

# RSSIの度数分布を用いた 凸の選択による多点測位の誤差削減

高木 優希<sup>1</sup> 串田 高幸<sup>1</sup>

**概要:** Bluetooth Low Energy(BLE) は、屋内測位に使用される技術の1つである。BLEを使用した屋内測位は、電波の強度をもとに位置を計算する。この時、巻尺で測定した実際の位置と計算した位置の間に誤差が発生し、正確な位置測位ができない。設置されている中で誤差の小さいBLEビーコンを選択することで、正確な位置測位が可能である。本稿では信頼度と近接度という2つの指標を作成し、複数のBLEビーコンを選択することで、距離の誤差を小さくする方法を提案する。信頼度は、各BLEビーコンに代表値を設け、この代表値が得られる最小確率である。近接度は、基礎実験の結果からRSSIの減衰に従って距離が近いほど大きくなる重みである。実験方法は9個のビーコンと1個のIoTデバイスを用いて行い、既存手法やメジャーで測定した位置と誤差の比較を行う。また、屋内環境や人の有無による誤差の変化を測定する。評価方法は、L2ノルムによる誤差を比較する。

## 1. はじめに

### 背景

一般的にビーコンとして使用されるBLE(Bluetooth Low Energy)ビーコンは、低コスト、低消費電力、開発の容易さから人気を高めている[1]。BLE技術は、Bluetooth Special Interest Group(SIG)が策定した無線パーソナルエリアネットワーク技術の規格である[2]。BLEは2.4GHzの周波数で動作し、変調方式であるガウス周波数シフトキーイングを採用している。ビーコンは一定の間隔でその送信範囲内で信号をブロードキャストしている。BLE対応デバイスはこの信号を受信し、アプリケーションに用いられている。用途として、屋内位置推定やユーザーのトラッキングに用いられている[3],[4]。Ericsson社のレポートによれば、屋内測位を含む用途で使用されるShort-range IoTは、2022年に接続台数は125億台ほどであり、2027年には243億台になると予想されている[5]。BLEビーコンは一般的に電池や安価なハードウェアで動作するため、電波強度は不安定になりがちであり、このばらつきを考慮する必要がある[6]。電波強度を表す指標の1つにRSSI(Received Signal Strength Indicator)があり、屋内測位ではRSSIを用いて対象物の位置を計算する[7]。

### 課題

BLEのRSSIを利用した屋内測位では誤差が発生する[8],[9],[10]。誤差が発生する場合、図1のようにショッピングモールや地下鉄でのナビゲーションが機能しない。図1では実際の位置と算出した位置が離れており、壁と重なって表示されている例を示している。



図1 誤差によって正しい位置が求められない課題

これは、屋内施設に多くの障害物があるためである[11]。壁や家具、人が障害物となり、電波の反射や吸収を引き起こしている。さらに、WiFiや他の機器による無線干渉によって、ビーコンから発せられる信号に影響を与えている。周囲の環境から影響を受けることによって、同じ位置で測定してもRSSIが変化し続ける[12]。本稿では屋内ナビゲーションで細い通路を識別するため、多点測位における以上の誤差を課題とする。

<sup>1</sup> 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

## 各章の概要

2章では、本稿の関連研究について紹介し、課題をどのように解決しているのかと、残された課題について言及する。3章では、本稿における提案方式について具体的な説明と、それをういたユースケース・シナリオについて述べる。4章では、提案方法をもとに開発したソフトウェアの実装と実験方法について説明する。5章では、提案手法を構成する基礎実験をもとに評価手法と分析手法を述べる。6章では、提案や基礎実験に関する議論を述べる。最後に7章では、本稿のまとめを述べる。

## 2. 関連研究

本稿の対象としている課題を関連研究ではどのように解決しているかについて述べる。

Jayakanth らの研究では、屋内測位と道案内システムに関するサーベイを行った [13]。歩行者自律航法や Wi-Fi, RFID, 可視光, Bluetooth, 超広帯域無線の既存のシステムに対しての分類や分析を行った。また、過去6年間に提案された屋内測定と道案内の方法についてレビューを行った。さらにそのメリットやデメリットを述べ、評価基準についても説明を述べた。評価基準として精度や正確さ、コスト、スケーラビリティ、ロバスト性、ユーザビリティが挙げられており、本稿も精度や正確さを対象としている。

Lu らの研究では、BLE ベースの屋内システムについて述べている [14]。複数のセンサーが設置され、ユーザの特定の位置があらかじめ記録しておき、RSSI を取得している。筆者たちは三辺測量アルゴリズムによる座標の計算と、36箇所ある1平方メートルに区切った範囲を用いてユーザの位置特定を行っている。さらに平滑化手法を用いてノイズの除去を行っている。1平方メートルとして評価を行っているため、これ以上の誤差削減を行う必要がある。

Myungin らの研究では、4つの BLE ビーコンと2つの Wi-Fi アクセスポイントを使用し、経路損失モデルを求めた [15]。各信号は基準距離 1[m] から 13[m] の間で 2[m] 間隔で 1 分間測定した。計算で求めた経路損失モデルを用いてマップを作成し、シミュレーションで測位データを生成した。BLE 信号は Wi-Fi のアクセスポイントと比較して信号の強さが弱いため、より多くのビーコンが必要という結果であった。実験データは正規分布と仮定してシミュレーションが実施され、誤差も 5[m] 以上あるため、分布をより現実的にし誤差も 0.5[m] 以下にする必要がある。

## 3. 提案

本提案の目的は、屋内に設置されたビーコンの中で外れ値の数が小さいビーコンを選択することで多点測位の誤差を削減することである。本提案は、大きく分けて6つのステップに分かれている。

### (1) RSSI から距離へ変換する式の構築

- (2) 各ビーコンの信頼度を計算
- (3) 各ビーコンの近接度を計算
- (4) 外れ値の少ないビーコンを選択
- (5) 多点測位による座標計算
- (6) 各地点で最も誤差の小さい個数を採用

なお、ここでの距離とは電波を受信する IoT デバイスと電波を発信するビーコンの間の距離を指す。本提案における多点測位は、IoT デバイスとビーコンの距離を球の半径として座標を計算するため、RSSI から距離へ変換する必要がある。そのため、事前に RSSI を取得し変換用の式を求める。次に、設置されたビーコンの中から外れ値の数が少ないビーコンを選択するため、選択する際の基準が必要である。この基準が信頼度と近接度である。信頼度はビーコンの電波の範囲内で特定の RSSI 値がどの程度の割合で取得できるかを表すものであり、近接度は事前に取得した RSSI をもとに距離に対して重みをつけたものである。そして、測定を行っている部屋で最も誤差が小さくなる数を求めるため、座標計算に使用するビーコンの数を変化させて個数を決定する。

### 提案方式

本提案は6つのステップで構成されており、これによって測定環境で最も誤差の小さくなる個数と外れ値の小さいビーコン選択に基づいて多点測位の誤差削減が実現可能となる。本提案を構成する6つのステップの詳細を述べる。

#### (1) RSSI から距離へ変換する式の構築

最初のステップは RSSI から距離へ変換する式を求める。

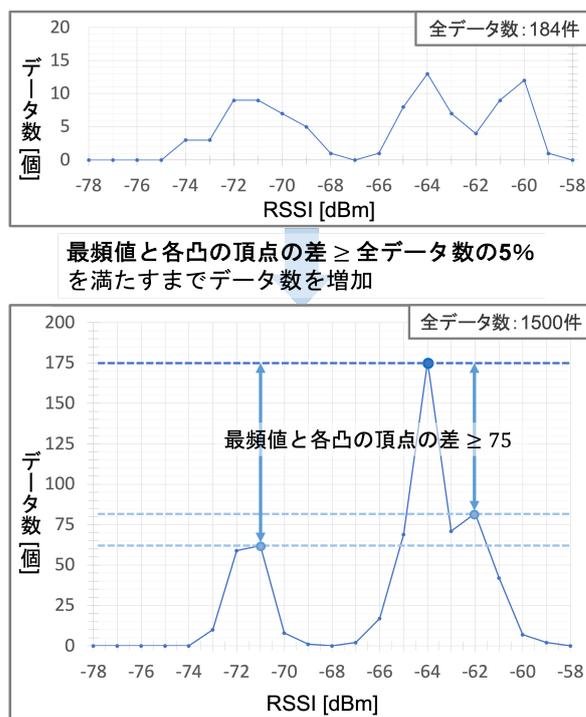


図 2 データ数の増加による凸の選択

このステップの目的は、RSSI から距離へ変換する式を求めることによって、多点測位の座標計算で IoT デバイスとビーコンの距離を球の半径として計算できるようにすることである。ここで、本稿では RSSI の度数分布を折れ線グラフとした際にできる山を凸と呼ぶ。基礎実験によって得られた RSSI は図 2 の上部のように度数分布とした際に不規則になることが多く、特定の距離に対する RSSI の値は一意に定められない場合があった。これを解決するため、最頻値と各凸の頂点の差が全データ数の 5% を満たすまでデータ数を増加させ、統計的に一意に定める。これは、図 2 のように過去に得られた RSSI の上限と下限の差が 20[dBm] の場合が多く、度数分布とした時、各 RSSI 値は一樣に分布した場合に 5% となる。実際には一樣に分布はしないため、少なくとも 5% 以上の差があることで最頻値の値が信用できるものとした。図 2 の場合では、184 件から 1500 件まで RSSI のデータ数を増加させることで条件を満たした。ここで、最頻値の値を使用するのではなく、最頻値を含む凸の平均値を基準値  $ssv$  として計算する。



図 3 基準値  $ssv$  の計算

計算の様子を図 3 に示す。図 3 では、図 2 の下部のグラフから基準値  $ssv$  を求めている。これは、電波が揺らぎ、RSSI が最頻値よりずれる可能性があるため、この揺らぎを考慮するために平均を求めた。

### (2) 各ビーコンの信頼度を計算

2 つ目のステップは各ビーコンの信頼度を計算する。このステップの目的は、測定環境においてある地点の座標を計算する際に、基準値  $ssv$  をもとに代表となる値が出現する割合を求めることである。つまり、各ビーコンごとに代表値  $dsv$  を定め、そのビーコンの電波受信範囲内で  $ssv$  が出現する最小確率を計算している。このステップは大きく 3 つに分かれて計算対象のビーコンの信頼度を求める。計算対象のビーコンから正確な RSSI を取得できる範囲を図 4 の橙色の部分とする。この時、範囲内にビーコン  $B, C$  が存在したとする。計算対象のビーコンから一時的にビー

コン  $B, C$  で電波を受信し、RSSI を取得する。取得した RSSI の中で割合が少ないものを除外し、 $ssv$  に近い凸を選択する。この①の流れを図 5 に示す。図 5 では、度数分布とした際に複数の凸が出現した例である。

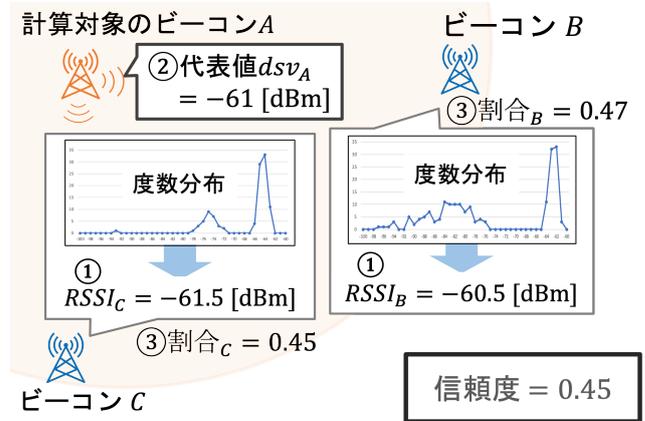


図 4 信頼度の計算

まず、各凸のうち、頂点の RSSI の数が全データの 10% 以下は外れ値として除外する。これは基礎実験で取得した RSSI をもとに閾値を定めた。図 5 の灰色の範囲に頂点がある凸は全て除外し、凸を 3 つまで絞り込む。3 つの凸のうち、基準値  $ssv$  に最も近い凸を選択する。図 3 の場合、 $-65[\text{dBm}] < ssv < -64[\text{dBm}]$  であるため、凸 2 が対象となる。そして、凸 2 の範囲の平均値を計算することで  $RSSI_i$  が求められる。

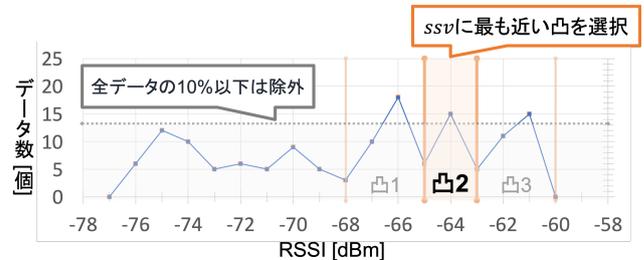


図 5 外れ値の除外と凸の選択

このようにして図 4 の①を計算する。次に代表値  $dsv$  を求める。①で求めた  $RSSI_B$  と  $RSSI_C$  の平均値を計算することでビーコン  $A$  の代表値  $dsv_A$  が求まる。図 4 の②では  $-61[\text{dBm}]$  となる。そしてビーコン  $B, C$  で取得した RSSI の中で  $dsv_A$  が含まれる割合を計算する。この割合が③で得られた値である。図 4 では割合  $B$  が 0.47、割合  $C$  が 0.45 である。計算対象のビーコン  $A$  から正確な RSSI が取得できる範囲内にあるビーコンは全て同様に①-③を計算し、この中で最も小さい割合を信頼度とする。図 4 では 0.45 となる。信頼度を計算することによって、ビーコン  $A$  の橙色の範囲内であれば、 $-61[\text{dBm}]$  が少なくとも 45% で出現するため、重みの 1 つとして使用した。

### (3) 各ビーコンの近接度を計算

3つ目のステップは各ビーコンの近接度を計算する。このステップの目的はIoTデバイスとビーコンの距離の近さによって重みをつけることである。基礎実験やフリスの伝達公式からRSSIは距離の2乗に反比例して減衰する。そのため、距離が遠いほど1[m]あたりの変化量[dBm]が大きくなる。つまり、距離が近いほどRSSIのブレによる影響が小さくなる。この特性を利用して、基礎実験で求めた距離からRSSIへの変換式をもとに近接度を求める式を計算する。これを図6に示す。

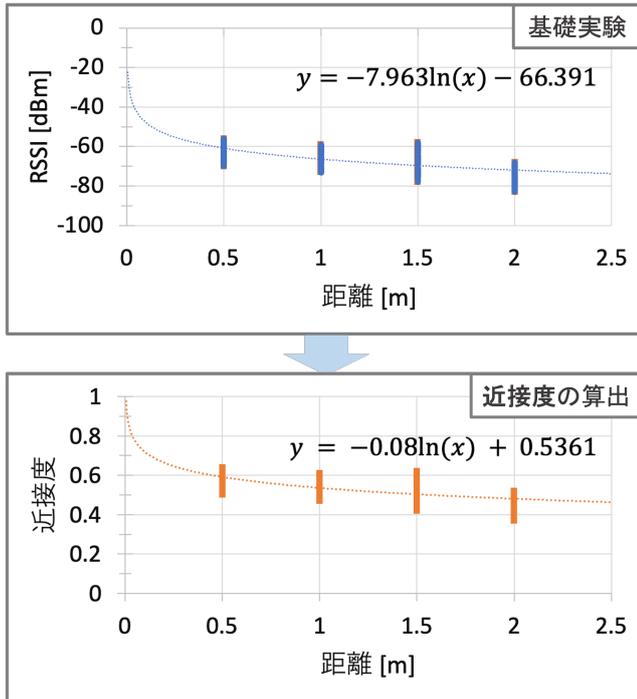


図6 距離に対する重み付け

近接度は最小値を0, 最大値を1として減衰の係数と切片を再計算した。基礎実験で求めた係数と切片はそれぞれ-7.963と-66.391であった。これを近接度を求める式に再計算し、係数は-0.08, 切片は0.5361となった。図7に図6の距離に対する変化量のグラフを示す。

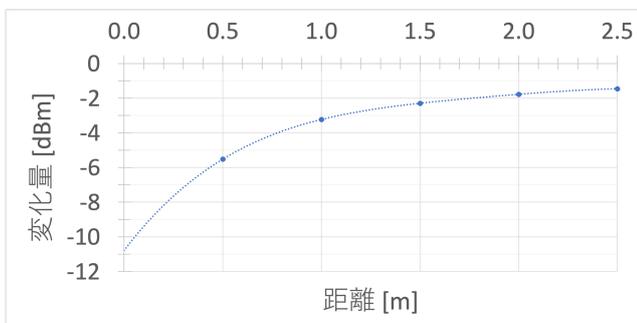


図7 距離に対する変化量

図7では、0.5[m]から1.0[m]の間では、0.5[m]に対し

て約-5.519[dBm]変化する。これと比較して、1.5[m]から2.0[m]の間では、0.5[m]に対して約-2.291[dBm]変化する。これは、前者が1[dBm]あたり約1.223[cm]の変化に対して、後者が1[dBm]あたり約15.486[cm]の変化である。そのため、図6の近接度を求める式を用いることで、距離が近いほど基礎実験のRSSIの変化と同様にして値が大きくなる。誤差が発生した際にも座標計算で影響が小さくなる近いビーコンを優先的に選択した。

### (4) 外れ値の少ないビーコンを選択

4つ目のステップは、(2)と(3)によって求めた信頼度と近接度を用いてビーコンの選択を行う。このステップの目的は外れ値の少ないビーコンを優先的に選ぶことである。

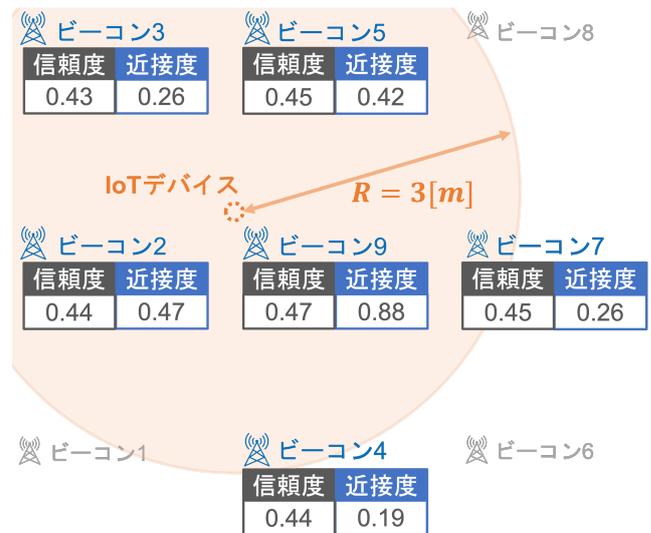


図8 使用するビーコンの選別例

信頼度はIoTデバイスが現在の位置でそのビーコンの代表値dsvが得られる確率を示している。近接度はIoTデバイスの現在の位置からそのビーコンまでの距離に対する重みを示している。ビーコンの選択の流れを図8に示す。

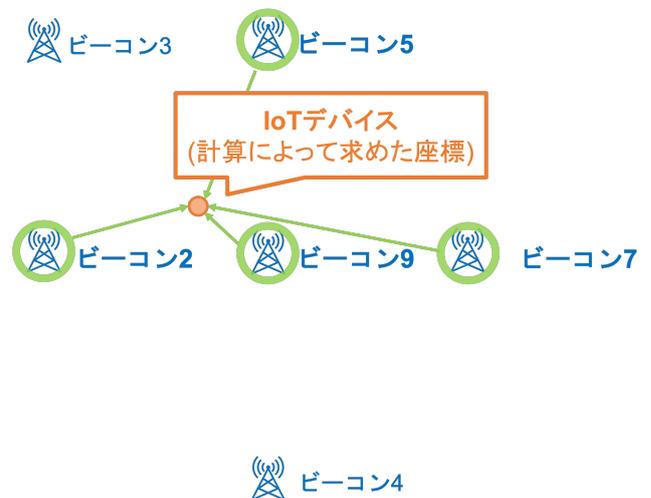


図9 座標計算に使用するビーコンの選択例

ここで、IoT デバイスが正確に RSSI を取得できる範囲を橙色の範囲とする。図 8 ではこの範囲を 3[m] とし、範囲外としてビーコン 1, 6, 8 は選択から除外とする。ビーコン 2, 3, 4, 5, 7, 9 に対し、近接度で降順に並び替えた後、信頼度で降順に並び替える。

図 9 ではビーコンを 4 つ選択する場合を示す。並び替えの結果、ビーコン 2, 5, 7, 9 が選択されたとする。この場合は 4 つのビーコン 2, 5, 7, 9 で座標計算を行う。そして IoT デバイスの位置を計算によって求める。

#### (5) 多点測位による座標計算

5 つ目のステップでは、多点測位による座標計算を行う。ここで、2 つの前提条件を設け、計算を行う。1 つ目の条件は、電波がビーコンから球体上に放出されるとすることである。これは 3 次元的に計算を行う際に現実のように歪な立体とすると他の環境変数が必要となるからである。2 つ目の条件は、IoT デバイスの  $z$  座標はあらかじめ与えられているものとする。これはユーザの身長から IoT デバイスの高さを推測するということである。

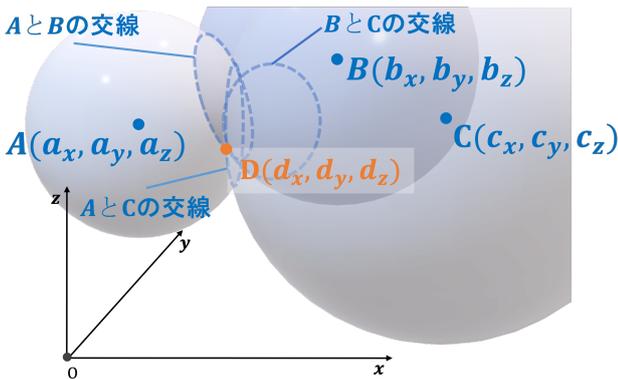


図 10 座標の計算方法

これら 2 つの条件の下、座標計算を行う。座標計算の流れを図 10 に示す。座標の計算は、IoT デバイスと各ビーコンの距離を半径とする球の交点を求めている。3 つのビーコンを  $A, B, C$  とし、IoT デバイスの位置を  $D(d_x, d_y, d_z)$  とする。ここで、前提条件から  $d_z$  はわかるものとする。 $A, B, C$  の  $x, y, z$  座標をそれぞれ  $a_x, a_y, a_z, b_x, b_y, b_z, c_x, c_y, c_z$  とすると、球の方程式は式 (1)-(3) で表すことができる。

$$(x - a_x)^2 + (y - a_y)^2 + (z - a_z)^2 = r_A^2 \quad (1)$$

$$(x - b_x)^2 + (y - b_y)^2 + (z - b_z)^2 = r_B^2 \quad (2)$$

$$(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 + (z - c_z)^2 = r_C^2 \quad (3)$$

さらに上記 3 つの式を用いて、2 つの球面の交線が乗った平面の方程式を求める。式 (1) と式 (2) を用いた場合、

式 (4) となる。

$$\begin{aligned} & (2a_x - 2b_x)d_x + (2a_y - 2b_y)d_y + (2a_z - 2b_z)d_z \\ & = r_B^2 - r_A^2 + (a_x^2 + a_y^2 + a_z^2) - (b_x^2 + b_y^2 + b_z^2) \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) と同様に  $B, C$  あるいは  $C, A$  の組み合わせの式を作成し、連立方程式として解くことで座標の計算を行う。

#### (6) 各地点で最も誤差の小さい個数を採用

最後のステップでは、ビーコンを 3 個使用した場合から 9 個使用した場合まで誤差を比較し、最も誤差の小さい個数を採用する。これまでの研究により、同一の部屋内でも特定の位置において誤差が最も小さくなる個数は 4 個あるいは 5 個となった。これらの特定の箇所で測定した結果を全て合算し、平均を求めることで測定対象の部屋における最も誤差の小さい個数が決定できる。

#### ユースケース・シナリオ

提案手法は、屋内施設のナビゲーションに利用することができる。図 11 にショッピングモールでのナビゲーションのイメージ図を示す。



図 11 ユースケース図

ビーコンをあらかじめ一定間隔でショッピングモールに配置し、その間をスマホといった IoT デバイスを持ったユーザが通ることで座標の計算およびマッピングが可能となる。図 11 はナビゲーション時を表し、ブラウザにアクセスすることで自分の位置とどちらに行けば良いかを案内する。本提案を屋内ナビゲーションに入れることで細い道まで判断できる誤差が期待できる。

## 4. 実装と実験方法

本提案の使用言語は MicroPython1.18 と Python3.9.1 であり、BLE 電波の送受信や信頼度、近接度と座標計算のソフトウェアを作成した。また、使用した機材は ESP32(ESP-WROOM-32) を 10 台使用して測定を行った。本提案の実装は大きく分けて 3 つの要素がある。1 つ目は BLE の電

波を送信するビーコンである。2つ目は BLE の電波を受信し、RSSI の測定を行い、Web サーバへ送信する IoT デバイスである。3つ目は信頼度と近接度をもとにビーコンを選択し、座標計算を行う Web サーバである。

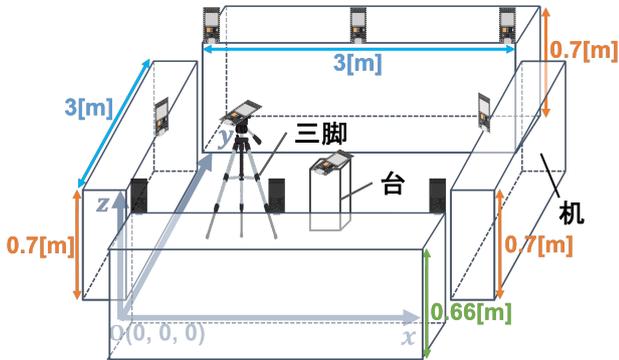


図 12 実験配置図

Web サーバで HTTP リクエストを受け取る方法として Flask フレームワークを利用した。また、RSSI は MongoDB を用いてデータの格納を行い、座標計算や誤差の計算、現在位置の表示を行った。

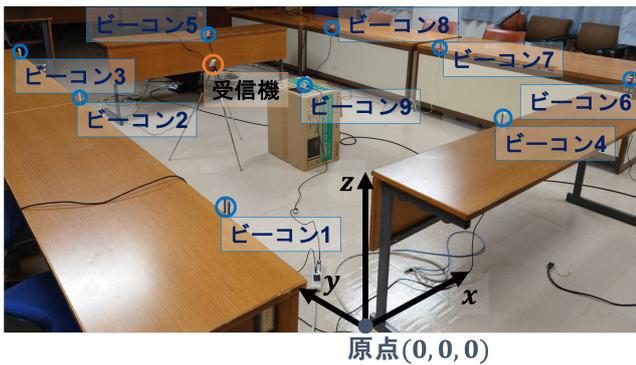


図 13 実際の配置の様子

実験時には、IoT デバイス 1 個、ビーコン 9 個の割合で測定を行った。実験時の ESP32 の配置を図 12 に示す。また、実際の配置の様子を図 13 に示す。机を用いて四隅を囲い、縦 3[m]・横 3[m] の空間を用意し、ビーコンを 1.5[m] 間隔で配置した。これは基礎実験の結果、ESP32 が正確に RSSI から距離へ変換できる距離が 3[m] 程度であったからである。机の高さは 0.7[m] と 0.64[m] を用意し、3 次元での計算が正しいかを検証した。IoT デバイスは三脚に固定し、移動させて測定を行った。

## 5. 評価手法と分析手法

評価方法は平均誤差 (m) の測定である。既存の測位手法、これまでの提案手法、本稿の提案手法の 3 つ手法に対してメジャーで測定した位置と比較する。また、座標計算に使用するデータ数と誤差の関係性についても評価を行

う。縦軸が平均誤差、横軸が RSSI のデータ数である。ここで、誤差の計算方法は、L2 ノルムによる誤差を用いている。さらに、異なる部屋での結果の比較や人の有無、人数による誤差の変化も評価の対象とする。

## 6. 議論

本提案では外れ値の除外とビーコンの選択方法に工夫し、誤差の削減を行っている。特定の位置に限っては 75% の確率で平均誤差が 0.449[m] となった。しかし、再現性としては低く、より確率を上げた状態での誤差削減が必要である。ここで、基礎実験で行った全ての実験の平均誤差を図 14 に示す。

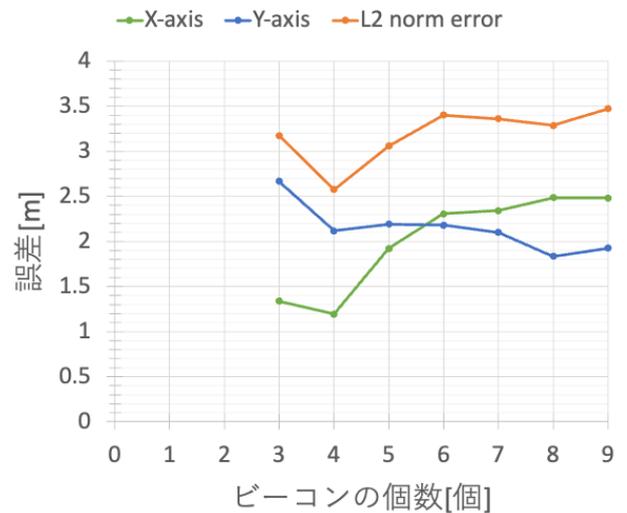


図 14 全ての実験の平均誤差

図 14 ではビーコンが 4 個の時が最も誤差が小さいということがわかる。しかし、実験の平均誤差を計算すると最も小さい 4 個の時でも 2.576[m] 発生している。本提案によってこれまでの実験の 75% 以上の確率で平均誤差を減少させると同時に、誤差が小さくなる確率自体も増加させる必要がある。また、これまでの実験は机や椅子のみの配置であり、人がいない環境であった。そのため、人の有無や人数による誤差の変化を比較する必要がある。

また、図 14 やこれまでの実験より平均誤差 1[m] 以下が実現できると予想される。さらに、80% 以上の確率で 0.4[m] になると予想される。

提案では、RSSI から距離に変換する式を求めていた。この時、一定の距離ごとに RSSI を取得し、その値をもとに近似曲線の係数と切片を求めていた。しかし、これまでは一方向のみであり、電波は 360 度全体に放射されるため、RSSI が基準として使用できない場合がある。図 15 は図 12 の中央の台の位置にビーコンを置き、ビーコンから四方に 90 度ずつ受信機を配置した。図 15 では、ビーコンの西側に BLE2、東側に BLE7、北側に BLE5、南側に BLE4 を

配置した際の RSSI の度数分布である。

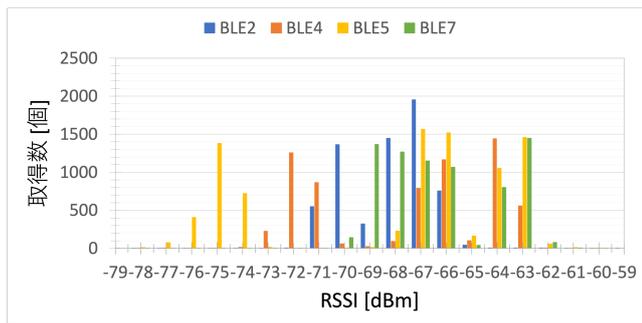


図 15 距離 1[m] の時に四方向で RSSI を取得した結果

それぞれの受信機で得られた RSSI の数は BLE2 が 6487 件、BLE4 が 6636 件、BLE5 が 8717 件、BLE7 が 7403 件で合計 29243 件をもとに度数分布を作成している。図 15 の結果からビーコンから送られてくる電波を受信する位置によって取得する RSSI の分布が変化することがわかる。重なっている部分が存在するため、この範囲から基準値  $ssv$  を求めることで、受信機がどの位置に存在しても正確な変換が可能となる。

## 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、外れ値の除外と信頼度と近接度という指標を作成し、各ビーコンごとに計算し、使用するビーコンを取捨選択をした。そして、3次元として座標計算を行い、個数決定をすることで誤差の削減を実現している。実験は 9 個のビーコンと 1 個の IoT デバイスを用いて行い、既存手法やメジャーで測定した位置と誤差の比較を行う。また、屋内環境や人の有無による誤差の変化を測定する。

## 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] Ji, M., Kim, J., Jeon, J. and Cho, Y.: Analysis of positioning accuracy corresponding to the number of BLE beacons in indoor positioning system, *2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, pp. 92–95 (2015).
- [3] 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).
- [4] He, W., Ho, P.-H. and Tapolcai, J.: Beacon Deployment for Unambiguous Positioning, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 4, No. 5, pp. 1370–1379 (2017).
- [5] Jonsson, P., Lundvall, A., Möller, R., Carson, S. and

- Davies, S.: *Ericsson Mobility Report June 2022*, Telefonaktiebolaget LM Ericsson (2022).
- [6] Echizenya, K. and Kondo, K.: Estimation of indoor position and motion direction for smartphones using DNN to BLE beacon signal strength, *2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-Taiwan)*, pp. 1–2 (2020).
- [7] Zhou, S. and Pollard, J.: Position measurement using Bluetooth, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 52, No. 2, pp. 555–558 (2006).
- [8] 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).
- [9] Kim Geok, T., Zar Aung, K., Sandar Aung, M., Thu Soe, M., Abdaziz, A., Pao Liew, C., Hossain, F., Tso, C. P. and Yong, W. H.: Review of Indoor Positioning: Radio Wave Technology, *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 1 (2021).
- [10] Pascacio, P., Casteleyn, S., Torres-Sospedra, J., Lohan, E. S. and Nurmi, J.: Collaborative Indoor Positioning Systems: A Systematic Review, *Sensors*, Vol. 21, No. 3 (2021).
- [11] Dalkılıç, F., Çabuk, U. C., Arıkan, E. and Gürkan, A.: An analysis of the positioning accuracy of iBeacon technology in indoor environments, *2017 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, pp. 549–553 (2017).
- [12] Zou, H., Huang, B., Lu, X., Jiang, H. and Xie, L.: A Robust Indoor Positioning System Based on the Procrustes Analysis and Weighted Extreme Learning Machine, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 15, No. 2, pp. 1252–1266 (2016).
- [13] Kunhoth, J., Karkar, A., Al-Maadeed, S. and Al-Ali, A.: Indoor positioning and wayfinding systems: a survey, *Human-centric Computing and Information Sciences*, No. 18 (2020).
- [14] Bai, L., Ciravegna, F., Bond, R. and Mulvenna, M.: A Low Cost Indoor Positioning System Using Bluetooth Low Energy, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 136858–136871 (2020).
- [15] 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).