

BLE アドレスの組み合わせと受信強度による位置推定手法の提案

Proposal for a location estimation method based on BLE address combinations and reception strength

土橋 有理^{1*} 秦 恭史¹ 松田 裕貴¹
Yuri Tsuchihashi¹ Kyoji Hata¹ Yuki Matsuda¹

諏訪 博彦¹ 安本 慶一¹
Hirohiko Suwa¹ Keiichi Yasumoto¹

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

¹ Nara Institute of Science and Technology

Abstract: ウォーキングは健康維持に有効である上に認知症などにつながるフレイルの発症を予防できる手段として注目されている。高齢者の安全なウォーキングのために様々な見守りサービスが提供されている。その多くはスマートフォンの所持を前提としているが、高齢者の中には、スマートフォンの利用に消極的な人が一定数存在する。また、ウォーキングの際の持ち物は少ない方が望ましい。我々は、高齢者が小型のデバイスのみを持ち歩くだけで、位置やすれ違った相手を判別し、それをデジタルサイネージにより可視化するシステムを提案している。このシステムの実現には、省電力で小型のデバイスのみで、高齢者の位置を推定する必要がある。そこで我々は、省電力である BLE (Bluetooth Low Energy) に着目し、周辺施設などから発せられている BLE 信号のみをスキャンすることで、その BLE 信号のアドレスと受信強度 (RSSI) の組み合わせパターンから、高齢者の位置を推定する屋外位置推定手法を提案する。事前実験の結果、施設や住宅の数によって推定精度に違いはあるものの、大まかな位置推定は可能であるということを明らかにしている。

1 はじめに

ウォーキングは高齢者の体力維持や健康を目的とした手軽に始められる運動として支持されている。令和元年度「スポーツの実施状況等に関する世論調査」[1]によると、高齢者の60代、70代の高齢者が「初めて、もしくは久しぶりに再開した運動」の1位としてウォーキングを挙げており、他の運動と比べて人気の高さが伺える。また、定期的なウォーキングはフレイルの予防にも適している。フレイルは、加齢に伴う機能変化や予備能力低下によって健康被害に対する脆弱性が増加した状態とされ、身体的問題だけでなく、精神・心理的、社会的問題を含む概念である[2]。高齢者がフレイルになると生活の質を落とすだけでなく、認知症などの合併症を引き起こす可能性がある。一方で適切な介入・支援により、生活機能の維持向上が可能な状態であるとされており、生活習慣を改善することで、フレイルの状態を改善し得ると考えられている。フレイルを予防するためには習慣的な運動による筋力の維持

が効果的である。渡辺ら[3]の研究によると、フレイル患者による1日あたり5000歩から7000歩のウォーキングは死亡リスクを大きく下げることがわかった。しかし、高齢者一人だけでのウォーキングには、事故や怪我などリスクが伴う。高齢者が安全に散歩をするためには、万一の事態に備え、高齢者の居場所をすぐに確認できる状態であることが重要である。近年のデジタル端末の急速な普及により、見守り用スマートフォンアプリ[4]やGlobal Positioning System (GPS) 端末を利用したサービス[5]が提供されている。これらのサービスによって、高齢者の家族は離れた場所においても高齢者の居場所を確認することができる。しかしながら、スマートフォンアプリを利用した見守りサービスは、利用者が常にスマートフォンを携帯していることを前提としているため、スマートフォンを常時携帯したくないような高齢者にとっては使いにくい。また、GPS 端末を利用したサービスは電力消費が大きく、気付かぬ間にバッテリー切れが起こる場合がある。高齢者が安全かつ気軽にウォーキングをするには、軽量かつ省消費電力なデバイスを用いた高齢者見守りシステムが必要がある。

*連絡先：奈良先端科学技術大学院大学
〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916 番地-5
E-mail: tsuchihashi.yuri.ub4@is.naist.jp

そこで我々は高齢者にタグ型の省消費電力な Bluetooth Low Energy(BLE) スキャンデバイスを配布し、外出時にこのデバイスを持ち歩いてもらい、デバイスがスキャンする周辺施設から発せられる BLE 信号を活用することで、高齢者の居場所を推定する屋外位置推定手法を提案している [6]. この提案では周辺を散歩し、BLE タグで取得したデータから位置を推定する必要がある。

本稿ではこの手法の有効性を検証するために、事前実験を行う。事前実験では BLE スキャンデバイスで周辺施設に固定の BLE 信号を発するビーコンがあることを確認する。その後、このビーコンからの信号を用いて位置推定できるかを検証する。結果として、収集したデータにおいて、提案手法の周辺の BLE 信号のアドレスと受信強度を用いることで大まかな位置推定が可能であるという知見が得られた。

2 関連研究

2.1 既存の屋外位置推定手法

屋外での位置情報推定には GPS、Global Navigation Satellite System(GLONASS)、Global Navigation Satellite System (GNSS) [7] などの衛星測位システムがある。GPS は現在最も一般的に使用されている測位手法である [8]. GPS は屋外での位置精度は高いが、消費電力が大きいため、本研究では省消費電力である BLE を用いた。

2.2 BLE を用いた屋内位置推定の研究

BLE は、受信信号強度 (RSSI) を利用した屋内位置推定手法として、フィンガープリント方式、近接性方式、三点測量方式などで自位置を算出する方法を中心に研究が進められている [9], [10], [11]. また、ほとんどのシステムは固定のアンカーデバイスと観測デバイス間の RSSI を使用して相対的な位置を推定している。

近接性方式を利用した研究として工藤ら [12] は一定期間に受信された RSSI を用いて統計的検定を行うことで、近接ビーコンの判別を行い、リアルタイムな屋内位置測位手法を提案した。通常 RSSI を用いて近接するビーコンを見つけるには、RSSI の閾値を設定する手法やそれぞれのビーコンの RSSI の大きさを比べて判断する手法をとられることが多い。しかしながら、端末の性能によって RSSI の閾値が変化することや屋内に複数のビーコンが存在することで RSSI の値にゆらぎが生じ、位置推定の精度が著しく低下する恐れがある。そこで工藤らは近接するビーコンの判定に統計的検定を用いることでゆらぎを防止した近接ビーコンの判定を可能とした。

また、フィンガープリンティングを用いて屋内位置推定を行った研究として Pu ら [13] は一般的な重み付き kNN アルゴリズムに基づいた効果的なロケーションフィンガープリントアルゴリズムでの屋内位置推定手法を提案した。フィンガープリンティング手法は位置推定する範囲を区画ごとに分け、その全体を囲むように配置された BLE ビーコンからの受信強度を推定に用いる。この研究は学習フェーズで事前に、区画ごとで受信する RSSI のパターンを記録する。テストフェーズで取得した未知の RSSI のパターンと、学習フェーズの区画ごとのパターンを比較することで類似度の計算を行う。さらに、重み付き kNN アルゴリズムを採用することで、高い精度での推定を実現した。しかしながらこの研究は位置推定する BLE 受信側の位置が固定されている状況で位置推定を行っているため、受信側が動的なものであった場合の精度は確認されていない。

2.3 BLE を用いた屋外位置推定の研究

BLE を利用して屋外位置推定を行った研究として春日井ら [14] の研究では、複数の BLE ビーコンを屋外に設置することでその Bluetooth の電波特性から位置推定を行った。位置推定手法にはテンプレートマッチング方式を採用し、RSSI の確率分布を用いたテンプレートとの類似度を計算することで位置推定精度の向上を図った。しかし、この研究では複数の BLE ビーコンを設置する際に設置コストや導入コストがかかるという懸念点がある。

2.4 本研究の位置付け

既存の関連研究では、BLE を用いて位置推定するために複数の BLE 信号発信ビーコンを設置している。しかしながら実際の街全体にこのようなビーコンを設置するのは、現実的に難しい。そこで本研究では BLE ビーコンを設置する代わりに、周辺の施設に設置されたビーコンから発せられている BLE 信号を収集する。このデータを活用することで屋外位置推定を行い、この有効性を検討する。

3 提案手法

本提案手法の概要を図 1 に示す。本研究では位置推定にフィンガープリンティング手法を採用し、BLE データを事前に取得する学習フェーズと位置推定を行うテストフェーズの 2 つに分ける。学習フェーズでは周辺施設から発せられる BLE 信号のアドレスと RSSI の組み合わせパターンを各場所ごとにまとめた正解リストを作成し、テストフェーズでは未知のデータと正解

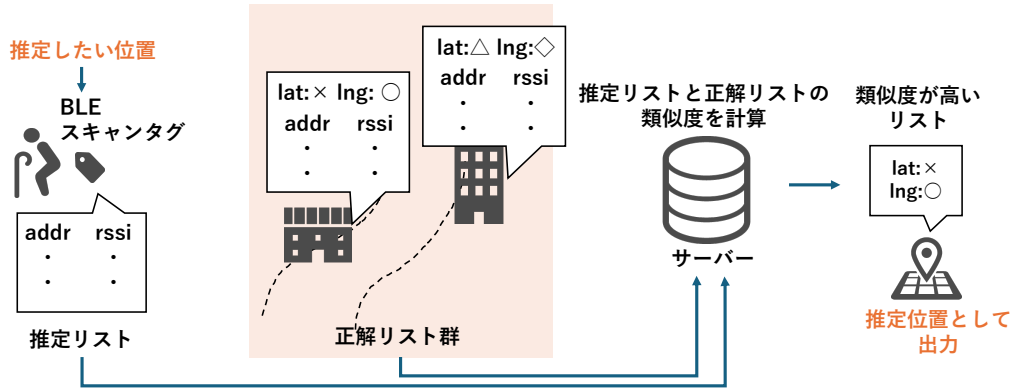


図 1: 提案手法の概要図

リストとの類似度を測ることで屋外における位置推定を行う。

3.1 BLE データセンシングデバイス

本研究では BLE 信号のデータ収集の際、図 3 のような Raspberry Pi に GPS モジュールが搭載された BLE スキャンデバイス [15] を使用した。取得したデータは LTE 通信モジュールで逐一サーバ上へ送信される。このスキャンデバイスが取得できるデータは BLE 信号に含まれる BD アドレス, RSSI, 取得されたデータの位置情報, 時間情報がある。BLE 信号のスキャンは 15 秒ごとに繰り返し行われる。

3.2 正解リストの作成

位置推定に用いる正解リスト作成の方法を図 2 に示す。正解リストを作成するために事前に決めた散歩コースを歩いて 1 周し、周辺の施設から出ている BLE 信号のデータを集める。複数回歩いて周回したうちの 1 回分を位置推定精度検証のための推定リスト、それ以外のデータを正解リストとする。散歩コースを緯度経度の値を用いて等しい間隔で複数区画に分け、各区画ごとに取得するアドレスと RSSI をまとめる。同じ場所で複数回同じアドレスを取得した場合は、RSSI が一番強いものを採用する。

コースを周回する際、Bluetooth の電波を発する端末を持つ人や車などの動的な BLE データを拾う可能性がある。本研究は BLE スキャンデバイスから常に観測できる BLE データを位置推定の目印として扱うため、動的な BLE データは除く必要がある。そのため、全ての周回で毎回取得したアドレスを共通アドレスとして抽出して使用する。リストは共通アドレスと RSSI の二つのカラムで各場所ごとに作成する。共通アドレスをアルファベット順に上から並べ、その場所で検知した

アドレスの欄には対応する RSSI の数値を入力し、検知しなかったアドレスには RSSI の値を 0 と入力する。このようにデータの整理を行い散歩コースの各場所それぞれの正解リストを作成する。

3.3 位置推定

3.3.1 位置推定の手順

位置推定のための手順を図 4 に示す。入力には推定データを使用する。推定データを、正解リストの共通アドレスを用いて整理し、正解リストと同様にアドレスと RSSI のカラムで構成されたリスト (以下、推定リスト) を作成する。次に正解リストと推定リストの類似度の計算を行う。全ての正解リストとの類似度計算が終了した後、その中で最も類似度が高かった正解リストの位置情報を推定位置として出力する。

3.3.2 類似度計算

リスト同士の類似度の計算方法を示す。それぞれのリストの RSSI の値を用いて \cos 類似度を計算する。推定リストの RSSI が式 (1)、正解リストの RSSI が式 (2) により表されるとすると、類似度は式 (3) によって求められる。

$$\text{推定リストの RSSI} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \end{pmatrix}^T \quad (1)$$

$$\text{正解リストの RSSI} = \begin{pmatrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_n \end{pmatrix}^T \quad (2)$$

$$\text{類似度} = \frac{\sum_{k=1}^n x_k y_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^n x_k^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n y_k^2}} \quad (3)$$

散歩コースを含んだ周辺をlat,lngの値を用いて等間隔の区画で分ける

区画ごとに取れる共通アドレスとRSSIを抽出する

正解リストの形にデータを整理する

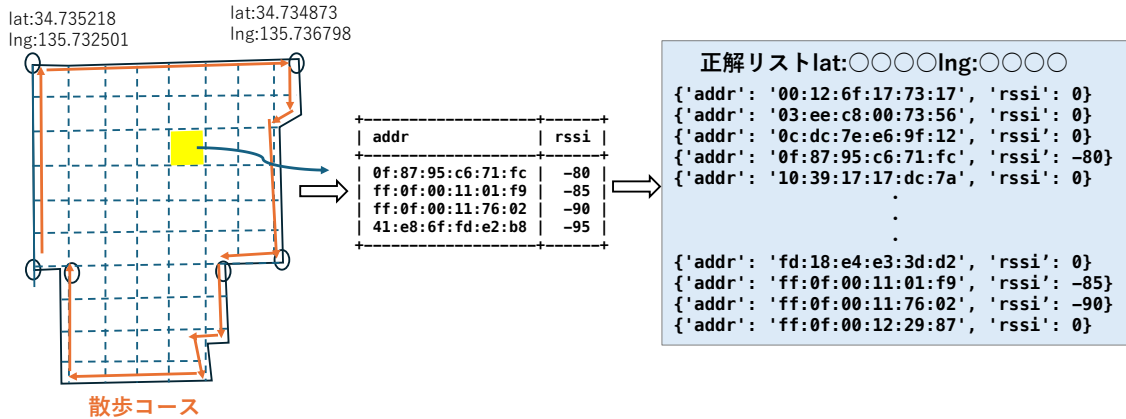


図 2: 正解リスト作成方法

表 1: リストごとの精度

推定リスト	平均誤差 (m)	標準偏差 (m)	分散 (m)	RMSE(m)
1	64.76	89.19	3762.27	62.85
2	86.68	123.24	7676.30	89.67
3	62.47	95.62	5240.68	74.01
4	60.24	85.41	3666.66	61.80

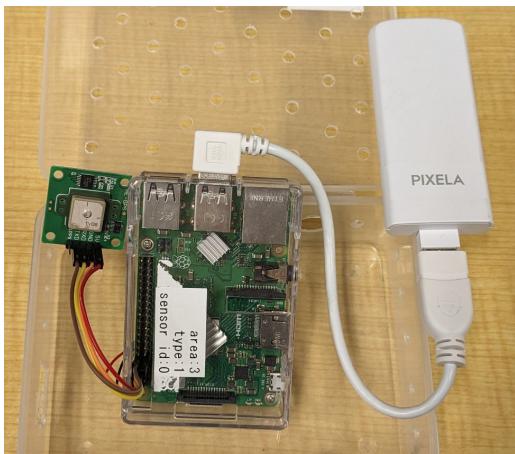


図 3: BLE をスキャンするデバイス

4 実証実験

散歩をするのに適した、信号が無い散歩コースを想定し、奈良先端科学技術大学院大学のキャンパス周辺で実験を行なった。数日間で複数回大学の周りを歩くことで周辺の BLE データ収集を行い、提案手法を使用した位置推定の精度を評価する。

4.1 実験環境

図 5 の青線で示す、奈良先端科学技術大学院大学のキャンパスの周りを周回するコースを実験環境として設定した。ルートは、大学の正門からほとんど人が居ない高山サイエンスプラザ、園芸に関わるデータ収集が行われているグリーンラボを通過し、学生宿舎の前を抜け、植物温室の前を通過し正門まで戻る約 2km のコースを約 20 分程度かけて歩いた。

4.2 データ収集

データ収集は 2 日間で計 6 回行う。BLE スキャン端末を携帯し、散歩コースを歩いて約 20 分かけて 1 周する。今回は 6 回の実験のうち、データに欠損した部分があった 2 回の実験を除いた 4 回のデータを使用する。表 2 に 4 回の実験の日時と BLE 信号スキャン回数を示す。4 回のデータのうち、3 回を正解リスト作成に使用し 1 回を精度評価のための推定リスト作成に使用する。この処理を正解リストと推定リストのデータを入れ替えながら 4 回行う。

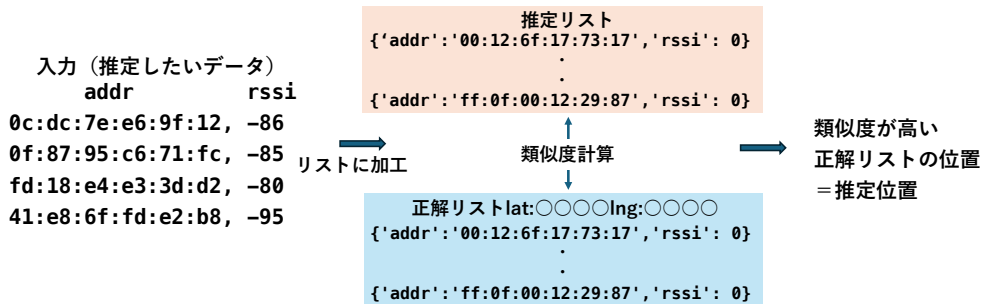


図 4: 位置推定で行う手順

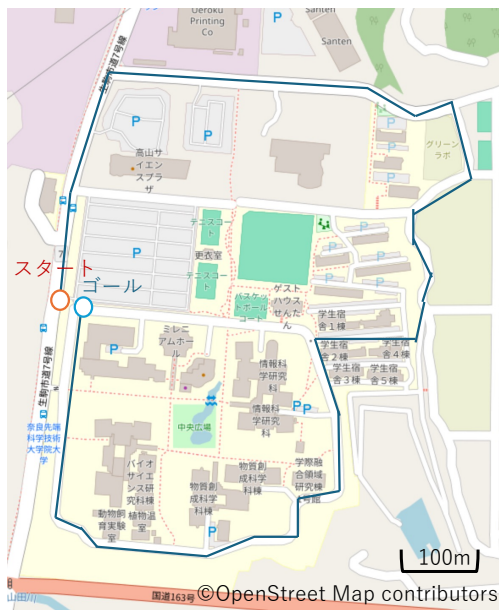


図 5: 実験に利用した散歩コース

表 2: BLE スキャン端末によるスキャン結果例

データ番号	データ収集時間	BLE 信号スキャン回数
1	12/23 17:29:00-17:49:59	82 回
2	12/24 10:51:00-11:12:59	87 回
3	12/24 11:47:00-12:09:59	90 回
4	12/24 12:43:00-13:07:59	98 回

4.3 評価方法

BLE スキャンデバイスで取得した GPS のデータを用いて推定した位置と実際の位置の誤差を計算することで精度の評価を行う。各実験回でスタート時刻からゴール時刻まで、1 分間ずつずらし、位置推定を行う。実際に取得した位置情報と提案手法における推定位置との誤差の計算をすることで精度の評価を行う。4 回のデータそれぞれを推定リストに使い、提案手法の有効性を確かめる。有効性の検証には BLE スキャンデバイスに搭載されている GPS の緯度、経度データを使用

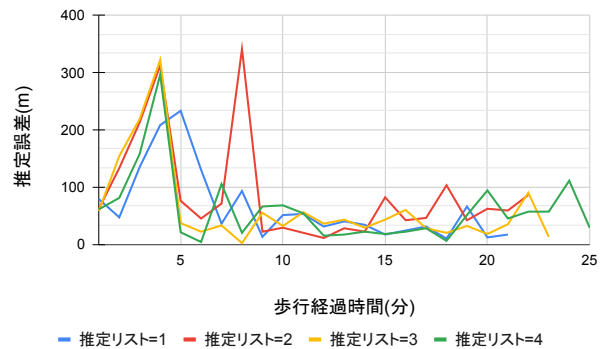


図 6: 4 つそれぞれの推定リストを用いた場合の誤差

し、ヒュベニの公式で推定位置と実際の位置の 2 地点間の距離を計算する。その後それぞれの平均誤差, 標準偏差, 分散, RMSE を計算する。

4.4 結果

4 回の実験データから推定位置と実際の位置の 2 地点間の距離 (誤差) を計算した。提案手法による推定位置と実際の位置のズレを地図上に可視化したものを図 7 に示す。青色のピンが推定された位置, オレンジ色のピンが実際の位置, 赤色の線が推定のズレの大きさを表している。それぞれのデータを推定リストに使った場合の誤差と, コースを歩いた時間経過の関係を表したものを図 6 に示す。4 回分それぞれの平均誤差, 分散, 標準偏差, RMSE (Root Mean Squared Error) を表 1 に示す。実験の結果, 誤差の最小値は 2m, 最大値は 322m であった。

4.5 考察

推定リストの 4 回分の異なる点は前述した通り, 日時の違いである。図 4 において, 4 回分の誤差を比較し



図 7: 推定リスト=1 の推定位置と実際の位置のズレ

たところ、一部の外れ値を除いて4つの波形が同じような形であることから、日時が違う場合でもほとんどの場所で同じような誤差の位置推定が行われていることが分かる。また、表1の分散と標準偏差の計算結果から分かるように、誤差に大きなばらつきがある。推定の誤差に大きな違いがある原因について、施設や住居が密集している場所とそうでない場所で設置されているBLEデバイスの数に大きな差があることが考えられる。図5から分かるように、人通りが少ない駐車場周辺や高山サイエンスプラザでは推定精度が低い。一方で学生宿舎や植物温室などの人やデバイスが多い場所での推定精度は比較的高い。これらの実験結果により周辺施設の固有のデバイス情報を収集し、アドレスとRSSIの組み合わせを用いることで位置推定が可能であるという知見を得た。今後、実験環境を変えて住宅が密集する地域などでデータ収集を行うことで、本提案手法のさらなる推定精度の向上が期待できる。

5 おわりに

本研究では事前に収集した、周辺施設から発せられているBLE信号のアドレスとRSSIのデータを使用して、これらの組み合わせパターンから類似度計算によって位置情報を推定する屋外位置推定手法を提案した。提案手法では、BLE信号の発するデバイスの数によって位置推定精度に差は出るものの、周辺施設のBLE信号

を取得することでおおまかな位置推定を可能とした。今後は位置推定精度の向上に向け、本提案手法に加えて機械学習などを利用した位置推定手法の見直し、周辺環境による違いを明らかにするために実験を行う予定である。

参考文献

- [1] スポーツ庁サイト. 「令和元年度「スポーツの実施状況等に関する世論調査」について」. https://www.mext.go.jp/sports/b_menu/houdou/jsa_00030.html. Accessed on 19 February, 2024.
- [2] 荒井秀典. フレイルの意義. 日老医誌, Vol. 51, No. 6, pp. 497–501, 2014.
- [3] Daiki Watanabe, Tsukasa Yoshida, Yuya Watanabe, Yosuke Yamada, Motohiko Miyachi, and Misaka Kimura. Dose–Response Relationships between Objectively Measured Daily Steps and Mortality among Frail and Nonfrail Older Adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, Vol. 55, No. 6, p. 1044, 2023.
- [4] 株式会社ゼネテック. ココダヨ. <https://www.cocodayo.jp/family>. Accessed on 19 February, 2024.
- [5] MIXI, Inc. みてねみまもり gps. <https://mitene.us/gps/senior>. Accessed on 19 February, 2024.
- [6] 土橋有理, 松田裕貴, 諏訪博彦, 安本慶一ほか. 高齢者の社会的交流増進を支援する行動変容システムの検討. 2023 年度 情報処理学会関西支部 支部大会 講演論文集, Vol. 2023, , 2023.
- [7] Wolfgang Lechner and Stefan Baumann. Global navigation satellite systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 25, No. 1-2, pp. 67–85, 2000.
- [8] Safar M Asaad and Halgurd S Maghdid. A comprehensive review of indoor/outdoor localization solutions in iot era: Research challenges and future perspectives. *Computer Networks*, Vol. 212, p. 109041, 2022.
- [9] Petros Spachos and Konstantinos N Plataniotis. Ble beacons for indoor positioning at an interactive iot-based smart museum. *IEEE Systems Journal*, Vol. 14, No. 3, pp. 3483–3493, 2020.
- [10] Ramsey Faragher and Robert Harle. Location fingerprinting with bluetooth low energy beacons.

IEEE journal on Selected Areas in Communications,
Vol. 33, No. 11, pp. 2418–2428, 2015.

- [11] Thai-Mai Thi Dinh, Ngoc-Son Duong, and Kumbesan Sandrasegaran. Smartphone-based indoor positioning using ble ibeacon and reliable lightweight fingerprint map. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 20, No. 17, pp. 10283–10294, 2020.
- [12] 工藤大希, 堀川三好, 古館達也, 岡本東ほか. 近接ビーコンを利用した屋内位置測位手法の提案. 研究報告モバイルコンピューティングとパーベイスブシステム (MBL), Vol. 2015, No. 23, pp. 1–6, 2015.
- [13] Yu-Chi Pu and Pei-Chun You. Indoor positioning system based on BLE location fingerprinting with classification approach. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 62, pp. 654–663, 2018.
- [14] 春日井暁久, 毛利元昭, 船瀬新王, 内匠逸, 打矢隆弘ほか. 屋外位置推定のための内積を用いた ble 電波強度テンプレートマッチング手法の検討. 第 27 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 48–54, 2019.
- [15] Yuki Matsuda, Kentaro Ueda, Eigo Taya, Hirohiko Suwa, and Keiichi Yasumoto. Blece: Ble-based crowdedness estimation method for restaurants and public facilities. In *The 14th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU '23)*, pp. 1–6, 2023.