

BLEを用いた多点測位によるIoTデバイスの位置推定

高木 優希¹ 串田 高幸¹

概要: Bluetooth Low Energy(BLE)の発展により、屋内測位システムは非常に幅広いアプリケーションに使用されている。しかし、屋内測位は屋外に比べ物理的な障害物が密集している傾向があり、人や水蒸気による位置決定の誤差が大きくなり、対象が移動する場合やナビゲーションへの用途が難しい。また、電波干渉によってBLEのRSSI値を実際の距離へ正確に変換することができない。ラーニングフェーズでは、各ビーコンの精度を元に重み付けとRSSIから距離へ変換する多項式を算出する。本提案では、最も精度が高い個数かつ重みが最大化するようにビーコンを選択し、多点測位を行う。実験としてラーニングフェーズである多点測位の個数を変化させて精度を比較する。また、既存方式との比較を行い、実際の位置と多点測位によって得られた座標を比較し、誤差を求めることで評価を行う。

1. はじめに

背景

近年、一般的にビーコンとして知られている Bluetooth Low Energy(BLE)ビーコンは、高可用性、低コスト、低消費電力、配置の容易さから人気が高まっている [1]。これらの展開は、2020年に世界中で4億台のデバイスになると予測されていた [2]。また、スマートフォンによる電波受信が可能なることから、ナビゲーション目的での利用範囲が拡大している [3]。さらに、世界の屋内位置推定における市場は2022年までに40.99億ドルに達すると予想されている [4]。屋内測位では、GNSSに代表される人工衛星に代わり、電波を発信する機器を設置することが必要となる。ここで、屋内とは屋外と異なり壁やパーティションで仕切られている空間であり、電波の障害となる壁や水といった遮蔽物が存在する空間である。その中でもBLEビーコンは低コストかつ低消費電力であり、距離推定や屋内測位システムに適した技術の1つである [5]。

課題

屋内における位置決定は、屋外に比べ、物理的な障害物が密集している傾向があり、人が移動することによっても位置決定の誤差が大きくなるため、正確な位置を決定できない [6]。また、位置を示すRF(Radio Frequency)電波の強さは、送信機器と受信機器の経路内にある物理的な物体による減衰の影響を受けやすく、誤差が生じる。例を図1

に示す。BLEの受信機であるIoTデバイスと送信機であるBLEビーコンの間に人が水、水蒸気があった場合、電波はそれらを通過することで減衰する。また、壁に代表される屋内の物理的な障害物は電波を反射する。これらによって、一定距離以上離れた位置から電波を受信した場合、RSSI値が変化しなくなる [3]。したがって、BLEにおける測位では電波が届く距離と正確なRSSI値を取得できる距離は異なる。

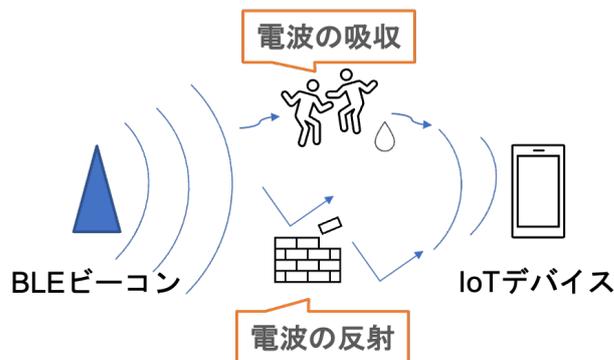


図1 電波の強さが変化する要因

電波の受信機から取得可能な受信信号強度は、これらの要因によって誤差が大きくなる。BLEを用いた屋内測位では、受信信号強度としてRSSI(Received Signal Strength Indication)が使用される。正確な位置決定を行うためには、RSSIを受信し実際の距離へ可能な限り正確に変換する必要がある [7]。従来の手法では誤差は100(cm)前後発生し、屋内におけるナビゲーションでは、進むことができないエリアに居ると検知される場合や壁にめり込むといった問題が発生する [6][7]。

¹ 東京工科大学大学院 バイオ・情報メディア研究科
コンピュータサイエンス専攻
〒192-0982 東京都八王子市片倉町1404-1

まず、図2の分布図から上に凸である山がいくつ存在するかを把握する。増加した場合を1, 減少した場合を-1, 増加も減少もしていない場合を0として数値に置き換える。この時、-1と0あるいは-1と1という組み合わせができた場合、その地点を山の終端として区切りを設ける。図3の場合、山は7つ存在することになる。7つの山のうち、最頻値を含む山を誤差を含む真の値とし、平均値を計算する。図3の場合、山7の橙色の枠で囲まれた範囲の平均値を計算することで基準値を求めている。図2の場合の基準値は、約-62.6(dBm)である。これらを各ビーコンに対して同様に150(cm), 200(cm), 250(cm), 300(cm)と計算を行う。これによって得られた近似曲線を図4に示す。

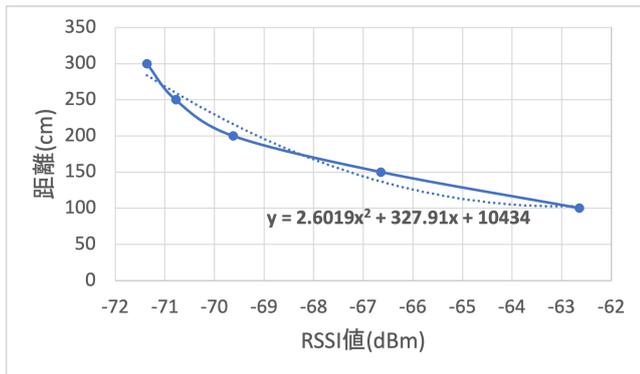


図4 100cm~300cmの値から算出した近似曲線

図4は、3つのビーコンのうち1つのビーコンのものである。縦軸は送信側のビーコンと受信側のビーコンとの距離、横軸は取得したRSSI値である。多項式として近似曲線を求めると、 $y = 2.6x^2 + 327.9x + 10434$ が得られた。この式を用いて、RSSI値から距離への変換を行う。

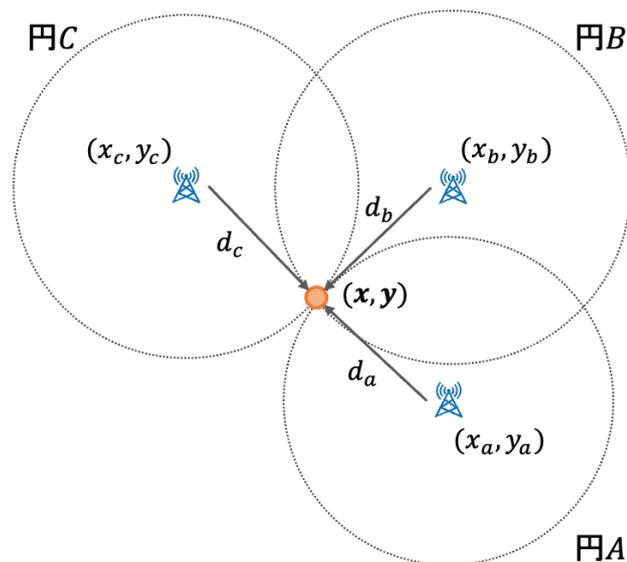


図5 三点測位による座標の計算方法 [12]

次に、本提案で採用している多点測位のうち、最小の個

数で行う三点測位の手法について説明する。各ビーコンから取得したRSSI値から距離を計算し、この距離を半径とした3つの円を作成する。これら3つの円の交点が1つに定まるとして計算式を解き、座標を算出する。得られた座標を予め作成した二次元平面上に反映させることで現在位置が視覚的にわかる。これらの説明を図5を用いて説明を行う。なお、図5はOguejioforらの計算方法に従って橙色の点の座標を求めている [12]。Oguejioforらは各ビーコンからの距離である d_a, d_b, d_c を以下の式で求めている [12].

$$\text{Sphere A; } d_a^2 = (x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 \quad (3.0)$$

$$\text{Sphere B; } d_b^2 = (x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 \quad (4.0)$$

$$\text{Sphere C; } d_c^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 \quad (5.0)$$

3つの式は独立した非線形連立方式であり、2つの円の交点を求めることは可能である。しかし、これらを連立方程式として解くことはできないため、球体交点のラジカル面を求める方法を用いる。Oguejioforらはこれらの式を並び替えることで、2つの交点 x および y を以下の式で求めている [12].

$$v_a = \frac{(d_b^2 - d_c^2) - (x_b^2 - x_c^2) - (y_b^2 - y_c^2)}{2} \quad (11.0)$$

$$v_b = \frac{(d_b^2 - d_a^2) - (x_b^2 - x_a^2) - (y_b^2 - y_a^2)}{2} \quad (12.0)$$

$$y = \frac{v_b(x_c - x_b) - v_a(x_a - x_b)}{(y_a - y_b)(x_c - x_b) - (y_c - y_b)(x_a - x_b)} \quad (13.0)$$

$$x = \frac{v_a - y(y_c - y_b)}{(x_c - x_b)} \quad (14.0)$$

以上の式を用いて x と y を算出することで図5の座標を求めている。この時前提条件として、 d_a, d_b, d_c が正しく距離に変換され、3つの縁が重なっているものとする。

実験として、各BLEビーコンを300(cm)間隔で配置した場合を想定し測定した。その際のマッピング状態を図6に示す。ビーコンAを(0,0)、ビーコンBを(300,0)、ビーコンCを(0,300)の地点に配置し、測定対象のユーザが(170,200)に居るものとして位置を推定した。

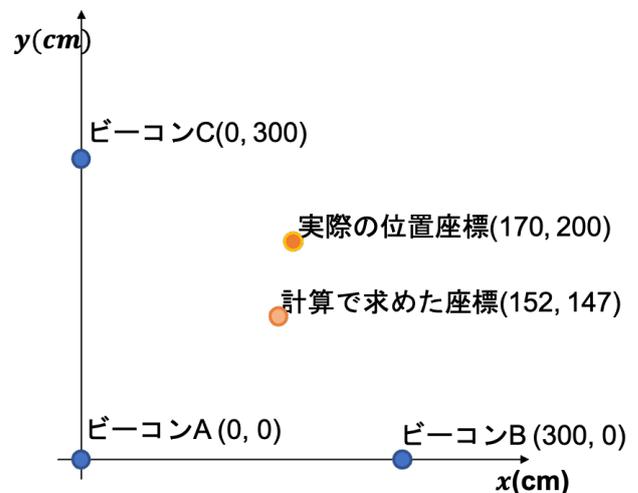


図6 三点測位の実験結果

なお、単位は(cm)である。結果として(152,147)の座

標が得られた。ユークリッド距離による誤差は約 56(cm) となった。しかしながら、前述の通り、誤差が大きく、300(cm)x300(cm) 内の測定では最大でユークリッド距離約 150(cm) の誤差が出る結果となった。さらにユーザの位置が 300(cm) 以上離れた場合、RSSI 値から正しく距離への変換ができないことが発生した。したがって、300(cm) 以上の距離が離れた状態で RSSI 値を実際の距離に変換することは現実的でないという結果になった。これらの基礎実験を踏まえて提案を行う。

提案方式

基礎実験で得られた値をもとに提案を行う。本提案は、配置されているビーコンのうち、最も精度が高い個数かつ重みが最大化するように計算に使用するビーコンを選択し、多点測位を行う。提案で用いる精度の高い多点測位の個数や重み付けはラーニングフェーズによって測定及び計算される。ラーニングフェーズの概要を図 7 に示す。

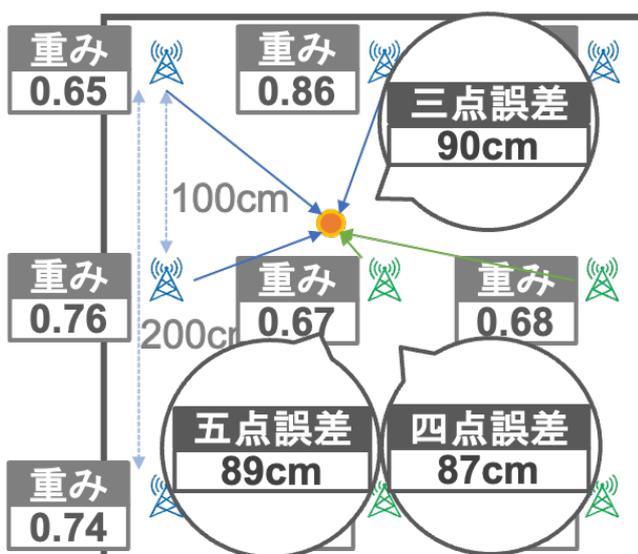


図 7 ラーニングフェーズの概要

ラーニングフェーズとして、まず BLE の RSSI 値から実際の距離へ変換するため、100(cm) の時の基準値を決定する。座標があらかじめ入力する青色のビーコンを用いて 100 回以上測定を行い、図 3 のようにして基準値を計算する。その後、200(cm)、300(cm) と青色のビーコンのみで測定可能な距離の中で基準値をそれぞれ求め、近似曲線としての多項式を算出する。

次に、各ビーコンの重みを計算する。青色のビーコンは実際の距離との誤差と、座標の計算対象である橙色の点までの距離から重みの計算を行う。緑色のビーコンは取得した RSSI 値のばらつきと、橙色の点までの距離から重みを計算する。重みは 0.00~1.00 の範囲で計算し、1.00 に近いほ

ど多点測位に用いる優先度が高くなる。

最後に、橙色の点を三点以上の個数を用いて測位を行い、最も誤差が小さい個数を求める。図 7 の環境の場合、四点測位が用いられることとなる。これを行うことによって、周囲の環境に適応させることが可能である。このラーニングフェーズでは電波の減衰が著しい距離および RSSI 値を加味した計算となっている。RSSI 値は電波が届いても変化するのは一定距離であり、電波は距離の 2 乗に反比例して減衰するのである [3]。したがって、電波が届いたとしても距離が遠すぎることによって電波の減衰が著しく、正しい RSSI 値が得られない場合に対処するためである。

まず、BLE ビーコンの配置状態を半自動的にマッピングを行う。三点測位に関する配置を図 8 に示す。図 8 の青いビーコンは予め座標が与えられているものとし、範囲内の緑色のビーコンの位置を求める。

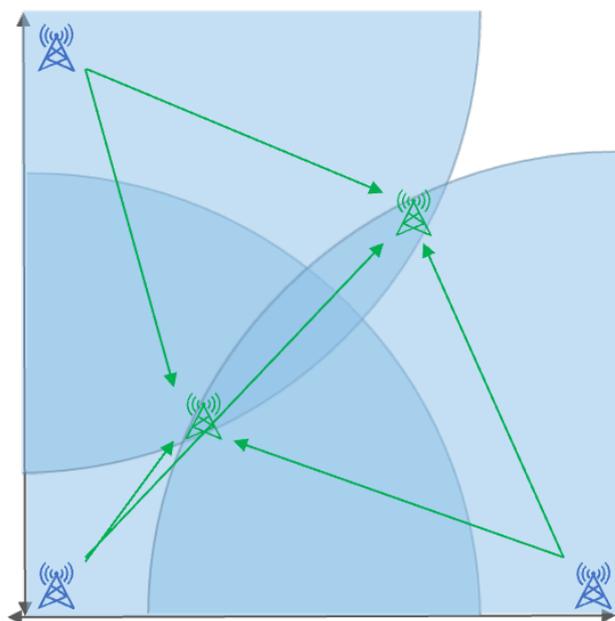


図 8 三点測位による座標推定

図 8 では、3 つの青いビーコン全ての範囲内にあったものは 2 つであったため、2 点の座標を算出する。算出方法は基礎実験の三点測位と同様である。

次に、図 9 に示すように、緑のビーコンを含む三点測位を用いて、橙のビーコンの座標を算出する。三点間測位を行う際の 2 つが正しい値を得られる場合は、緑のビーコンを 1 つ使用する。1 つが正しい値を得られる場合は、2 つの緑のビーコンを使用する。全ての青いビーコンが測定範囲内にない場合は、3 つ緑のビーコンを使用する。このようにすることで、絶対位置である青いビーコンを主として使用し、正しく RSSI 値が取得できない距離に対象のビーコンがあった場合に緑のビーコンを用いる。一定距離以上は正しい RSSI 値が得られないため、誤差を低減させることが可能である。

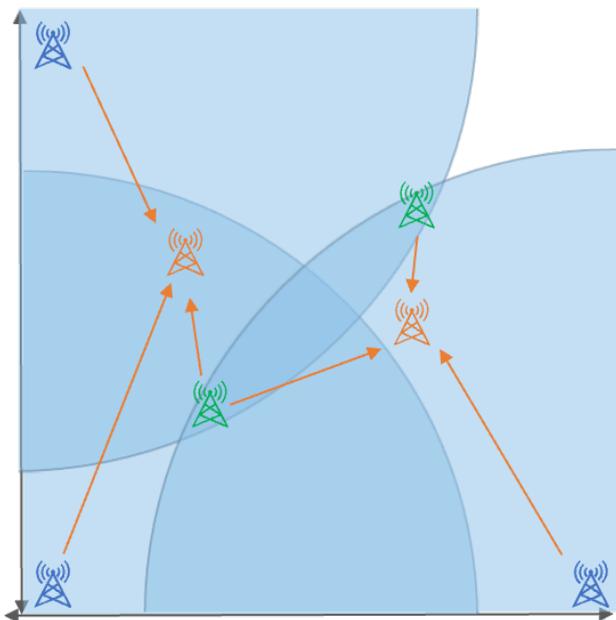


図 9 2ホップ目の座標推定

ユースケース・シナリオ

ラーニングフェーズとして、実際の機器を二次元平面上にマッピングを行うものとする。本提案は、ショッピングモールでの商品までのナビゲーションや美術館での作品までの案内に使用可能である。前者は三点測位を用いて、リアルタイムに位置決定を行うものであり、図 10 にシナリオ図を示す。

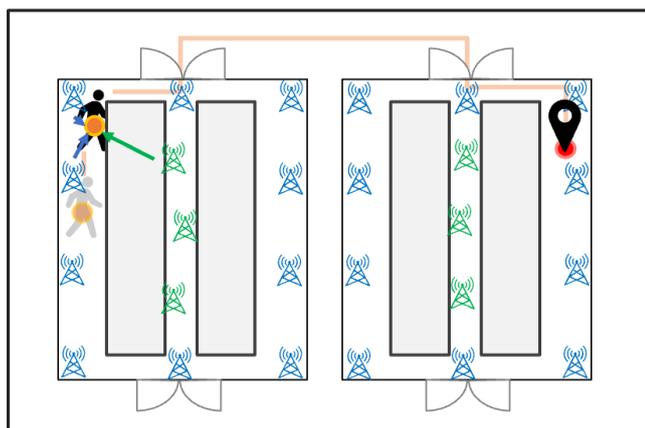


図 10 商品までのナビゲーションシナリオ図

ユーザはスマートフォンに代表される IoT デバイスを持ち歩いているものとし、ブラウザを通してマップを視覚的に理解できるとする。IoT デバイスは周囲の BLE ビーコンから送信される電波を受信し、RSSI 値を取得し、サーバへ送信する。サーバ上で座標の計算が行われ、マップに反映される。これらの一連の流れを繰り返し行うことによ

て屋内におけるリアルタイムでの位置決定が可能となる。この仕組みをもとに、ユーザが望む商品の場所までのルートを算出し、ナビゲーションを行う。後者では、ユーザが美術館の展示物に近づいた場合に対象の展示物の説明が音声として出力されるようになる仕組みである [13]。

ユーザが持つ IoT デバイスと展示物に設置されている BLE ビーコンとの距離を算出し、範囲内に近づいた場合に音声が出力される。本提案においてもユーザの位置がリアルタイムにわかるため、特定の展示物に近づいた場合にイベントを実行することが可能である。また、システムを導入直後であり、BLE ビーコンがメッシュ状に配置できず正確な RSSI 値が取得できる範囲外に BLE ビーコンが設置されていた場合に対処が可能である。

4. 実装と実験方法

実装

本研究では BLE ビーコンおよび IoT デバイスを用いて RSSI 値の取得とサーバへ送信した。実測した RSSI 値はサーバ上で座標の計算およびマッピングが行われる。図 11 にソフトウェア構成図を示す。

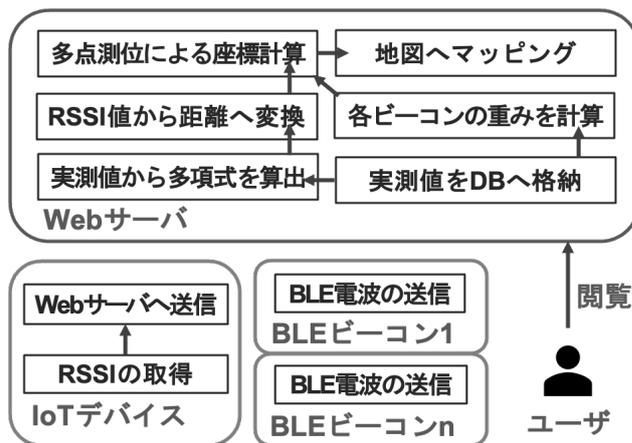


図 11 ソフトウェア構成図

図 11 では、IoT デバイスが周囲の各 BLE ビーコンから出力されている電波から RSSI 値を取得し、Web サーバへ送信する。送信された RSSI 値は実測値 DB に格納され、距離への変換が行われる。その後、座標が算出され、地図へマッピングされる。ユーザはブラウザを通してマップを確認する。

実験環境

本研究で使用した機器は BLE ビーコン、IoT デバイスである。BLE ビーコンおよび IoT デバイスは ESP-WROOM-32 を 4 台使用し、それぞれ受信側、送信側として用いた。IoT デバイスの位置を座標として計算およびマッピングを行うために Web サーバとして Ubuntu18.04 を OS とする仮

想マシンを用いた。図 12 に測定を行う実験図を示す。

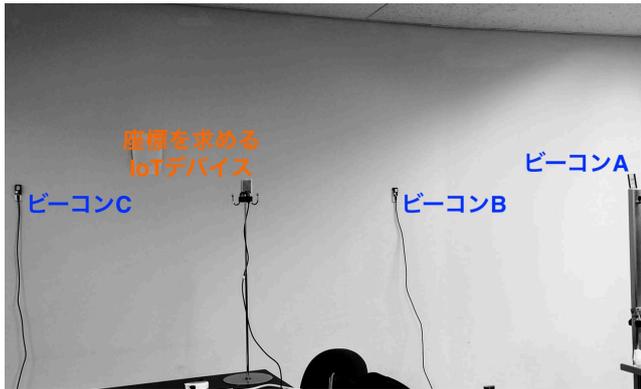


図 12 位置決定のための実験図

壁および設置物にそれぞれ ESP-WROOM-32 を設置し、図 12 のように各 ESP-WROOM-32 間に障害物がないように配置を行う。なお、配置する際はメジャーによって距離を測定し、正確な位置に設置を行う。ビーコン B を起点として、それぞれ x 軸方向と y 軸方向にそれぞれビーコン A およびビーコン C を設置する。図 12 では、三点測位の様子を表しているが、最も精度が出る個数まで観測点を増加させ、多点測位を行う。

5. 評価手法と分析手法

評価方法として、提案内容の精度を算出し、定量評価を行う。比較対象は以下の 3 つである。

- 絶対座標のみでの多点測位
- 算出したビーコンによる多点測位
- 既存方法の多点測位

絶対座標での多点測位では、ラーニングフェーズによって最も精度が高い個数にて位置座標の決定を行い、実際の座標との誤差を比較する。算出したビーコンによる多点測位では、2 ホップ目のビーコンも使用し、2 ホップ目まで考慮した重み付けを行い、多点測位を行う。既存方法の多点測位では、文献調査の後、精度が高いと明記された個数で多点測位を行い、提案手法との精度比較を行う。距離と誤差をグラフ化し、基礎実験で得られた式を確率分布化する。さらに、ユーザの現在位置の誤差や三点間測位と近接性方式での精度評価を行う。

6. 議論

提案手法は、基礎実験によって得られた値をもとに多項式を作成し、計算に用いている。そのため、この多項式が実際と異なる場合、RSSI 値から距離への変換の誤差が大きくなる。ラーニングフェーズではあるが、RSSI 値を距離に変換する数式をより正確にする必要がある。本稿における基礎実験では、各 300 回以上計測を行い、図 3 の様に

して基準値を定めていた。最頻値のみを採用する場合や、全体の平均値、中央値といった異なる基準値の求め方を試し、誤差を比較することで精度が向上可能である。さらに近似曲線の算出方法を最小二乗法をはじめとする異なる手法を試行し、誤差を比較することでより精度が向上可能である。

7. おわりに

本研究では、BLE の RSSI を用いた屋内測位における位置決定の誤差が大きい点を課題としている。この課題を解決するため、ラーニングフェーズによって各ビーコンの精度を測定し、これを元に重み付けと RSSI から距離へ変換する多項式を算出する。その後、最も精度が高い個数かつ重みが最大化するようにビーコンを選択し多点測位することで精度の改善を行う。また、ラーニングフェーズで周囲の環境に適応させることで、BLE の RSSI 値を実際の距離に変換する際の誤差を削減可能である。これによって、本研究は BLE を用いた屋内測位の位置精度改善に貢献可能である。

参考文献

- [1] Spachos, P., Papapanagiotou, I. and Plataniotis, K. N.: Microlocation for Smart Buildings in the Era of the Internet of Things: A Survey of Technologies, Techniques, and Approaches, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 35, No. 5, pp. 140–152 (2018).
- [2] V. R. Evans: Beacons on Track to Hit 400m deployed by 2020 reports unicast (2016).
- [3] 国土交通省 国土地理院測地部: 屋内測位のための BLE ビーコン設置に関するガイドライン (2018).
- [4] I. Market: Indoor Location Market by Technology, Software Tools, Service Global Forecast to 2022 — Market and Markets, Marketsandmarkets.com (2019).
- [5] Subhan, F., Khan, A., Saleem, S., Ahmed, S., Imran, M., Asghar, Z. and Bangash, J. I.: Experimental analysis of received signals strength in Bluetooth Low Energy (BLE) and its effect on distance and position estimation, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, p. e3793.
- [6] Ma, Z., Poslad, S., Bigham, J., Zhang, X. and Men, L.: A BLE RSSI ranking based indoor positioning system for generic smartphones, *2017 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, pp. 1–8 (2017).
- [7] Subhan, F., Hasbullah, H., Rozyyev, A. and Bakhsh, S. T.: Analysis of Bluetooth signal parameters for indoor positioning systems, *2012 International Conference on Computer Information Science (ICCIS)*, Vol. 2, pp. 784–789 (2012).
- [8] Jianyong, Z., Haiyong, L., Zili, C. and Zhaohui, L.: RSSI based Bluetooth low energy indoor positioning, *2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 526–533 (online), DOI: 10.1109/IPIN.2014.7275525 (2014).
- [9] Beauregard, S. and Haas, H.: Pedestrian Dead Reckoning: A Basis for Personal Positioning, *PROCEEDINGS OF THE 3rd WORKSHOP ON POSITIONING, NAVIGATION AND COMMUNICATION* (2006).

- [10] Mackey, A., Spachos, P., Song, L. and Plataniotis, K. N.: Improving BLE Beacon Proximity Estimation Accuracy Through Bayesian Filtering, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 3160–3169 (2020).
- [11] Dinh, T.-M. T., Duong, N.-S. and Sandrasegaran, K.: Smartphone-Based Indoor Positioning Using BLE iBeacon and Reliable Lightweight Fingerprint Map, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 20, No. 17, pp. 10283–10294 (online), DOI: 10.1109/JSEN.2020.2989411 (2020).
- [12] S, O. O., N, A. A., C, E. H. and U, O. A.: Trilateration Based localization Algorithm for Wireless Sensor Network, *International Journal of Science and Modern Engineering*, Vol. 1 (2013).
- [13] Spachos, P. and Plataniotis, K. N.: BLE Beacons for Indoor Positioning at an Interactive IoT-Based Smart Museum, *IEEE Systems Journal*, Vol. 14, No. 3, pp. 3483–3493 (2020).