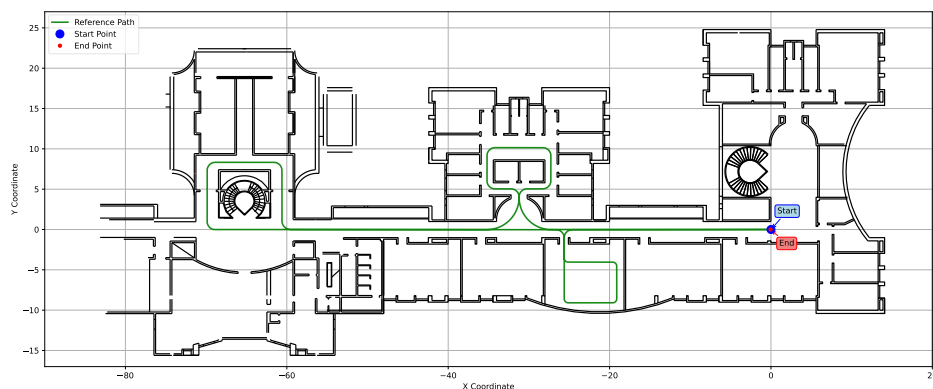
Table 2: Estimated Path Length and Positioning Accuracy Results for the Walking Trajectories on the Second Floor of the Faculty											
ترکیب سه حرکت			پیاده‌روی غیر معمول				پیاده‌روی عادی				
Combination of the Three Movements Modes			Unconventional Walking				Normal Walking				
برآوردی - Estimated											
خطا(درصد)	برآوردی	واقعی	طول(متر)	کلی	سینه‌خیز	چهاردست و پا	واقعی	خطا(درصد)	برآوردی	واقعی	طول (متر)
Errorr(%)	Estimated	Real	Length (m)	Overall	Prone Crawling	Crawling on Hands and Knees	Actual	Errorr(%)	Estimated	Actual	Length (m)
۰/۰۲	۲۶۴/۲۰۶	۲۶۴/۲۵۵	۰/۱۰	۲۰/۲۶۱	۱۰/۵۶۱	۹/۷۰۰	۲۰/۴۵۹	۰/۰۶	۲۴۳/۶۴۴	۲۴۳/۷۹۶	برداشت ۱
0.02	264.206	264.255	0.10	20.261	10.561	9.700	20.459	0.06	243.644	243.796	Measurmeten 1
۰/۲۰	۲۶۳/۷۳۳	۲۶۴/۲۵۵	۲/۴۱	۲۰/۹۵۳	۱۱/۶۰۷	۹/۳۴۶	۲۰/۴۵۹	۰/۴۲	۲۴۲/۷۸۰	۲۴۳/۷۹۶	برداشت ۲
0.20	263.733	264.255	2.41	20.953	11.607	9.346	20.459	0.42	242.780	243.796	Measurmeten 2
۰/۲۸	۲۶۳/۵۰۲	۲۶۴/۲۵۵	۳/۲۱	۱۹/۸۰۳	۹/۴۰۴	۱۰/۳۹۹	۲۰/۴۵۹	۰/۰۴	۲۴۳/۷۰۱	۲۴۳/۷۹۶	برداشت ۳
0.28	263.502	264.255	3.21	19.803	9.404	10.399	20.459	0.04	243.701	243.796	Measurmeten 3
۰/۱۷	۲۶۳/۸۱۴	۲۶۴/۲۵۵	۱/۹۰۶	۲۰/۳۳۹	۱۰/۵۲۴	۹/۸۱۵	۲۰/۴۵۹	۰/۱۷	۲۴۳/۳۷۵	۲۴۳/۷۹۶	میانگین
0.17	263.814	264.255	1.906	20.339	10.524	9.815	20.459	0.17	243.375	243.796	Avg



شکل ۱۵: موقعیت ساختمان مرکزی در نقشه Google و مدل طراحی شده در Sketchup

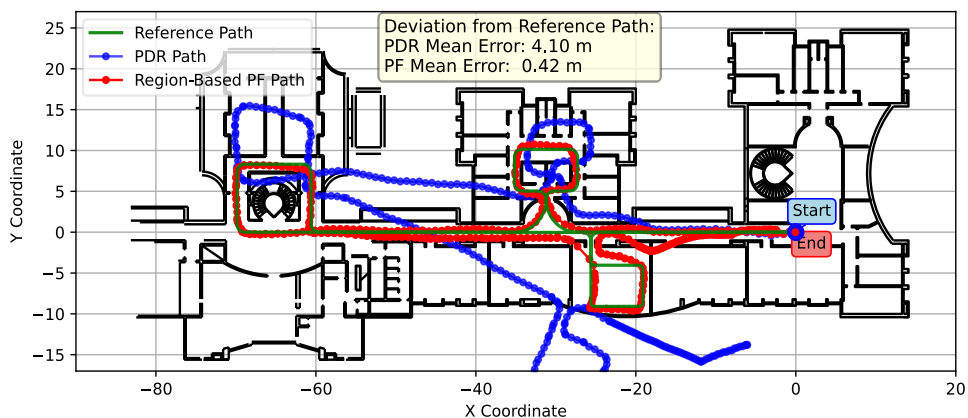
با محاسبه میانگین وزنی خطاها در هر سه سناریو، مشخص می‌شود که میانگین خطای سیستم PDR خام به حدود ۲/۹۷ متر می‌رسد، در حالی که میانگین خطای نهایی پس از اعمال الگوریتم تطبیق نقشه به ۰/۳۵ متر کاهش پیدا کرده است که به طور متوسط حاکی از جبران حدود ۸۸/۳۵ درصد از خطای موقعیتیابی خام در محیط‌های ساختاریافته می‌باشد. هرچند که در برخی شرایط خاص و با در نظر گرفتن سناریوهای تکمیلی، میزان بهبود تا حدود ۹۳ درصد نیز مشاهده شده است.

در سناریوی حرکت ترکیبی در مسیر تک‌کلاسه با طول واقعی ۲۱۴/۲۵۰ متر، سیستم پیشنهادی طول مسیر را ۲۱۱/۵۱۷ متر محاسبه کرده که منجر به بروز خطای میانگین ۴/۱۰ متر گردیده است، در حالی که با اعمال الگوه، بنم تطبیق، نقشه، این خطا به میزان قابل توجهی به



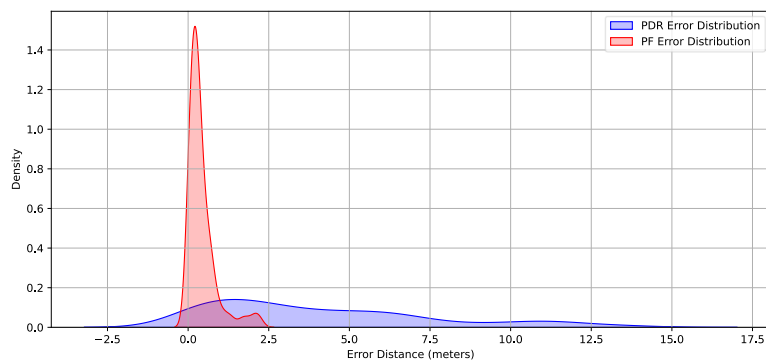
شکل ۱۶: پلان طبقه دوم و نقاط شروع و پایان، مسیر حرکت

Fig. 16: Second-Floor Plan Showing the Start and End Points and the Walking Trajectory



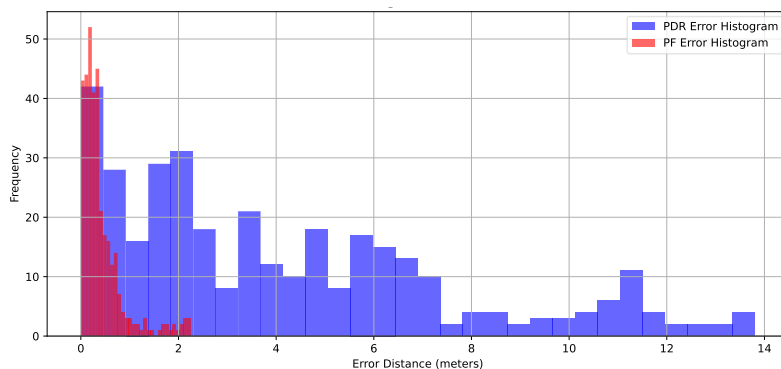
شکل ۱۷: موقعیت‌یابی و میانگین دقت مسیر برداشت شده با دو رویکرد PDR و تطبیق نقشه

Fig. 17: Positioning Results and Mean Positioning Accuracy Using the PDR and Map Matching Approaches



شکل ۱۸: نمودار توزیع خطا در موقعیت‌یابی مسیر

Fig. 18: Error Distribution of the Positioning Trajectory



شکل ۱۹: نمودار هیستوگرام خطا در موقعیت‌یابی مسیر

Fig. 19: Histogram of Positioning Errors

جدول ۴: نتایج حاصل از پیاده‌سازی دو رویکرد PDR و الگوریتم تطبیق نقشه

Table 4: Results of the PDR and Map Matching Approaches

خطای میانگین Average Error		طول محاسبه‌ای (m) Estimated Length (m)	طول واقعی (m) Actual Length (m)	نام سناریوی Scenario
Map Matching(m)	PDR(m)			
۰/۴۲	۴/۱۰	۲۱۱/۵۱۷	۲۱۴/۲۵۰	حرکت ترکیبی در مسیر
0.42	4.10	211.517	214.250	Combined movement

فیلتر ذرات در تلفیق با نقشه‌های ساختاریافته برای اصلاح خطای انباشتی سیستم‌های PDR است و این الگوریتم می‌تواند به عنوان یک راهکار عملی و مؤثر برای بهبود دقت ناوبری داخلی مورد استفاده قرار گیرد، به گونه‌ای که میانگین خطای نهایی کمتر از ۰/۵۰ متر در هر سه سناریوی آزمایش‌شده، گویای عملکرد پایدار و قابل اتکای این روش در شرایط مختلف حرکتی بوده و امکان استفاده از آن را در کاربردهای حساس به دقت مانند ردیابی اضطراری، هدایت بصری افراد کم‌بینا و تحلیل دقیق الگوهای حرکتی در محیط‌های داخلی فراهم می‌آورد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پیاده‌سازی مراحل مختلف پژوهش نشان داد که هر یک از مؤلفه‌های اصلی روش PDR، شامل قطعه‌بندی سیگنال، تشخیص گام، شناسایی نوع حرکت، برآورد طول گام، تعیین جهت حرکت و در نهایت تلفیق موقعیت با نقشه، نقشی تعیین‌کننده در دقت نهایی موقعیت‌یابی دارند. تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از داده‌های برداشت‌شده در محیط واقعی نشان می‌دهد که هر مرحله از بهینه‌سازی انجام‌شده، تأثیر مستقیمی بر کاهش خطای تجمعی و افزایش پایداری روش دارد.

در مرحله‌ی قطعه‌بندی سیگنال‌ها، استفاده از الگوریتم‌های PELT و FPOP همراه با رویکرد آماری باعث افزایش دقت در شناسایی نقاط تغییر و تفکیک صحیح بازه‌های حرکتی از بازه‌های گذار شد. این بهبود موجب گردید که بخش‌های معنادار حرکتی بدون حذف داده‌های مهم استخراج شوند و خطاهای ناشی از تداخل حرکات مختلف کاهش یابد.

در فرآیند تشخیص گام‌ها، ترکیب روش‌های آماری با الگوریتم تشخیص قله، موجب شناسایی دقیق‌تر چرخه‌های حرکتی و جلوگیری از شمارش نادرست گام در حرکات غیرعادی مانند چهارپایه‌ها و سینه‌خیز شد. این بهینه‌سازی به‌طور میانگین دقت شمارش گام را به بیش از ۹۸ درصد افزایش داد.

در گام بعد، الگوریتم DTW برای تشخیص نوع حرکت بهینه‌سازی شد و توانست در داده‌های آزمایشی سه نوع حرکت موردنظر را با دقتی بیش از ۹۵ درصد تشخیص دهد. این میزان صحت، بیانگر توان الگوریتم در تمایز دادن رفتارهای حرکتی در شرایط بحرانی است.

محاسبه‌ی طول گام با مدل وینبرگ و بهینه‌سازی ضریب k با روش کمترین مربعات نیز موجب شد خطای برآورد طول مسیر در حرکات ساده به ۰/۱۷ درصد و در حرکات ترکیبی به حدود ۰/۱۷ درصد میانگین نسبی برسد. این امر نشان‌دهنده‌ی پایداری مدل در شرایط متغیر حرکتی است.

این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که الگوریتم تطبیق نقشه مبتنی بر فیلتر ذرات با استفاده از اطلاعات ساختاری محیط نظیر پلان طبقات، موقعیت دیوارها، راهروها و گره‌های مجاز حرکت، با محدود کردن موقعیت‌های ممکن به مناطق قابل تردد و حذف ذراتی که در نواحی غیرمجاز مانند داخل دیوارها یا خارج از مسیرهای تعیین‌شده قرار می‌گیرند، توانسته است از انحراف تجمعی ناشی از خطاهای انباشتی سنسورهای اینرسی شامل شتاب‌سنج، ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنج جلوگیری نموده و دقت نهایی موقعیت‌یابی را به سطح زیر ۰/۵۰ متر برساند که این میزان دقت برای کاربردهای ناوبری عابر پیاده در محیط‌های بسته مانند مراکز خرید، بیمارستان‌ها، فرودگاه‌ها و ساختمان‌های اداری کاملاً قابل قبول و مناسب ارزیابی می‌شود.

در ادامه و به منظور بهینه‌سازی عملکرد الگوریتم از نظر تعادل بین دقت و هزینه محاسباتی، تأثیر پارامتر تعداد ذرات در فیلتر ذرات به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد با افزایش تعداد ذرات از ۱۰۰ به ۱۰۰۰، خطای میانگین نهایی از مقدار ۰/۳۷ متر به ۰/۲۷ متر کاهش می‌یابد که بهبودی معادل ۲۷ درصد را به همراه داشته و زمان اجرا نیز به حدود ۳/۲ برابر حالت مرجع افزایش پیدا می‌کند. اما با افزایش بیشتر تعداد ذرات به ۱۰۰۰۰، خطای میانگین تنها از ۰/۲۷ به ۰/۲۶ متر کاهش می‌یابد که بهبودی ناچیز و برابر با ۳/۷ درصد محسوب می‌شود. در حالی که زمان اجرا به طور قابل ملاحظه‌ای به حدود ۲۸/۵ برابر حالت اولیه افزایش می‌یابد. این افزایش زمان در کاربردهای بلادرنگ با توان پردازشی محدود مانند گوشی‌های هوشمند و دستگاه‌های پوشیدنی غیرقابل توجیه بوده و نشان‌دهنده وجود یک نقطه بهینه در تعداد ذرات ۱۰۰۰ است که در آن نسبت سود حاصل از افزایش دقت به هزینه محاسباتی بیشترین مقدار خود را دارد. بنابراین با توجه به تحلیل جامع انجام‌شده، تعداد ذرات ۱۰۰۰ به عنوان مقدار بهینه برای پیاده‌سازی عملی این الگوریتم در سیستم‌های ناوبری لحظه‌ای پیشنهاد می‌گردد، هرچند که در شرایط آفلاین و با وجود توان پردازشی کافی، می‌توان از تعداد ذرات ۱۰۰۰۰ برای دستیابی به دقتی در حدود ۲۶ سانتی‌متر استفاده کرد، اما با توجه به افزایش چشمگیر زمان پردازش، این انتخاب تنها در کاربردهای غیربلادرنگ توجیه‌پذیر خواهد بود.

لازم به ذکر است که عملکرد نهایی الگوریتم به شدت به کیفیت نقشه ورودی و دقت هم‌ترازی آن با سیستم مختصات جهانی وابسته بوده و در محیط‌های با ساختار نامنظم یا فضاهای باز، میزان کاهش خطا ممکن است تا حدودی کمتر از مقادیر گزارش‌شده باشد. با این وجود، نتایج کسب‌شده در مجموع نشان‌دهنده کارایی بسیار بالای روش مبتنی بر

سوم، پیشنهاد می‌شود در ادامه‌ی این پژوهش، داده‌های حرکتی توسط چند کاربر با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت (قد، وزن و الگوی گام) برداشت شود تا میزان پایداری الگوریتم در برابر تنوع کاربران ارزیابی گردد. در این تحقیق به منظور حفظ همگنی داده‌ها و کنترل متغیرهای مؤثر بر دقت، برداشت داده تنها توسط یک کاربر انجام شد. این تصمیم به لحاظ روش‌شناسی به دستیابی به داده‌های هم‌پراکنش و تکرارپذیر کمک کرد؛ با این حال، مقایسه‌ی چندکاربره می‌تواند در آینده مبنایی برای توسعه‌ی الگوریتم‌های شخصی‌سازی‌شده PDR و مدل‌سازی تفاوت‌های حرکتی افراد باشد.

افزون بر این، توسعه‌ی رویکردهای ترکیبی مبتنی بر یادگیری ماشین برای پیش‌بینی تطبیقی ضریب گام در شرایط حرکتی مختلف و ادغام نتایج با الگوریتم‌های فیلتر ذرات، می‌تواند مسیر جدیدی برای افزایش دقت و کاهش خطای تجمعی در سامانه‌های PDR فراهم آورد.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت سهم برابر مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

منابع و مأخذ

- [1] M. F. R. Al-Okby, S. Junginger, T. Roddelkopf, and K. Thurow, "UWB-based real-time indoor positioning systems: A comprehensive review," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 23, p. 11005, 2024.
- [2] M. N. Khan, O. Gilani, and M. Jamil, "Photo Detector Based Indoor Positioning Systems Variants," in *2018 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT)*, 2018: IEEE, pp. 1–6.
- [3] C. Sandamini et al., "A review of indoor positioning systems for UAV localization with machine learning algorithms," *Electronics*, vol. 12, no. 7, p. 1533, 2023.
- [4] L. Huang, H. Li, W. Li, W. Wu, and X. Kang, "Improvement of Pedestrian Dead Reckoning Algorithm for Indoor Positioning by using Step Length Estimation," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 48, pp. 19–24, 2022.
- [5] A. Obretin, "Infrastructure free indoor positioning system," in *Proceedings of the International Conference on Business Excellence*, 2020, vol. 14, no. 1: Sciendo, pp. 124–133.
- [6] Q. Wang, H. Luo, A. Men, F. Zhao, and Y. Huang, "An infrastructure-free indoor localization algorithm for smartphones," *Sensors*, vol. 18, no. 10, p. 3317, 2018.
- [7] C. Li, J. Zhen, and J. Wu, "An indoor positioning method based on bluetooth array/PDR fusion using the SVD-EKF," *Scientific reports*, vol. 15, no. 1, p. 4579, 2025.

در بخش تخمین جهت حرکت، استفاده از الگوریتم گرادیان کاهشی و تلفیق داده‌های سه حسگر شتاب‌سنج، ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنج باعث کاهش محسوس خطاهای جهت‌یابی ناشی از تداخلات مغناطیسی شد.

در نهایت، اجرای مرحله‌ی تطبیق نقشه با فیلتر ذرات موجب کاهش قابل توجه خطای موقعیت‌یابی نهایی گردید؛ به گونه‌ای که خطای میانگین از حدود $1/04 \pm 2/97$ متر در روش PDR پایه به $0/35 \pm 0/07$ متر در رویکرد نهایی پژوهش کاهش یافت. این بهبود معادل کاهش بیش از ۸۵ درصدی خطای موقعیت‌یابی است که نشان‌دهنده‌ی اثربخشی ترکیب روش‌های آماری و فیلتر ذرات در جبران خطای تجمعی است.

به طور کلی، نتایج پژوهش تأیید می‌کند که با طراحی زنجیره‌ای از الگوریتم‌های هوشمند برای هر مرحله از پردازش سیگنال‌های حرکتی، می‌توان دقت روش PDR را در محیط‌های داخلی به میزان چشمگیری افزایش داد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که حتی در صورت تغییر حالت حرکتی یا نحوه‌ی حمل دستگاه، سامانه‌ی پیشنهادی قادر است موقعیت‌یابی پایدار و دقیق را در شرایط بحرانی فراهم کند.

یافته‌های این پژوهش نشان داد که روش PDR مبتنی بر حسگرهای گوشی هوشمند می‌تواند در موقعیت‌یابی داخلی با دقت بالا و پایداری مناسب مورد استفاده قرار گیرد، با این حال برخی محدودیت‌ها و مسیرهای توسعه‌ی آتی وجود دارد که می‌توانند کارایی این رویکرد را ارتقا دهند.

نخست، با توجه به اینکه در تحقیق حاضر تمرکز بر تعیین موقعیت دو بعدی بوده است، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از گوشی‌های هوشمند مجهز به حسگر فشارسنج استفاده شود تا امکان برآورد اختلاف ارتفاع و تشخیص تغییر طبقات در محیط‌های چندسطحی فراهم گردد. در این پژوهش به دلیل محدودیت سخت‌افزاری و تمرکز بر ارزیابی افقی موقعیت، تحلیل سه‌بعدی انجام نشده است. در حالی که ترکیب داده‌های فشارسنج با خروجی‌های شتاب‌سنج و ژيروسکوپ می‌تواند موقعیت‌یابی را از حالت دوبعدی به مدل سه‌بعدی پویا ارتقا دهد و قابلیت کاربرد روش در ساختمان‌های چندطبقه را افزایش دهد.

دوم، با توجه به آن‌که در این تحقیق تنها دو نوع حرکت غیرمعمول (چهاردست‌وپا و سینه‌خیز) مورد بررسی قرار گرفته است، پیشنهاد می‌شود حرکات غیرمعمول دیگری که در شرایط واقعی بحران ممکن است رخ دهند، مانند لغزش روی زمین، حرکت با مانع، یا خیز کوتاه، در مجموعه‌ی داده‌های آموزشی گنجانده شوند. اجرای این بخش نیازمند طراحی آزمایش‌های کنترل‌شده و رعایت الزامات ایمنی برای کاربران است، از این‌رو در این پژوهش به دلیل ملاحظات ایمنی و دشواری برداشت میدانی، محدود به دو نوع حرکت شده است. با این حال، افزودن الگوهای حرکتی متنوع‌تر در آینده می‌تواند موجب افزایش پایداری مدل تشخیص حرکت و کاهش خطای طبقه‌بندی شود.

- [20] Y. Zhang, H. Li, Y. Wei, J. Wang, and H. Zhao, "A Heading Drift Correction Method for Pedestrian Inertial Positioning," *Journal of Sensor Technology*, vol. 13, no. 2, pp. 24–36, 2023.
- [21] R. Harle, "A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1281–1293, 2013.
- [22] J. Li, Z. Xie, X. Sun, J. Tang, H. Liu, and J. A. Stankovic, "An automatic and accurate localization system for firefighters," in *2018 IEEE/ACM Third International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI)*, 2018: IEEE, pp. 13–24.
- [23] Y. Zhao, J. Wang, and C. Duan, "Design and application research of mine underground disaster relief personnel positioning system based on MEMS sensor," in *International Conference on Neural Networks, Information, and Communication Engineering (NNICE 2022)*, 2022, vol. 12258: SPIE, pp. 695–704.
- [24] B. Khalili, R. Ali Abbaspour, and A. Chehreghan, "A Method for Improvement of PDR method using Smartphones Considering Pedestrian Properties," *Earth Observation and Geomatics Engineering*, vol. 7, no. 1, 2023.
- [25] E. Saadatzaheh, A. Chehreghan, and R. Aliabbaspour, "An Evaluation of Infrastructure-free and Infrastructure-based Indoor Positioning Methods with the Focus on Pedestrian Dead Reckoning," *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 205–233, 2020.
- [26] E. Saadatzaheh, R. Aliabbaspour, and A. Chehreghan, "Improvement of the Effective Components in the PDR Positioning Method Based on Detecting the User's Movement Mode Using Smartphone Sensors," *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 125–144, 2020.
- [27] C. O'Rourke and M. Madden, "Activity recognition based on accelerometer data using dynamic time warping with ensembles," in *Proceedings of AICS-2011, the 22 nd Conference on Artificial Intelligence and Cognitive Science*, 2011.
- [28] N. Kale, J. Lee, R. Lotfian, and R. Jafari, "Impact of sensor misplacement on dynamic time warping based human activity recognition using wearable computers," in *Proceedings of the conference on Wireless Health*, 2012, pp. 1–8. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2448096.2448103>
- [29] D. Avola et al., "Signal enhancement and efficient DTW-based comparison for wearable gait recognition," *Computers & Security*, vol. 137, p. 103643, 2024.
- [30] H. Weinberg, "Using the ADXL202 in pedometer and personal navigation applications," *Analog Devices AN-602 application note*, vol. 2, no. 2, pp. 1–6, 2002.
- [31] M. Kok and T. B. Schön, "A fast and robust algorithm for orientation estimation using inertial sensors," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 26, no. 11, pp. 1673–1677, 2019.
- [32] S. O. Madgwick, A. J. Harrison, and R. Vaidyanathan, "Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient
- [8] Y. Li, X. Niu, P. Zhang, H. Lan, Y. Zhuang, and N. El-Sheimy, "Smartphone-based indoor navigation using PDR and magnetic matching," in *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015)*, 2015, pp. 2060–2066.
- [9] E. Saadatzaheh, A. Chehreghan, and R. Ali Abbaspour, "Pedestrian dead reckoning using smartphones sensors: an efficient indoor positioning system in complex buildings of smart cities," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 42, pp. 905–912, 2019.
- [10] A. Chehreghan, E. Saadatzaheh, and R. A. Abbaspour, "Infrastructure-free indoor navigation based on smartphone sensors in smart buildings," *Journal of Location Based Services*, vol. 17, no. 2, pp. 145–184, 2023.
- [11] M. Wang et al., "Indoor PDR Positioning Assisted by Acoustic Source Localization, and Pedestrian Movement Behavior Recognition, Using a Dual-Microphone Smartphone," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, no. 1, p. 9981802, 2021.
- [12] C. Zhang, Z. Li, and X. Li, "Hybrid Wi-Fi/PDR Indoor Localization with Fingerprint Matching," *arXiv preprint arXiv:2505.08258*, 2025.
- [13] E. Saadatzaheh, R. Ali Abbaspour, and A. Chehreghan, "An improvement in smartphone-based 3D indoor positioning using an effective map matching method," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 1, no. 10, pp. 13741–13771, 2023.
- [14] M. H. AlSharif, M. Ahmed, M. Siala, and T. Y. Al-Naffouri, "Kalman Filtering for Precise Indoor Position and Orientation Estimation Using IMU and Acoustics on Riemannian Manifolds," *arXiv preprint arXiv:2409.01002*, 2024.
- [15] L. Cao, X. Luo, L. Liu, G. Wang, and J. Zhou, "Error compensation method for pedestrian navigation system based on low-cost inertial sensor array," *Sensors*, vol. 24, no. 7, p. 2234, 2024.
- [16] I. Klein, "Pedestrian inertial navigation: An overview of model and data-driven approaches," *Results in Engineering*, p. 104077, 2025.
- [17] J. Liu, Z. Yang, S. Zlatanova, S. Li, and B. Yu, "Indoor Localization Methods for Smartphones with Multi-Source Sensors Fusion: Tasks, Challenges, Strategies, and Perspectives," *Sensors*, vol. 25, no. 6, p. 1806, 2025.
- [18] Y. Yao, L. Pan, W. Fen, X. Xu, X. Liang, and X. Xu, "A robust step detection and stride length estimation for pedestrian dead reckoning using a smartphone," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 17, pp. 9685–9697, 2020.
- [19] S. Vandermeeren, H. Bruneel, and H. Steendam, "Feature selection for machine learning based step length estimation algorithms," *Sensors*, vol. 20, no. 3, p. 778, 2020.

مورد علاقه ایشان داده کاوی مکانی-زمانی، هوش مصنوعی مکانی، یادگیری ماشین، بهینه‌سازی مکانی، اطلاعات مکانی داوطلبانه و خدمات مکان مبنا (LBS) است. تاکنون بیش از ۱۰۰ مقاله در کنفرانسها و نشریات معتبر در حوزه علوم اطلاعات مکانی از وی منتشر شده است.

Ali Abbaspour, R. Associate Professor at School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

✉ abaspour@ut.ac.ir



علیرضا چهرقان دانشیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی سهند (تبریز) می‌باشد. ایشان مدرک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی عمران- نقشه‌برداری و در گرایش سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS) بترتیب در سال‌های ۱۳۸۸،

۱۳۹۰ و ۱۳۹۶ از دانشگاه تهران دریافت نمودند. فعالیت‌های پژوهشی اخیر وی در حوزه GeoAI، اطلاعات مکانی داوطلبانه (VGI)، داده کاوی مکانی و محاسبات هندسی می‌باشد. در حال حاضر ایشان بیش از ۸۰ مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های معتبر ارائه نموده‌اند.

Chehregan, A. Associate Professor of GIS, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

✉ Chehregan@sut.ac.ir

descent algorithm," in *2011 IEEE international conference on rehabilitation robotics*, 2011: IEEE, pp. 1-7.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



سیدعلی نوبخت فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی نقشه برداری و کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی از دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی دانشکده فنی دانشگاه تهران است. موضوع تحقیقاتی مورد علاقه وی تعیین موقعیت در محیط‌های داخل ساختمان است.

Nobakht, S.A. School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

✉ s.alinobakht@ut.ac.ir



رحیم علی عباسپور در سال ۱۳۸۹ موفق به کسب درجه دکتری سیستم‌های اطلاعات مکانی از دانشگاه تهران گردید و از سال ۱۳۹۰ به عنوان عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی دانشکده فنی دانشگاه تهران در حال آموزش و پژوهش است. زمینه‌های پژوهشی

Citation (Vancouver): Nobakht S.A, Ali Abbaspour R, Chehregan A. [Improving the Accuracy of PDR Based Indoor Positioning in Emergency Scenarios by Modeling Complex Human Movement Behaviors]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2026; 4(1): 153-170

doi <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2026.113118.1130>



COPYRIGHTS

© 2026 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)