ICWR2022
May 11-12, 2022; Tehran, Iran
8th International Conference on Web Research

Beacon-Based Indoor Positioning Using Machine Learning In Smart Proximity Marketing

Zahra Movahedi

Assistant Professor
Department of Computer Engineering, School of Engineering, College of Farabi, University of Tehran, Iran
zmovahedi@ut.ac.ir

Abstract

With the proliferation of smartphones, smart solutions to various problems have been provided. Today, due to the large volume of out-of-home advertising, its impact on the audience has decreased. Smartphones are a suitable and new tool to display and increase the effectiveness of this type of advertising because of their power of customization. Out-of-home advertisements are displayed instantly on the user's mobile phone when being in indoor places such as stores. One of the challenges is to calculate the exact location of the user in indoor places due to improper functionality of GPS signals.

In this article, an indoor location-based solution using BLE beacon signals is proposed. The proposed method includes decreasing signal fluctuation, send and receive data simultaneously through beacon devices equipped with low-power Bluetooth (BLE) technology, and finally build an efficient model to predict the user location using decision tree algorithms. According to the implementation results, the indoor positioning is achieved with an accuracy of 1 meter and 13 cm within a specified range and with only 8 beacons, and in 98% of cases, the predicted point is correct.

Keywords: Indoor Positioning, Smart Out-Of-Home Advertising, Bluetooth Low Power, Beacon, Machine Learning, Kalman Filter, Fingerprint

ICWR2022
May 11-12, 2022; Tehran, Iran
8th International Conference on Web Research

استفاده از یادگیری ماشین برای مکان‌یابی داخلی براساس فناوری بیکن در کاربرد تبلیغات محیطی هوشمند

زهرا موحدی

استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده‌ی مهندسی، دانشکدگان فارابی، دانشگاه تهران
zmovahedi@ut.ac.ir

چکیده

با همه‌گیر شدن تلفن‌های همراه هوشمند، راهکارهای هوشمند برای مسائل مختلف ارائه شده است. امروزه، با توجه به حجم زیاد تبلیغات محیطی، تاثیر آن بر مخاطب کاهش پیدا کرده است. تلفن‌های هوشمند به دلیل امکان شخصی‌سازی، ابزار مناسب و جدیدی برای نمایش و افزایش اثرگذاری این نوع تبلیغات می‌باشد. تبلیغات محیطی در خارج از خانه‌ی مخاطب و در محل حضور وی در مکان‌های بسته‌ای مانند فروشگاه‌ها و به‌صورت آنی، در تلفن همراه کاربر نمایش داده می‌شود. یکی از چالش‌های موجود، محاسبه‌ی مکان دقیق کاربر به دلیل عدم کارکرد صحیح GPS در مکان‌های بسته می‌باشد.

در این مقاله، راهکاری جهت نمایش تبلیغات محیطی هوشمند به کاربر، در قالب یک سرویس مبتنی بر مکان، ارائه شده است. روش پیشنهادی شامل راه حلی برای مبارزه با نویز و نوسان سیگنال‌ها، ارسال و دریافت اطلاعات از طریق دستگاه‌های بیکن مجهز به تکنولوژی بلوتوث کم مصرف (BLE) و در نهایت ساخت یک مدل کارآمد با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین درخت تصمیم است. با توجه به نتایج پیاده‌سازی، مکان‌یابی داخلی با دقت ۱ متر و ۱۳ سانتی‌متر در محدوده‌ی مشخص‌شده و فقط با ۸ دستگاه بیکن حاصل شده‌است و در ۹۸ درصد مواقع، نقطه‌ی پیش‌بینی شده صحیح است.

کلمات کلیدی

مکان‌یابی داخلی، تبلیغات محیطی هوشمند، بلوتوث کم مصرف، بیکن، یادگیری ماشین، فیلتر کالمن، اثر انگشت

۱- مقدمه

با همه‌گیر شدن تلفن‌های هوشمند، تبلیغات محیطی هوشمند روز به روز در حال گسترش است. این نوع تبلیغات، در خارج از خانه و بر اساس مکان کاربر نمایان می‌شود. یعنی مشتری به‌وسیله‌ی تلفن همراه هوشمند خود، به محض گذر از یک نقطه‌ی خاص در محیط بسته، پیامی را دریافت می‌کند. از لحاظ اثرگذاری، هر چه مشتری در لحظه‌ی دیدن تبلیغ، فاصله‌ی فیزیکی‌اش تا کالا یا سرویس مدنظر کمتر باشد، احتمال خرید آن کالا یا استفاده از آن سرویس بیشتر است. همچنین در این روش امکان شخصی‌سازی تبلیغات نیز وجود دارد. این نوع تبلیغات با تمرکز بر مشتریانی که در حال حرکت یا انتظار در محیط‌های عمومی هستند، به کار می‌رود. معرفی برند و افزایش فروش و همچنین هدفگیری مشتری در مراکز تصمیم‌گیری، از مزایای این روش است.

به‌طور کلی برای ارائه‌ی سرویس‌های مبتنی بر مکان، لزوم پیدا کردن مکان سوژه امری ضروری است. فارغ از سرویس‌های مبتنی بر مکان، اطلاعات مکان کاربر بُعد جدید از زمینه‌ی کاربر ارائه می‌دهد. این لایه‌ی معنایی در سیستم‌های مبتنی بر محتوا[1] ضروری و مفید است. به‌طور مثال، در علم پزشکی، شناخت نوع فعالیت بیماران (خوردن، خوابیدن، استراحت و ...) در دوران نقاهت، نقش بسزایی در شناسایی مشکلات این دوره و تسریع بهبود بیماران دارد. حال آن‌که تشخیص این فعالیت‌ها نیازمند عوامل مختلف از جمله مکان بیمار (آشپزخانه، اتاق، پذیرایی و ...) می‌باشد.

مهمترین چالش در پیاده‌سازی اینگونه تبلیغات، پیداکردن مکان دقیق کاربر در محیط بسته می‌باشد چراکه اکثر کسب‌وکارهای هدف مانند فروشگاه‌ها، فرودگاه و .. در مکان‌های سرپوشیده قرار دارند و امکان استفاده از GPS غیرممکن است. همچنین روش استفاده شده باید به قدرکافی بهینه و کم هزینه باشد تا در عمل بتواند پاسخگویی برخط داشته باشد.

اخیرا کارهای زیادی در زمینه‌ی مکان‌یابی کاربر در محیط‌های داخلی با هدف افزایش دقت مکان به‌دست آمده با بهینه‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش انجام شده است [4]–[1]. به‌طور کلی، روش‌های مکان‌یابی داخلی به دو روش تقسیم‌بندی می‌شوند: ۱) بدون استفاده از امواج و ۲) با استفاده از تکنولوژی بی‌سیم. مکان‌یابی مغناطیسی یکی از روش‌های دسته‌ی اول است که از مغناطیس‌سنج و اندازه‌گیری اینرسی استفاده می‌شود. به‌دلیل عدم نیاز به زیرساخت خاص و منحصر به فرد بودن ویژگی‌های مغناطیسی در هر نقطه از مکان، این روش قابل توجه است. ولی طبیعت اطلاعات مغناطیسی پایدار نیست و این روش نمی‌تواند نتایج قابل اتکا تولید کند. مکان‌یابی تصویری یکی دیگر از روش‌های بدون استفاده از امواج است. در این روش، از روی تصویر محیط اطراف سوژه، ویژگی‌های آن استخراج شده و به‌وسیله‌ی آن مکان کاربر تخمین زده می‌شود. همانطور که مشخص است، حجم پردازش در این روش بالاست و بعضا نیاز به تلفیق الگوریتم‌های مختلف با پردازش تصویر برای حصول نتیجه‌ی نهایی لازم است. همچنین، خرید تجهیزات و دوربین‌های متعدد جهت بالابردن دقت، هزینه‌ی عملیاتی این روش را افزایش می‌دهد. در دسته‌ی دوم، مکان‌یابی مبتنی بر وای‌فای و مبتنی بر بلوتوث قرار دارد. در روش اول حتما به نقطه‌ی دسترسی[۲] نیاز است. مکان این نقاط دسترسی مشخص است. سپس با اندازه‌گیری قدرت سیگنال دریافتی از این نقاط دسترسی، مکان سوژه تخمین زده خواهد شد. هزینه‌ی مالی این روش بالاست چراکه برای دقت کافی، نیاز به نصب و راه‌اندازی نقاط دسترسی زیاد خواهد بود. در روش مبتنی بر بلوتوث نیز از قدرت سیگنال دریافتی در محیط جهت تخمین مکان مشتری استفاده می‌شود. راه‌اندازی این روش نیاز به پخش سیگنال‌های بلوتوث در محیط دارد که توسط تراشه‌های موسوم به بیکن[۳] انجام می‌گیرد.

بیکن در لغت به معنای نوری مانند فانوس است که انسان‌ها، کشتی‌ها و وسایل نقلیه را بسمتی هدایت می‌کند. دستگاه‌های بیکن با عملکردی مشابه، تراشه‌های کوچک فرستنده‌ی امواج رادیویی بلوتوثی هستند. این دستگاه‌ها سیگنال‌های بلوتوث را در قالب بسته‌هایی در محیط پخش می‌کنند. همانند فانوس، اینکه دستگاهی این سیگنال‌ها را دریافت کند یا نه اهمیتی ندارد و این دستگاه‌ها به‌طور مداوم و بدون نیاز به برقراری هیچ ارتباط خاصی، بسته‌ها را به محیط ارسال می‌کنند. دستگاه‌هایی مانند تلفن‌های هوشمند که مجهز به بلوتوث می‌باشند، می‌توانند این بسته‌ها را در صورتی‌که در مجاورت بیکن‌ها باشند، دریافت کنند. از آنجاییکه بیکن‌ها از بلوتوث نسل چهارم (BLE[۴]) استفاده می‌کنند، از نظر مصرف انرژی و هزینه مناسب هستند. همچنین، کوچک بودن این تراشه‌ها، امکان نصبشان در موقعیت‌های مختلف را فراهم می‌آورد و از این رو برای استفاده در مکان‌یابی داخلی مناسب است. از جمله پروتکل‌های مهم در بیکن‌ها می‌توان به iBeacon (شرکت اپل)، Eddystone (شرکت گوگل)، و دو پروتکل متن باز AltBeacon (شرکت Radius Network) و GeoBeacon (شرکت Tecno-World) اشاره کرد.

پارامترهای قابل تغییر در بیکن‌ها شامل موارد زیر می‌شود: ۱) نام بیکن ۲) شناسه‌ی یکتای بیکن موسوم به UUID می‌باشدکه یک عدد ۱۲۸ بیتی است و برای شناسایی بیکنی که بسته را منتشر کرده است استفاده می‌شود. ۳) major و minor همانند UUID ها برای شناسایی بیکن در زیر محیط‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مثلا، تمامی بیکن‌ها در یک طبقه دارای major یکسان اما در هر اتاق minor متفاوت دارند. ۴) فواصل پخش سیگنال: سیگنال‌های می‌توانند در فواصل زمانی متفاوت در محیط پخش شوند. فاصله‌ی زمانی کوتاهتر با توجه به پویایی محیط و حرکت سریع گیرنده‌ها (در اینجا کاربران) امری ضروری است ولی میزان باتری مصرفی بیشتر شده و سیگنال ممکن است پایدار نباشد. در اینجا نیاز به یک تعادل در تنظیم این پارامتر وجود دارد. ۵) قدرت سیگنال دریافت‌شده یا به اختصار RSSI که محدوده دریافت سیگنال توسط دیگر دستگاه‌ها را مشخص می‌کند. هر چه قدرت ارسال زیادتر باشد، باتری مصرفی بیشتر است. RSSI مهمترین پارامتر دریافت‌شده از بیکن‌هاست که جهت مکان‌یابی کاربر از آن استفاده می‌شود. هر چند باید توجه داشت که تاثیر عوامل محیطی مانند دما و رطوبت، باعث به‌وجودآمدن نوسان در سیگنال‌های دریافتی و در نهایت کاهش دقت در محاسبه‌ی مکان کاربر می‌شود. از این رو، استفاده از روشی جهت رفع نوسان سیگنال‌ها ضروری است.

دو روش مکان‌یابی بوسیله‌ی بیکن وجود دارد: ۱) روش سه‌جانبه و ۲) روش انگشت‌نگاری. در روش سه‌جانبه، مکان سوژه از طریق محاسبه‌ی فاصله با سه نقطه‌ی منحصر به فرد بدست می‌آید. یعنی به سه بیکن که مکان آن‌ها بطور دقیق در نقشه مشخص است، نیاز می‌باشد. سپس میبایست فاصله از این بیکن‌ها را محاسبه کنیم. در روش انگشت‌نگاری، محیط تبدیل به یک فضای گسسته می‌شود؛ یعنی مکان کاربر فقط می‌تواند نقاط از پیش تعیین‌شده بروی نقشه باشد. این روش بر این اصل استوار است که در یک فاصله‌ی مشخص و ثابت از یک بیکن، مقدار سیگنال دریافتی آن ثابت است.

در این مقاله، روشی برای بالا بردن دقت مکان‌یابی کاربر در محیط‌های بسته طراحی و پیاده‌سازی شده است. طراحی سیستم به صورت دو مرحله‌ی آفلاین و آنلاین صورت گرفته است. در مرحله‌ی آفلاین، نقاط تعیین شده در نقشه، با توجه به سیگنال‌های دریافت شده از بیکن‌ها، برچسب مکانی خورده (اثرانگشت) و در دیتابیس ذخیره می‌گردند. در این مرحله، الگوریتمی برای جمع‌آوری داده‌ها از چند بیکن جهت ساخت اثر انگشت ارائه شده است. در مرحله‌ی آنلاین، مقادیر سیگنال دریافتی در تلفن همراه هوشمند کاربر خوانده شده و نزدیک‌ترین اثر انگشت به آن در دیتابیس، موقعیت مکانی کاربر را پیش‌بینی می‌کند. از یادگیری ماشین[۵] جهت بالابردن دقت مکان کاربردر این مرحله استفاده شده است. جهت برطرف کردن نویز و نوسانات محیطی سیگنال‌های دریافتی، از فیلتر کالمن استفاده شده است. سیستم پیشنهادی در یک محیط واقعی (طبقه‌ی دوم ساختمان مهندسی دانشکدگان فارابی دانشگاه تهران) به‌صورت پایلوت اجرا شده است. نتایج پیاده‌سازی، تخمین مکان کاربر را به ۱ متر و ۱۳ سانتی‌متر با دقت ۹۸ درصد نشان می‌دهد که نسبت به کارهای مشابه بهبود قابل توجهی می‌باشد.

ساختار مقاله به‌این صورت است: در بخش دوم، ادبیات کارهای انجام شده بررسی می‌شود. توصیف روش پیشنهادی در بخش سوم آورده شده است. بخش چهارم، پیاده‌سازی روش پیشنهادی و ارزیابی نتایج آن و مقایسه با کارهای پیشین می‌باشد. در بخش پنجم، نتیجه‌گیری و کارهای آینده مورد بحث قرار گرفته است.

۲- مرور ادبیات

در سال‌های اخیر، با گسترش کاربردهای مکان‌یابی داخلی مانند تبلیغات محیطی هوشمند، کارهای زیادی در این زمینه انجام شده است [1]. از روش‌های بدون امواج، می‌توان به [5] اشاره کرد. در این مقاله، اثر انگشت‌ها براساس میدان میغناطیسی ساخته می‌شوند. سپس با توجه به قدرت میدان مغناطیسی در پایگاه داده و تعیین یک حد آستانه، بعضی از نقاط به‌عنوان نقاط عطف شناسایی می‌شوند. سپس توسط یک شبکه‌ی یادگیری عمیق، داده‌ها دسته‌بندی شده و یک مدل با دقتی حدود ۸۰ درصد بدست می‌آید. در مقاله‌ی [6]، از روش تصویر برای مکان‌یابی استفاده شده است. ابتدا یک الگوریتم برای فشرده‌سازی تصاویر و استخراج ویژگی‌ها از آن طراحی شده است و تصاویر بهمراه برچسب و چند نوع اطلاعات دیگر مانند جهت دوربین و چرخش در پایگاه داده ذخیره می‌شوند. درمرحله‌ی مکان‌یابی، تصاویر از تلفن همراه به سرور فرستاده شده و پس از تحلیل، مکان کاربر بازگردانده می‌شود.

روش‌های انگشت‌نگاری و مثلث‌سازی (سه‌جانبه) از روی قدرت سیگنال دریافتی (RSSI[6]) متداول است. ولی نوسان در سیگنال‌های دریافتی موجب کاهش دقت در نتایج می‌شود. فیلتر کالمن[7] یکی از روش‌های افزایش پایداری در سیگنال‌های دریافتی است. مقاله‌ی [7] با استفاده از روش مثلث‌سازی و به‌کارگیری فیلتر کالمن برروی سیگنال‌های بیکن، فاصله‌ی ویزیتورهای یک موزه را جهت ارائه‌ی محتویات فرهنگی مربوط به هر بخش موزه محاسبه کرده است. نویسندگان مقاله‌ی [8] از روش انگشت‌نگاری بر اساس 5G استفاده کرده‌اند. در مرحله‌ی پیش‌پردازش داده از فیلتر کالمن جهت کاهش نوسان استفاده شده است و الگوریتم کرینجینگ برای میان‌یابی در محیط جهت برداشتن اثر انگشت نقاط مختلف استفاده شده است. در مقاله‌ی [9] از یک روش خلاقانه برای کاهش نویزها استفاده شده است. در این روش علاوه بر گره‌های بلوتوثی و تلفن همراه، یک گره بلوتوثی دیگر در نقش گره‌ی دروازه یا مرجع به سیستم اضافه می‌گردد. در این سیستم، قبل از تخمین مکان کاربر، نوسانات سیگنال‌های ناشی از عوامل محیطی، توسط گره مرجع به سرور فرستاده می‌شود. بدین شکل، سیگنال‌های دریافتی از گره‌های دیگر که تحت تاثیر عوامل محیطی، دارای نوسان هستند، تصحیح می‌شود. این رویکرد موفق به دستیابی به دقت ۱/۵ متر شده است.

استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به افزایش دقت در تعیین مکان کاربر کمک می‌کند. مقاله‌های[4]–[2] مروری بر روش‌های یادگیری ماشین برای مکان‌یابی داخلی انجام داده‌اند. در [10] از یک شبکه عصبی پس انتشار بهمراه الگوریتم ازدحام ذرات برای آموزش مدل فاصله بر اساس RSSI استفاده کرده‌اند که موجب کاهش خطای مکان‌یابی می‌شود. نویسندگان [11] مقاله‌ی یک سیستم تشخیص مکان کاربر در موزه با استفاده از شبکه‌ی عصبی پیش‌خور پیشنهاد داده‌اند. مقاله‌ی [12] از حسگرهای داخلی موبایل جهت کسب اطلاعات سرعت و حرکت، علاوه بر وایفای استفاده کرده است. این حسگرها اطلاعاتی مانند سرعت و حرکت را دارند. با استفاده از این اطلاعات می‌توان فهمید که کاربر از مبدا چقدر و در چه جهتی فاصله گرفته و مکانش تخمین زده می‌شود. در این روش از یادگیری ماشین برای تخمین عدم قطعیت در سیستم و برخورد متناسب با نویزها در محیط استفاده شده است. ترکیب این اطلاعات با روش انگشت‌نگاری و شبکه‌های عصبی، منجر به حاصل شدن سیستمی با دقت زیر ۴ متر شده است.

۳- روش پیشنهادی

در این بخش، ابتدا سیستم مکان‌یابی داخلی برپایه‌ی انگشت‌نگاری تشریح می‌شود. سپس، مرحله‌ی پیش‌پردازش داده توضیح داده می‌شود. در نهایت به شرح الگوریتم یادگیری ماشین استفاده شده برای بالا بردن دقت مکان‌یابی کاربر پرداخته می‌شود.

۳-۱- سیستم مکان‌یابی داخلی برپایه‌ی انگشت‌نگاری

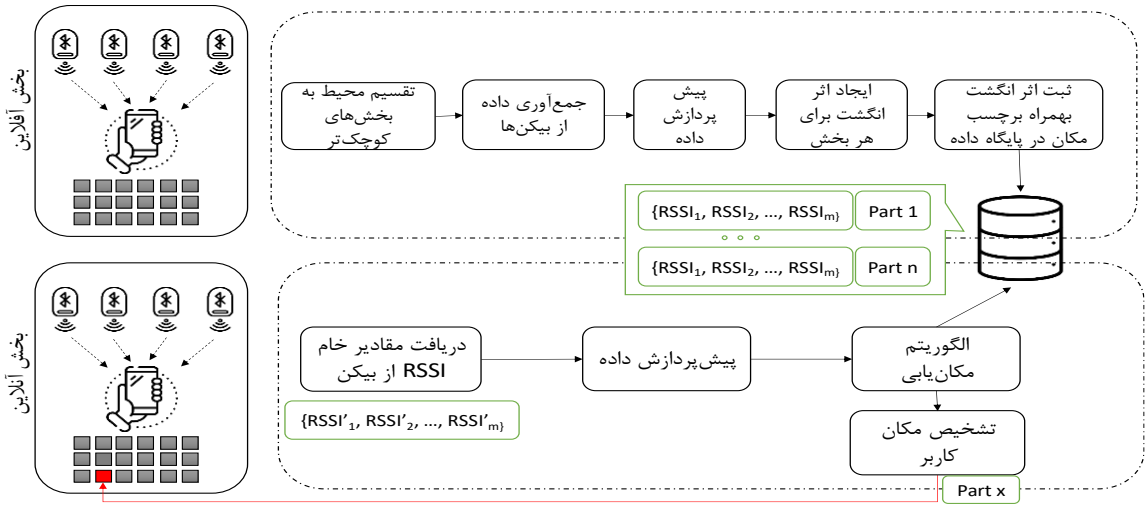
شکل (۱) سیستم پیشنهادی را نمایش می‌دهد که از دو بخش آنلاین و آفلاین تشکیل شده است. در بخش آفلاین، ابتدا محیط بصورت گسسته در می‌آید؛ یعنی محیط را به بخش‌های مساوی تقسیم کرده (ماژول تقسیم‌بندی) و برای هر بخش یا نقطه مقادیر RSSI از سیگنال‌های بلوتوثی بیکن‌های مختلف خوانده شده (ماژول جمع‌آوری داده) و پس از پیش‌پردازش داده‌ها (خواندن همزمان از چند بیکن و رفع نوسانات و نویز مقادیر RSSI) و ایجاد اثر انگشت برای هر نقطه‌ی مکانی (ماژول ایجاد اثر انگشت)، همراه با برچسب مکان در پایگاه داده ذخیره می‌گردد (ماژول ذخیره‌ی داده). در واقع این مقادیر، اثر انگشت یک نقطه را مشخص می‌سازد و منحصر به فرد است. زیرا مقادیر RSSI با فاصله رابطه دارد و در صورت تغییر مکان، مقادیر خوانده شده تغییر می‌یابند. در بخش آنلاین، کاربر در نقطه‌ای قرار گرفته و جهت تعیین مکان وی، مقادیر RSSI از بیکن‌های نزدیکش خوانده شده، پیش پردازش می‌شود و با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و بر اساس اثرهای انگشت ذخیره شده در پایگاه داده، مکان کاربر مشخص می‌شود.

۳-۲- پیش‌پردازش داده

رای بدست آوردن مقادیر RSSI از بیکن‌های مختلف، تلفن هوشمندی به‌صورت ثابت در نقاط مختلف نقشه قرار می‌گیرد و مقادیر RSSI دریافتی را در فاصله‌های زمانی مختلف ثبت می‌کند. در اینجا، دو چالش وجود دارد. چالش اول مربوط به عدم اطمینان به مقادیر خام RSSI بعلت وجود نویز در محیط است و چالش دوم مربوط به عدم امکان دریافت چند مقدار RSSI بطور همزمان توسط تلفن هوشمند است. در ادامه، راه‌حل ارائه شده برای هر کدام از این چالش‌ها تشریح شده است.

۳-۳- فیلترینگ مقادیر خام RSSI

در اندازه‌گیری‌های RSSI بدست آمده از بیکن‌ها، با توجه به نویز و نوسانات موجود در محیط، مقادیر RSSI ممکن است پایدار نباشد. از این رو، استفاده



شکل ۱: سیستم پیشنهادی مکان‌یابی داخلی بر اساس انگشت‌نگاری

از روشی جهت تخمین درست مقادیر RSSI، امری ضروری است.

در آمار و نظریه‌ی کنترل، کالمن فیلترینگ الگوریتمی است که از یک سری اندازه‌گیری‌ها دارای نویز و بی‌دقتی در طول زمان استفاده کرده و سپس با تخمین بر روی متغیرهای ناشناخته، مقادیر دقیق‌تری تولید می‌کند. فیلتر کالمن با فرض اینکه خطا از توزیع گوسی پیروی می‌کند، کار می‌کند. در فیلترینگ RSSI، الگوریتم کالمن بصورت یک بُعدی استفاده می‌شود.

این الگوریتم در دو گام عمل می‌کند. در گام پیش‌بینی، فیلتر کالمن تخمینی از متغیرهای حالت به‌همراه میزان عدم قطعیت (یا همان خطا) تولید می‌کند. معادلات (۱) و (۲) بترتیب تخمین حالت یا همان مقدار RSSI و خطای تخمین در لحظه‌ی t ام را نشان می‌دهد.

$$\bar{u}_t = u_{t-1} \quad (۱)$$

$$\bar{\Sigma}_t = \Sigma_{t-1} + R_t \quad (۲)$$

مقدار تخمین در لحظه t ام به مقدار تخمین لحظه‌ی قبل و مقدار خطای تخمین در لحظه‌ی t ام به مقدار خطای قبلی بستگی دارد. R مقدار نویز سیستم است که در اینجا یک عدد بسیار کوچک در نظر گرفته شده است. نویز واقعی، نویز مقادیر RSSI گرفته شده از بیکن است. مقداردهی اولیه $\bar{u}_t$ و $\bar{\Sigma}_t$ برابر با صفر است.

سپس سود کالمن[۸] را محاسبه می‌کنیم. این مقدار کمک می‌کند تا بدانیم مقدار RSSI دریافتی جدید، چه مقدار بر روی مقدار RSSI تخمینی تاثیر خواهد گذاشت و از طریق معادله‌ی (۳) محاسبه می‌گردد:

$$K_t = \frac{\bar{\Sigma}_t}{\bar{\Sigma}_t + Q_t} \quad (۳)$$

Q روی مقداری تنظیم می‌شود که به نویز در RSSI دریافتی واقعی (مثلاً واریانس سیگنالRSSI) مربوط است. KG عددی بین ۰ و ۱ می‌باشد. هنگامی که به مقادیر پیش‌بینی اطمینان نداریم (یعنی Σ بزرگ است) یا نویز اندازه گیری کم باشد (یعنی Q کم باشد)، می‌توان اطمینان بیشتر به مقادیر RSSI دریافتی کرد. در این دو حالت، سود کالمن بیشتر خواهد بود.

در گام به‌روز رسانی، به محض دریافت خروجی بعدی اندازه‌گیری RSSI (z_t)، تخمین‌ها به‌روز رسانی می‌شوند. معادلات (۴) و (۵) بترتیب تخمین نهایی و خطای نهایی سیستم در لحظه‌ی t ام را نشان می‌دهد.

$$u_t = \bar{u}_t + K_t(z_t - \bar{u}_t) \quad (۴)$$

$$\Sigma_t = \bar{\Sigma}_t - (k_t\bar{\Sigma}_t) \quad (۵)$$

هر چه سود کالمن بزرگتر باشد، مقدار RSSI (z_t) در پیش‌بینی حالت بیشتر دخیل می‌شود. اگر سود کالمن کم باشد، به مقدار پیش بینی ($\bar{u}_t$) بیشتر اعتماد می‌کنیم و فقط از اطلاعات کمی از RSSI دریافتی استفاده می‌کنیم.

۱-۳-۳- خواندن همزمان از چند بیکن

یکی دیگر از چالش‌های مرحله‌ی ثبت مقادیر RSSI در پایگاه داده، خواندن همزمان از چند بیکن در یک لحظه برای ثبت اثر انگشت است. چراکه در یک نقطه، از قبل مشخص نیست که از کدام بیکن‌ها قرار است مقادیر خوانده شود. مثلا ممکن است در یک نقطه p، دو بیکن ۱ و ۲ در دسترس باشند، ولی در لحظه‌ی t فقط اطلاعات یک بیکن دریافت می‌شود. در اینجا، بسته‌ها در n بار دریافت می‌شوند و هر بار، شماره‌ی بیکنی که اطلاعات آن دریافت شده، افزایش می‌یابد. سپس بیکنی در نقطه‌ی p در دسترس است که شماره‌ی آن از یک حد آستانه بیشتر باشد و مقدار RSSI مربوط به آن بیکن برابر با میانگین n دریافت است. در غیر اینصورت، عدد ۰ برای آن بیکن در نظر گرفته می‌شود که نشان‌دهنده‌ی عدم حضور آن بیکن در اطراف p است. در این مقاله، n برابر با ۳۰ در نظر گرفته شده است.

شکل (۲) مثالی را برای یک نقطه‌ی فرضی با ۴ بیکن در اطراف آن نقطه نشان می‌دهد. در سی بار گردش، بیکن شماره ۱ و ۲ به‌ترتیب ۱۳ و ۱۰ بار حاضر شده‌اند. اگر حد آستانه ۱۰ باشد، یعنی این دو بیکن در لحظه‌ی t در محیط حضور داشته‌اند و بیکن شماره ۳ و ۴ در محیط غایب بوده‌اند. در واقع مقادیر RSSI دو بیکن ۳ و ۴ در ۳۰ بار گردش فقط ۷ بار دریافت شده که نشاندهنده‌ی فاصله‌ی زیاد آن‌ها از نقطه و عدم اتکا به کیفیت سیگنال‌های آن

هاست. در نهایت میانگین مقادیر RSSI بیکن‌های ۱ و ۲ در گردش‌هایی که حاضر بوده‌اند محاسبه و بعنوان مقدار RSSI خام نهایی استفاده می‌شود.

۴-۳- پیش‌بینی مکان کاربر با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین

چالش نوسان سیگنال‌ها، باعث می‌شود که اثر انگشت‌های ایجاد شده در دیتابیس برای یک نقطه دقیق و ثابت نباشد. این بدین معناست که رابطه‌های پیچیده‌تری برای پیدا کردن مکان کاربر در مرحله‌ی پیش‌بینی باید کشف شوند. یادگیری ماشین بهترین راهکار برای رابطه‌های پیچیده و غیرخطی در اینگونه مسائل است. در این مقاله، دو الگوریتم درخت تصمیم و جنگل تصادفی استفاده شده است.

درخت تصمیم از خانواده‌ی الگوریتم‌های با نظارت است و می‌تواند هم در مسائل رگرسیون خطی و هم در مسائل کلاس‌بندی به ما کمک کند. هدف درخت تصمیم ساخت یک مدل است که با استفاده از آن و به کمک یادگیری قوانین ساده تصمیم‌گیری، بتوان مقدار هدف و یا کلاس را تخمین زد. برای تخمین کلاس و یا مقدار، از ریشه‌ی درخت شروع می‌کنیم. ویژگی‌های ریشه با ویژگی‌های نمونه مقایسه می‌شود و بر اساس آن، شاخه‌ای از درخت که به نمونه نزدیکتر است ادامه می‌یابد و گره‌ی بعدی بازدید می‌شود. دو نوع درخت تصمیم داریم: درخت تصمیم متغیرهای طبقه‌ای: اگر متغیر هدف، یک کلاس باشد و درخت تصمیم متغیرهای پیوسته: اگر متغیر هدف پیوسته باشد.

۴- پیاده‌سازی و نتایج تجربی و ارزیابی سیستم مکان‌یابی داخلی مبتنی بر بلوتوث

در این مقاله، ۸ بیکن با تراشه‌ی NRF51822 استفاده شده است. محیط پایلوت برای مکان‌یابی داخلی، طبقه‌ی دوم ساختمان دانشکده‌ی مهندسی پردیس فارابی می‌باشد. نقشه‌ی این محیط در شکل (۳) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، وجود موانع متعدد از جمله دیوارها و دانشجوها، این محیط را به محیط نزدیک به واقعیت تبدیل می‌کند. شکل (۳) بخش‌بندی طبقه برای ثبت اثر انگشت را نشان می‌دهد. پر اهمیت‌ترین ناحیه با رنگ قرمز مشخص شده است. این ناحیه به‌علت کوچک بودن بخش‌ها، نزدیکی آن‌ها به هم و نویز بیشتر مورد توجه است.

برای ارتباط با بیکن‌ها، جمع‌آوری داده و ارتباط با سرور، یک اپلیکیشن iOS طراحی شده است. فریم‌ورک UIKit جهت ایجاد زیرساخت‌های لازم مانند رابط کاربری برنامه و فریم‌ورک CoreBluetooth جهت ارتباط با بیکن‌ها و کتابخانه‌ی Socket.IO برای اتصال به سرور، ارسال اثر انگشت و دریافت برچسب پیش‌بینی استفاده شده است.

از مهترین صفحات طراحی شده‌ی این اپلیکیشن، صفحه‌ی ارسال دستور به بیکن‌هاست. این اپلیکیشن این قابلیت را به ما می‌دهد که تنها با دانستن شماره بیکن، به آن دستوراتی جهت تنظیم پارامترهای بیکن‌ها بدهیم (بخش ۳-۱). همچنین می‌توان با انتخاب کردن چند بیکن بطور همزمان یک دستور را بصورت گروهی ارسال کرد که در هیچ اپلیکیشن موجود در بازار این قابلیت وجود ندارد. صفحه‌ی جمع‌آوری داده، کمک می‌کند که بروی نقشه بتوان نقاط مورد نظر برای انگشت‌نگاری را ثبت، حذف و ویرایش کرد و با انتخاب تعداد اثر انگشت، یک رکورد در پایگاه داده ایجاد کرد. همانطور که قبلا بحث شد، جمع‌آوری داده با چالش‌هایی نظیر دریافت داده بطور همزمان توسط چند بیکن و نوسانات سیگنال‌ها روبرو است. راهکارهای ارائه شده در همین بخش پیاده‌سازی شده است. بعلاوه‌ی اینکه قبل از ثبت اثر انگشت در پایگاه داده برای هر بخش روی نقشه، تعداد m رکورد RSSI به ازای هر بیکنی که در اطراف هر بخش قرار دارد، به الگوریتم فیلتر کالمن داده می‌شود تا در نهایت یک اثر انگشت با حداقل نویز و نوسان تولید شود.

برای طراحی سرور از زبان پایتون استفاده و توابع فیلتر کالمن، ثبت رکورد در پایگاه داده و عمل آموزش مدل و پیش‌بینی مکان کاربر در سمت سرور پیاده‌سازی شده است. کتابخانه‌ی Learn-Scikit برای آموزش مدل یادگیری ماشین، کتابخانه Pandas برای دستکاری و تحلیل داده، کتابخانه‌ی Matplotlib و Seaborn برای رسم نمودارها و نمایش داده‌ها، کتابخانه‌ی Numpy برای انجام عملیات برروی ماتریس‌ها و کتابخانه‌ی Socket.IO برای ارتباط با اپلیکیشن موبایل و تبادل اطلاعات استفاده شده است. توابع پیاده‌سازی شده در بخش سرور و عملکرد هر کدام در جدول (۱) آمده است.

اطلاعات دریافت‌شده از بیکن‌ها در بار اول

	بیکن ۱	بیکن ۲	بیکن ۳	بیکن ۴
مقدار RSSI	0	- 87	0	0

	بیکن ۱	بیکن ۲	بیکن ۳	بیکن ۴
شمارنده	0	1	0	0

اطلاعات دریافت‌شده از بیکن‌ها در بار دوم

	بیکن ۱	بیکن ۲	بیکن ۳	بیکن ۴
مقدار RSSI	- 65	0	0	0

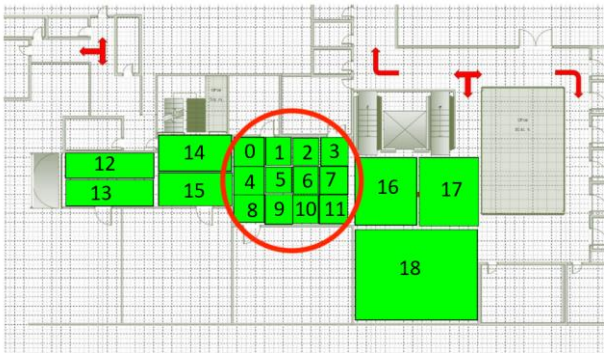
	بیکن ۱	بیکن ۲	بیکن ۳	بیکن ۴
شمارنده	1	1	0	0

اطلاعات دریافت‌شده از بیکن‌ها در بار سی اُم

	بیکن ۱	بیکن ۲	بیکن ۳	بیکن ۴
مقدار RSSI	- 65	0	0	-76

	بیکن ۱	بیکن ۲	بیکن ۳	بیکن ۴
شمارنده	13	10	5	2

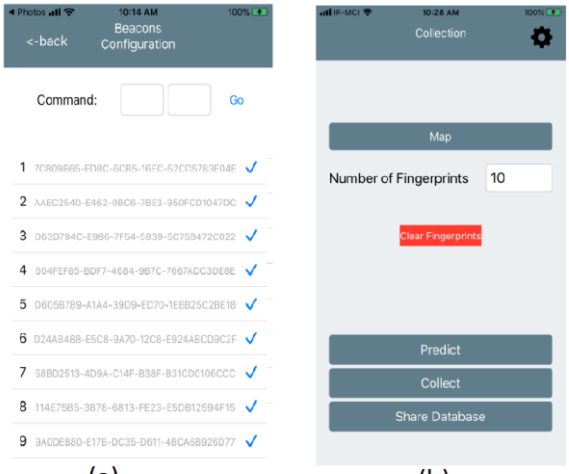
شکل ۲: خواندن همزمان از چند بیکن



شکل ۳: نقشه‌ی محیط و تقسیم‌بندی آن

سیستم طراحی شده در شکل (۱) آمده است. یعنی در ابتدا، جمع آوری داده از بیکن ها توسط اپلیکیشن iOS توسعه داده شده انجام می‌گیرد و پس از پیش‌پردازش و حذف نویز با استفاده از فیلتر کالمن، یک اثر انگشت به ازای هر بخش ایجاد و در پایگاه داده سمت سرور ذخیره می گردد (مرحله ی آفلاین). سپس در مرحله‌ی آنلاین، به ازای سیگنال های دریافت شده از بیکن ها توسط اپلیکیشن بطور همزمان و حذف نویز، با استفاده از الگوریتم درخت تصمیم و اثرهای انگشت ذخیره شده در پایگاه داده، مکان کاربر و بخش مربوطه بر روی نقشه تعیین می‌گردد.

برای پیاده‌سازی درخت تصمیم، ۲۰ درصد از داده‌ها، تحت عنوان داده‌ی ارزیابی و مابقی بعنوان داده‌ی آموزشی به الگوریتم داده شده است. گام آموزش بعد از آزمون و خطا ۰.۲ انتخاب شده است. همچنین بیشینه‌ی تعداد ویژگی‌های مورد استفاده (مقادیر RSSI) در این الگوریتم ۴ می‌باشد. یعنی با داشتن چهار بیکن، می‌توان مکان را تشخیص داد. بیشینه‌ی عمق درخت برای جلوگیری از بیش‌برازش ۱۵ گذاشته شده است. ۱۹ بخش در نقشه داریم و از هر بخش ۲۰ اثر انگشت جمع‌آوری شده است. در نتیجه با یک مسئله‌ی کلاس‌بندی ۳۸۰ داده با برچسب‌گذاری در ۱۹ کلاس مواجه هستیم.



(a) (b)

شکل ٤: (a) صفحه‌ی ارسال دستور به بیکن‌ها و (b) صفحه‌ی جمع‌آوری داده

جدول ۱: توابع پیاده‌سازی شده در سرور

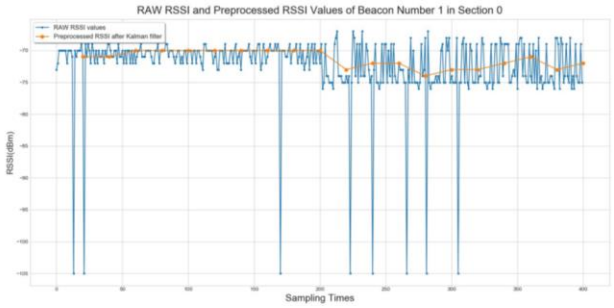
نام تابع	توضیحات تابع
main.finger_print_handler	ایجاد ارتباط سوکت بین سرور و اپلیکیشن جهت دریافت اثر انگشت و ذخیره در پایگاه داده
main.save_raw	ذخیره‌ی تمامی اطلاعات دریافت شده از اپلیکیشن شامل اثر انگشت قبل و بعد از عبور از فیلتر کالمن، آرایه‌ی شمارش بیکن‌ها و برچسب در پایگاه داده
main.predict_section	انجام عملیات پیش‌بینی با توجه به مدل درخت تصمیم و ارسال شماره برچسب بخش به اپلیکیشن
indoor_navigation.pre_process	انجام عملیات پیش‌پردازش بر روی داده‌ها
indoor_navigation.train	انجام عملیات آموزش مدل

شکل (۵)، نتایج فیلتر کالمن روی مقادیر RSSI برای بیکن‌های شماره ۱ در بخش شماره صفر را نشان می‌دهد.

همانطور که از نتایج مشاهده می‌شود، فیلتر کالمن نقش اساسی در رفع نوسان مقادیر RSSI دارد و بدون آن، عملا دیتا قابل استفاده نیست. خطوط آبی نشانگر RSSI خام می‌باشند که دارای نوسان شدیدی است و خطوط زرد رنگ RSSI با نوسان کمتری را نشان می‌دهد.

در نهایت دقت مدل، ماتریس درهمریختگی و درصد مشارکت ویژگی‌ها پس از اجرای الگوریتم درخت تصمیم‌گیری، بترتیب در شکل(۵) ، شکل (۶) و شکل (۷) نمایش داده شده است.

از شکل ۶: دقت مدل درخت تصمیم بر روی دیتاستشکل (۶) می‌توان دقت در بخش‌های مختلف را بررسی کرد. مثلا در اینجا، دقت بخش ۶ پایین است که می‌تواند به خاطر جمع‌آوری اثر انگشت در این بخش باشد. از روی ماتریس درهم‌پیچیدگی (شکل (۷)) می‌توان مشخص کرد که مدل کدام بخش‌ها را با یکدیگر اشتباه می‌گیرد. جابجایی محل بیکن‌ها می‌تواند به بهبود این ماتریس کمک کند. همچنین درصد مشارکت بیکن‌ها به ما در تعیین محل بهتر بیکن‌ها کمک می‌کند (شکل (۸)). در بهترین حالت تمامی بیکن‌ها میبایست مشارکت یکسان در تعیین نتیجه داشته



شکل ۵ مقدار RSSI خام و RSSI بعد از گذر از فیلتر کالمن برای بیکن شماره ۱ در بخش صفرم

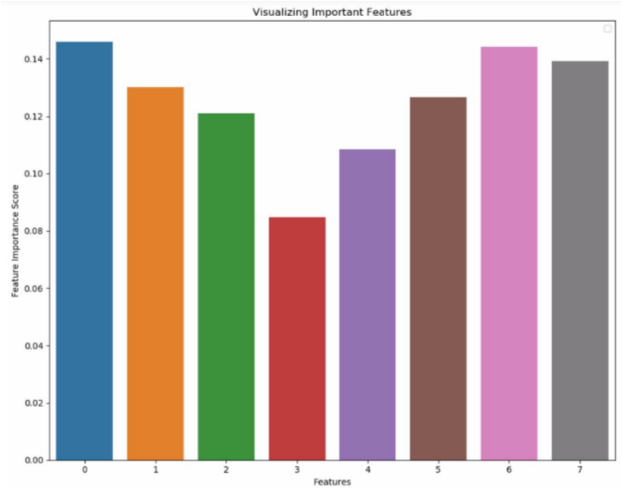
Classification Report

	precision	recall	f1-score	support
0	1.00	0.88	0.93	8
1	0.91	1.00	0.95	10
2	1.00	1.00	1.00	6
3	1.00	1.00	1.00	12
4	0.90	1.00	0.95	9
5	1.00	0.91	0.95	11
6	0.86	0.86	0.86	7
7	0.92	1.00	0.96	11
8	1.00	1.00	1.00	11
9	1.00	1.00	1.00	12
10	1.00	1.00	1.00	10
11	1.00	1.00	1.00	7
12	1.00	1.00	1.00	15
13	1.00	1.00	1.00	13
14	1.00	0.80	0.89	5
15	1.00	1.00	1.00	12
16	1.00	1.00	1.00	8
17	1.00	1.00	1.00	13
18	1.00	1.00	1.00	10
accuracy			0.98	190
macro avg	0.98	0.97	0.97	190
weighted avg	0.98	0.98	0.98	190

شکل ٦: دقت مدل درخت تصمیم بر روی دیتاست

```
Confusion Matrix:
[[ 7  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0]
 [ 0 10  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0]
 [ 0  0  6  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0]
 [ 0  0  0 12  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0]
 [ 0  0  0  0  9  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0]
 [ 0  0  0  0  1 10  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0]
 [ 0  0  0  0  0  0  6  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0]
 [ 0  0  0  0  0  0  0 11  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0]
 [ 0  0  0  0  0  0  0  0 11  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0]
 [ 0  0  0  0  0  0  0  0  0 12  0  0  0  0  0  0  0  0  0]
 [ 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 10  0  0  0  0  0  0  0  0]
 [ 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  7  0  0  0  0  0  0  0]
 [ 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 15  0  0  0  0  0  0]
 [ 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 13  0  0  0  0  0]
 [ 0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  4  0  0  0  0]
 [ 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 12  0  0  0]
 [ 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  8  0  0]
 [ 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 13  0]
 [ 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 10]]
```

شکل ۷: ماتریس درهم پیچیدگی درخت تصمیم



شکل ۸: درصد مشارکت هر بیکن در درخت تصمیم

باشند. دقت مدل درخت تصمیم برابر با ۹۸ درصد است. یعنی در ۹۸ درصد مواقع نقطه‌ی پیش‌بینی شده صحیح است. در این مقاله توانستیم به مکان‌یابی با دقت ۱ متر و ۱۳ سانتی‌متر در محدوده‌ی تعیین شده و با ۸ بیکن دست پیدا کنیم. همچنین مقایسه با کار مشابه [9] که دقت مکان‌یابی در آن ۱متر و نیم است، برتری روش استفاده شده را نشان می‌دهد. نکته‌ی مهم، استفاده از تعداد کم گره‌ها و همچنین حداقل بودن زیرساخت پروژه است. همچنین از هیچ دروازه‌ی بلوتوثی برای اندازه‌گیری نویز در محیط استفاده نشده است.

۵- نتیجه‌گیری و کارهای آینده

مسئله‌ی مکان‌یابی داخلی بدلیل رونق‌گرفتن سرویس‌های مبتنی بر مکان، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. چالش اصلی این مسئله، رفع نوسانات سیگنال‌های دریافتی در محیط است. در این مقاله با رویکرد نرم‌افزاری به این مسئله نگاه شده است. این رویکرد شامل راه‌حلی برای مبارزه با نویز و نوسان سیگنال‌ها با استفاده از فیلتر کالمن، ارسال و دریافت داده به‌طور همزمان به/از بیکن‌ها و در نهایت ساخت یک مدل قوی با استفاده از یادگیری ماشین جهت تخمین درست مکان کاربر در محیط‌های بسته است.

برای کارهای آینده، جهت افزایش دقت می‌توان تعداد بخش‌ها را بیشتر کرد و همچنین استفاده از الگوریتم‌های دیگر یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی، کی-نزدیکتری همسایه و تلفیق این روش‌ها با الگوریتم‌های تکاملی می‌تواند به بهبود نتایج کمک کند.

سپاسگزاری

با تشکر از آقایان شاهی و علیمحمدی فارغ‌التحصیلان کارشناسی دانشکدگان فارابی دانشگاه تهران که در انجام این پروژه مشارکت داشته‌اند.

مراجع

[1] P. S. Farahsari, A. Farahzadi, J. Rezazadeh, and A. Bagheri, ‘A Survey on Indoor Positioning Systems for IoT-based Applications’, *IEEE Internet Things J.*, pp. 1–1, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2022.3149048.

[2] P. Roy and C. Chowdhury, ‘A Survey of Machine Learning Techniques for Indoor Localization and Navigation Systems’, *J Intell Robot Syst*, vol. 101, no. 3, p. 63, Mar. 2021, doi: 10.1007/s10846-021-01327-z.

[3] R. Abishek, K. R. Abishek, N. Hariharan, M. Rakesh Vaideeswaran, and C. Sundara Paripooranan, ‘Analysis Of Machine Learning Algorithms For Wi-Fi-based Indoor Positioning System’, in *2019 TEQIP III Sponsored International Conference on Microwave Integrated Circuits, Photonics and Wireless Networks (IMICPW)*, Tiruchirappalli, India, May 2019, pp. 218–222. doi: 10.1109/IMICPW.2019.8933285.

[4] P. Sthapit, H.-S. Gang, and J.-Y. Pyun, ‘Bluetooth Based Indoor Positioning Using Machine Learning Algorithms’, in *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Asia (ICCE-Asia)*, Jeju, Jun. 2018, pp. 206–212. doi: 10.1109/ICCE-ASIA.2018.8552138.

[5] N. Lee, S. Ahn, and D. Han, ‘AMID: Accurate Magnetic Indoor Localization Using Deep Learning’, *Sensors*, vol. 18, no. 5, p. 1598, May 2018, doi: 10.3390/s18051598.

[6] M. Werner, M. Kessel, and C. Marouane, ‘Indoor positioning using smartphone camera’, in *2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Guimaraes, Portugal, Sep. 2011, pp. 1–6. doi: 10.1109/IPIN.2011.6071954.

[7] P. Spachos and K. N. Plataniotis, ‘BLE Beacons for Indoor Positioning at an Interactive IoT-Based Smart Museum’, *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 3483–3493, Sep. 2020, doi: 10.1109/JSYST.2020.2969088.

[8] S. Huang, K. Zhao, Z. Zheng, W. Ji, T. Li, and X. Liao, ‘An Optimized Fingerprinting-Based Indoor Positioning with Kalman Filter and Universal Kriging for 5G Internet of Things’, *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, pp. 1–10, Jun. 2021, doi: 10.1155/2021/9936706.

[9] S.-H. Lee, I.-K. Lim, and J.-K. Lee, ‘Method for Improving Indoor Positioning Accuracy Using Extended Kalman Filter’, *Mobile Information Systems*, vol. 2016, pp. 1–15, 2016, doi: 10.1155/2016/2369103.

[10] G. Li, E. Geng, Z. Ye, Y. Xu, J. Lin, and Y. Pang, ‘Indoor Positioning Algorithm Based on the Improved RSSI Distance Model’, *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 2820, Aug. 2018, doi: 10.3390/s18092820.

[11] R. Giuliano *et al.*, ‘Indoor Localization System Based on Bluetooth Low Energy for Museum Applications’,

Electronics, vol. 9, no. 6, p. 1055, Jun. 2020, doi: 10.3390/electronics9061055.

[12] Y. Li *et al.*, 'Wireless Fingerprinting Uncertainty Prediction Based on Machine Learning', *Sensors*, vol. 19, no. 2, p. 324, Jan. 2019, doi: 10.3390/s19020324.

زیرنویس‌ها

[1]Context-Aware
[2] Access Point
[3] Beacon
[4] Bluetooth Low Energy
[5] Machine Learning
[6] Received Signal Strength Indicator
[7] Kalman Filter
[8] Kalman gain