

# RSSIの度数分布に基づく階級数を用いた ビーコンの位置決定による屋内測位誤差の削減

廣居 舜佑<sup>1</sup> 高木 優希<sup>2</sup> 串田 高幸<sup>1</sup>

**概要：**屋内空間では近距離無線通信による受信電界強度 (RSSI) を用いた屋内測位が使用されている。既存の研究では、人が2人以上通ることのできる通路幅 1.5m の格子状に BLE ビーコン (以下：ビーコン) を配置し、位置測位を行っている。ビーコンから送信された電波の RSSI をフィンガープリントとしてあらかじめ保存しておく。次に、測位時の RSSI とラーニングフェーズで取得したフィンガープリントの値を照合して距離変換することにより三辺測量によって座標を計算している。しかし、電波の反射により RSSI にばらつきが生じ、RSSI の距離変換で誤差が生じるため位置測位に誤差が生まれる。本研究では、電波減衰を受けにくいビーコンの配置場所を RSSI によって探索し、測位誤差の削減を行う。提案として IoT デバイスが受信した RSSI を複数回取得し、取得した RSSI の総数の 3% 以下になる RSSI の度数をフィルタリングして削除する。また、分散が少ない方向にビーコンを置くことで距離変換誤差を小さくし、位置測位を行う。評価としてメジャーで測定した実際の受信デバイスとの位置誤差を比較する。本提案手法で算出した誤差は最小で 0.58m、平均誤差は 0.76m である。

## 1. はじめに

### 背景

位置推定は位置情報サービスにとって主要な技術である。ナビゲーション支援、患者の監視、ソーシャルワーキングを含む多くのサービスやアプリケーションがユーザーの位置情報を用いて開発されている [1][2]。BLE ビーコンは低コスト、低消費電力、小型という特徴があり、配置が容易であるため、屋内測位では BLE (Bluetooth Low Energy) が使用されている [3]。BLE の受信電界強度 (RSSI) を用いた測位では、ビーコンを最低 3 つ設置し、それぞれのビーコンからの RSSI を基に、最も近くにある 3 つの隣接ノードの受信電界強度を収集し、距離に変換して多点測位を行っている [4][5][6]。距離に変換する際に用いられるのがフィンガープリントである。フィンガープリントは、測定場所の点で RSSI を記録する。次に、その点で取得できる RSSI を 1 つ決定する。図 1 のようにあらかじめ決定された RSSI とユーザの位置の RSSI の値を比較し、位置を特定している。

無線信号フィンガープリントは、現在の屋内測位技術において焦点を当てられている [7]。しかし、フィンガープリ

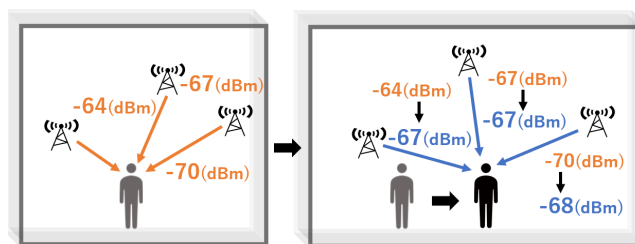


図 1 RSSI を比較する

ントを決定するための BLE 電波は消費電力が小さい反面、出力電力も小さいため Wi-Fi ネットワークに比べて電波が減衰しやすく、電波が届かない範囲が発生する。そのため、多数のビーコンを設置して電波が届く範囲を拡張する必要がある [8]。屋内測位において測位精度に最も影響を与えるのが、屋内環境の壁である [9]。ビーコンの電波が壁に反射し、電波の減衰が起こる。また、Wi-Fi を含む他のワイヤレスシステムによって引き起こされる電波干渉は、ビーコンの電波を弱め、電波が届く範囲を狭める要因である [10]。

### 課題

本研究で解決する課題は屋内測位誤差が 1.0m 以上発生することである [11]。屋内測位では、壁や天井が存在するためビーコン電波の反射が起こる。また、屋内に存在する遮蔽物により RSSI が減衰し、同じ距離であっても RSSI にばらつきが出る [12]。図 2 は基礎実験により縦 7.3m、横

<sup>1</sup> 東京工科大学コンピュータサイエンス学部  
〒 192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

<sup>2</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

14.6mの教室(以下:講実203教室)でビーコンから受信デバイスまでを距離1.0mにし、RSSIを500回取得したものである。

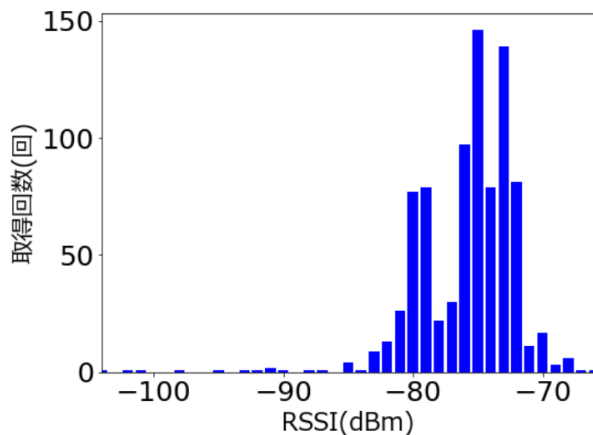


図2 RSSI値の山が複数出現する

グラフのx軸を左から順にみたときに、現在の値が一つ前の取得回数よりも多く、一つ次の取得回数よりも多い時を山と定義する。電波の反射によりRSSIに複数の山が表れるため、RSSIを一つの値を定めることが出来ない。一つの値に定める方法として、平均値、最頻値、中央値を求める方法があるが、これらの値が正しいとは限らないため比較し最も精度が高い方法を探索する必要がある。現在研究されている屋内測位では距離誤差が1.0mとなっている[11]。しかし、今回のユースケースである座席の特定では、実験環境の座席間隔が0.6mであったため、目標の距離誤差が0.6m未満と定めた。

## 各章の概要

第2章では、本研究の関連研究について紹介し、課題と解決手法、今後の課題について述べる。第3章では、本研究で行う提案と、ユースケースについて述べる。第4章では、提案手法を用いた実際の実験方法とソフトウェアの構成について述べる。第5章では本研究で取得したデータを分析し、評価を述べる。第6章では、本稿に記述した事象の議論を述べる。第7章では、本研究のまとめを述べる。

## 2. 関連研究

Jianyongらは、RSSIを用いたオフライン学習とオンラインでの測位を組み合わせた手法を提案している[13]。オフライン学習では、BLE参照ノードの位置が異なることによる測位精度の影響を低減するために、対数正規分布モデルに基づく区線形近似を用いて、BLE参照ノード毎にRSSIの伝搬モデルをそれぞれ学習させている。そして異なるサンプリング点における受信信号の前処理として、ガウスフィルタを設計している。オンライン測位の段階で

は、重み付きスライディングウィンドウを用いて、リアルタイム信号の電波の揺らぎを低減させている。また、三項関係定理に基づく距離重み付けフィルタを提案し、RSSIの異常による測位精度の影響を軽減し、測位精度を向上させている。さらに、通常の最小二乗法による目標座標の誤差を低減するために、テイラー展開の基づく協調的な位置特定アルゴリズムを提案している。Zhuらの研究では測位誤差が1.5m以下になる確率が80%以上となっている。しかし、教室内の座席特定のためには誤差が0.6m以下になる必要がある。

Pakanonらは、BLEビーコンを用いた屋内測位における三辺測量法の精度を実験回数により比較している[14]。三辺測量法を使用してRSSIを平均1回、平均5回、平均10回の3つの段階で測位し、屋内測位の精度を調べている。すべての位置の距離誤差と距離誤差の累積分布関数(CDF)が使用されている。屋内環境ではマルチパスフェージングが激しいため、ビーコンからのRSSIの距離は誤差があり、円は1点で交差しない。そのためデバイスの位置を推定するために最小二乗誤差法が適用されている。幅9.0m×長さ10.2mの部屋に合計163点の測定点を0.6m間隔で設けて実験をしている。部屋には3つのBLEビーコンを取り付けており、すべてのBLEビーコンは床から1.8mの高さに設置されている。Pakanonの研究で平均1回、平均5回、平均10回の測定から得られた距離誤差の平均はそれぞれ、39.06m、8.96m、7.97mだった。この結果から測定回数を増やすと距離誤差は小さくなる傾向が分かった。しかし、教室内に3つのビーコンだけでは、測位精度が保証されない。また、距離誤差が7.97mとなっており、講実203教室は横が7.3mしかないため本研究では適用できない。

DanshiらはRSSIフィンガープリンティングと機械学習を使用した屋内測位を行っている[15]。外れ値検出を使用してフィルタリングし、フィンガープリンティングと多項式回帰モデルの距離を結合して結果をクリーンアップする。フィルタリングされた結果は、最初の外れ値検出からのフィルタリングされた距離を利用する拡張カルマンフィルタ処理の結果は、外れ値検出を使用して再度フィルタ処理され、誤った測定値が削除される。この結果は、拡張カルマンフィルタリングを使用して再度処理され、実際の位置を取得するために無線マップと比較される推定位置に変換される。この方法は距離ベースの測定をしているため、フィルタによって誤差が大きくなり、精度が低下する。その後、研究者はフィンガープリンティングデータを画像データに処理し、この画像データを使用してCNNをトレーニングすることにより、CNNアーキテクチャを実装した。しかし、この方法はCNNに供給する膨大なデータセットが必要になる。

Zhouらは、RSSIとカルマンフィルタを用いて屋内測位を行っている[16]。最小平均二乗誤差を時間の最良の推定

値として使用し、信号とノイズの状態空間モデルを使用し、推定前の瞬間と現在の観測値を使用して状態変数の推定値を更新し、次の値を見積もる。カルマンフィルタ処理によりノイズの重ね合わせによって生じる偏差を弱めることが出来る。カルマンフィルタを用いた結果、最小二乗法を用いた手法よりも位置測位精度が高くなっている。

### 3. 提案

#### 提案方式

本研究では RSSI の分散が小さく、RSSI の強度が大きい方向を受信デバイスを固定し、ビーコンを受信デバイスを中心とした円状に移動させることによって探索し、位置測位誤差を削減する。図 3 に示すように各ビーコンの RSSI をレーダーチャートで可視化し、最も RSSI が強い方向にビーコンを置くことを提案とする。各ビーコンには個体差があり、ビーコンごとに異なる RSSI のレーダーチャートが作成できる。この特性を利用して各ビーコンの RSSI を取得し、各ビーコン毎に RSSI の強度が大きい方向を探索する。本研究は基礎実験、トレーニングフェーズ、測位フェーズの 3 つのフェーズに分けて行う。本研究の流れについて以下で説明する。

- 1 基礎実験として受信デバイスの円周を 12 等分し、各箇所です 15 分間ずつ取得した RSSI のレーダーチャートの作成と山の数と分散を取得する。
- 2 トレーニングフェーズとして、フィンガープリントとなる RSSI の基準値の決定とフィルタリングを行う。
- 3 測位フェーズとしてフィンガープリント情報と取得した RSSI を比較して距離測定を行い、ビーコンの座標を三辺測量と重心を用いた座標計算を行う。

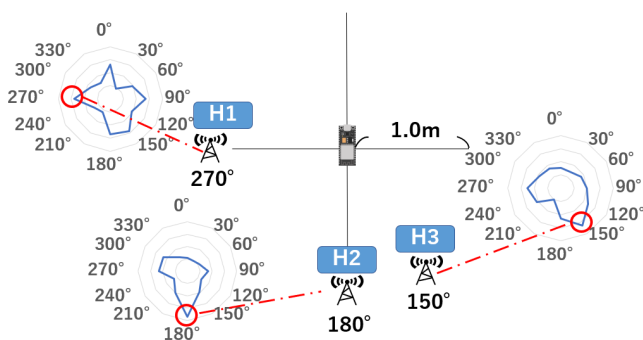


図 3 提案方式

ビーコンの配置を RSSI が最も強い方向から選択するとき、同じ方向に 2 つ以上のビーコンが重なる可能性がある。重なることを防ぐために、3 つのビーコンの最も強い方向の RSSI と 2 番目に強い方向の RSSI を比較し、2 つの RSSI の差が少ないビーコンは 2 番目の方向を選択する。

#### 基礎実験

ビーコンからの各方向における RSSI の山の数が最も少ない点を求める。RSSI の山の数が少ない場合、分散が小さくなり誤差が少なくなるためである。

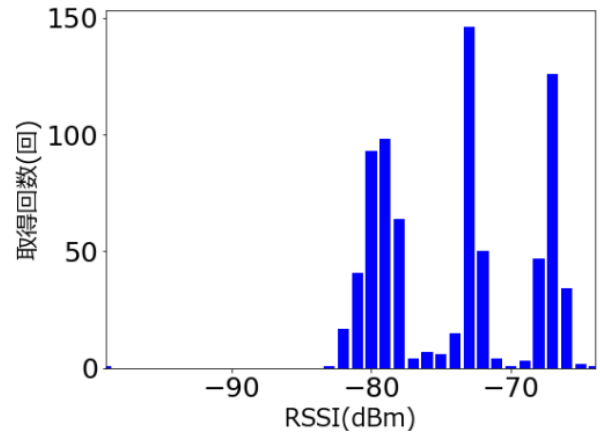


図 4 ビーコン H1 の 210° 方向における RSSI の分布

図 5 は講実 203 教室でビーコンと受信デバイスの距離を 1.0m にし、360° を 12 等分した 30° 間隔の場所にビーコンを設置し、RSSI を取得する。受信デバイス 1 つに対してビーコンは 3 つ使い、15 分間 RSSI を取得する。15 分経過したら各ビーコンを 30° 右に回転させる。ビーコンをそれぞれビーコン H1、ビーコン H2、ビーコン H3 として使用する。各方向毎に RSSI を棒グラフにまとめ、それぞれの方向における山の数を特定する。山の数を特定する方法として、高木の方法を引用する [6]。講実 203 教室で中央に受信デバイスを置いて実験を行った。

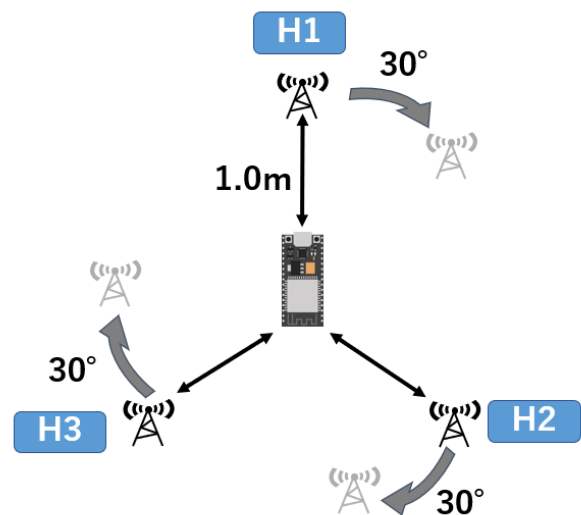


図 5 基礎実験の最初の配置

図 4 はビーコン H1 の 210° 方向における RSSI の棒グラフである。

このグラフでは山の数は5個になり、分散は28.25になった。一方、ビーコン H1 の山の数が最も少なくなったのは270° 方向で、山の数は2個になり、分散は2.29になった。山の数が最小の時、分散が最も小さくなった。基礎実験の結果、ビーコン H1 の山の数は最大で13、最小で2、ビーコン H2 の山の数は最大で9、最小で5、ビーコン H3 は最大で8、最小で2になった。次に、各方向で取得した RSSI をレーダーチャートで表し、方向ごとの RSSI の強さを可視化する。

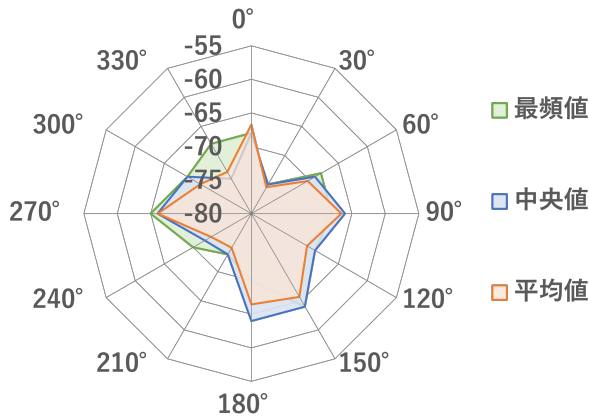


図 6 ビーコンの方向によって異なる RSSI が出現する

図 6 はビーコン H1 から受信デバイスまでを距離 1.0m にし、受信デバイスを中心にビーコンを 30° 間隔ずつ 360° 分取得したものである。図 6 の結果からビーコン H1 で最も RSSI が強い方向は平均値の場合、270° 方向で-66(dBm)、中央値の場合、270° 方向で-66(dBm)、最頻値の場合、270° 方向で-65(dBm) だった。実験結果より最頻値を選択したときが最も RSSI が強くなることが分かった。ビーコン H2 は 180° 方向の RSSI が最も強く、ビーコン H3 は 150° 方向の RSSI が最も強くなった。

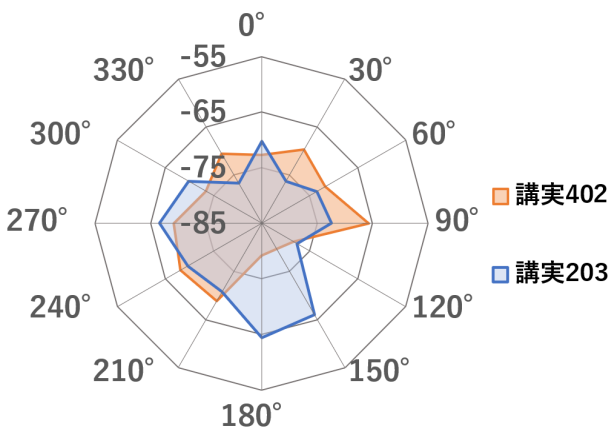


図 7 異なる教室での RSSI のレーダーチャート

次に図 7 は縦 13.3m、横 14.3m の講実 402 教室と講実 203 教室でビーコン H1 から取得した RSSI のレーダーチャー

トである。講実 402 教室において RSSI が最も強い方向は 90° 方向である。90° 方向における分散は 4.60 である。一方、講実 203 教室において RSSI が最も強い方向は 270° 方向である。270° 方向における分散は 2.29 だった。

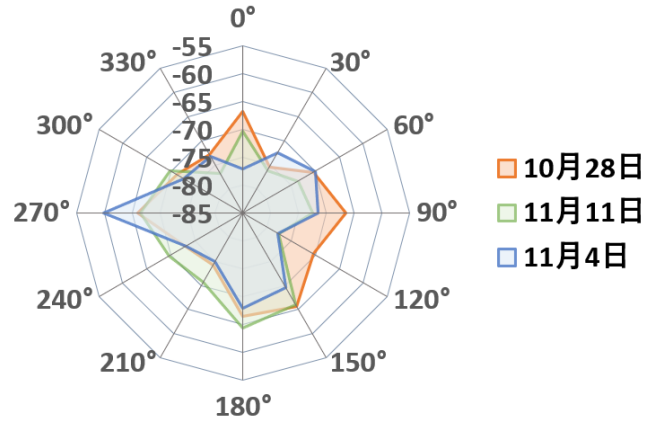


図 8 日にちごとのレーダーチャート

次に図 8 は 10 月 28 日、11 月 04 日、11 月 11 日それぞれの日における H1 ビーコンの各方向における平均値をレーダーチャートで表したものである。図 8 より、計 3 回の実験の RSSI の平均値で最も強かった方向は 270° で-66(dBm) だった。計 3 回の実験の RSSI の平均値の分散が最も小さいのは 300° 方向で 1.29 だった。

次に図 9 は講実 402 教室における受信デバイスとビーコンの距離を 1.0m と 2.0m でそれぞれ RSSI を取得し、レーダーチャートで比較したものである。図 9 より、1.0m の場合、RSSI が最も強かったのは 270° 方向で-69(dBm) であるが、2.0m の場合、RSSI が最も強かったのは 150° 方向で-70(dBm) だった。1.0m と 2.0m で最も RSSI の差が小さかったのは、180° 方向で 3(dBm) の差があった。

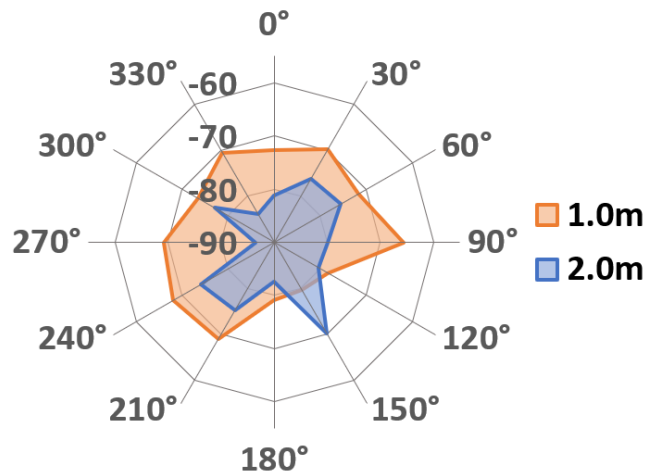


図 9 ビーコンと受信デバイスの距離による RSSI

各ビーコンの RSSI が最も強い方向の山の数と分散はそれぞれ、ビーコン H1 の山の数が 2 つで分散が 2.29、ビー



コン H2 の山の数 が 6 つで分散が 23.79, ビーコン H3 の山の数 が 6 つで分散が 21.25 である. ビーコン H1 以外は山の数 が 2 よりも大きく, 平均値を取った際に RSSI の誤差が大きくなる. この問題を解決するために外れ値となる RSSI のフィルタリングを行う.

RSSI のフィルタリングを行う方法を以下に示す.

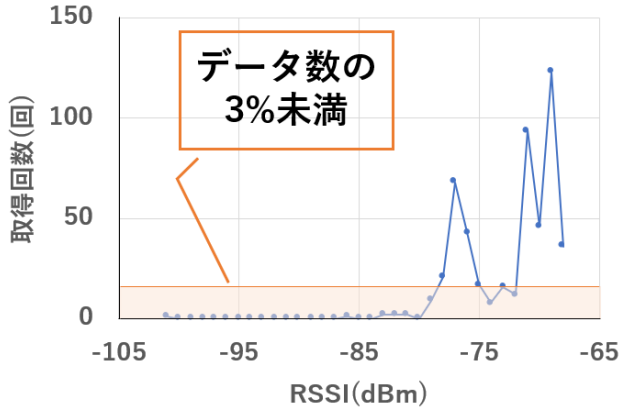


図 10 RSSI のフィルタリング

図 10 は RSSI のフィルタリングを行う方法である. 受信デバイスが取得した RSSI の総数の 3% 以下になった RSSI を削除して山の高さをカウントする. 取得した RSSI の総数の 3% 以下をフィルタリングして削除することですべての方向において山の高さを 3 以下にすることが出来る.

### トレーニングフェーズ

トレーニングフェーズでは, RSSI から距離への変換と RSSI の基準値を決定する.

まず, RSSI の距離変換として距離による RSSI の減衰を用いる. 図 11 は H1 の 270° 方向における 0.5m ずつ受信デバイスとビーコンの距離を延長した RSSI 伝搬モデルである. この実験の結果, RSSI は距離によって減衰することが分かる. また, 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. この結果より, 対数近似を求め, 対数近似の値を RSSI から距離への変換で使用. 各ビーコン毎に RSSI の伝搬モデルを作成し, 各ビーコンで独自の距離変換を行う.

実験の結果, 以下の通りとなった.

ビーコン H1 は  $y = -17.41 \ln(x) - 46.66$

ビーコン H2 は  $y = -19.96 \ln(x) - 44.34$

ビーコン H3 は  $y = -23.39 \ln(x) - 44.60$

次に各ビーコンと受信デバイスの距離が 1.0m のときの RSSI を使用し, 基準値を決定する. RSSI のフィルタリングにより分散を小さくすることができたため, 平均値を RSSI の基準値とする.

RSSI の基準値を決める方法を図 12 に示す. 図 12 はビーコン H1 の 270° 方向におけるフィルタリング後の度数分

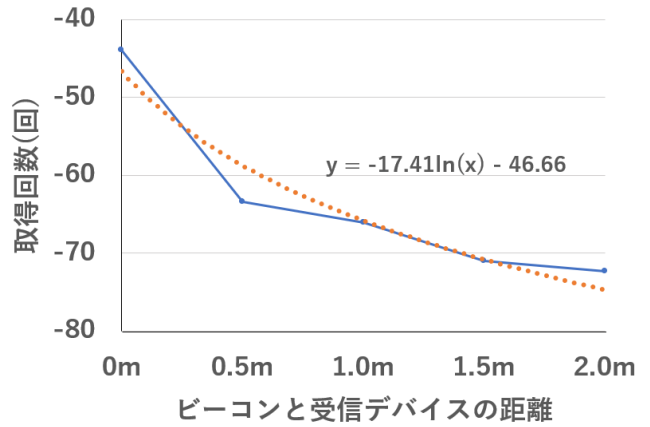


図 11 ビーコン H1 の RSSI の伝搬モデル

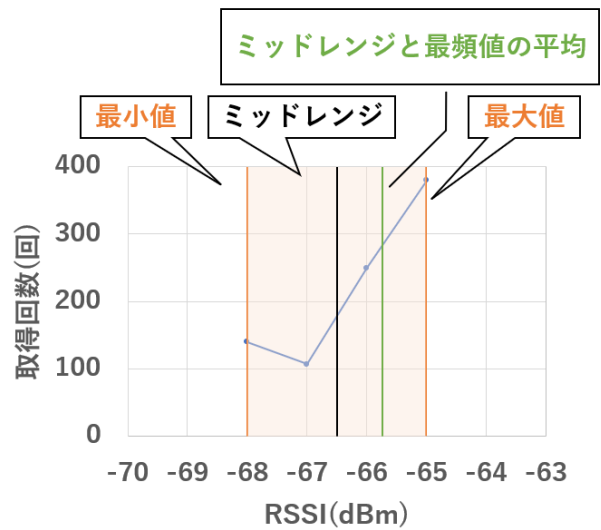


図 12 基準値の決定方法

布である. RSSI の最大値と最小値の平均値であるミッドレンジと, 度数分布の最頻値の平均を基準値とする.

### 測位フェーズ

本研究では三辺測量を用いて座標を計算する.

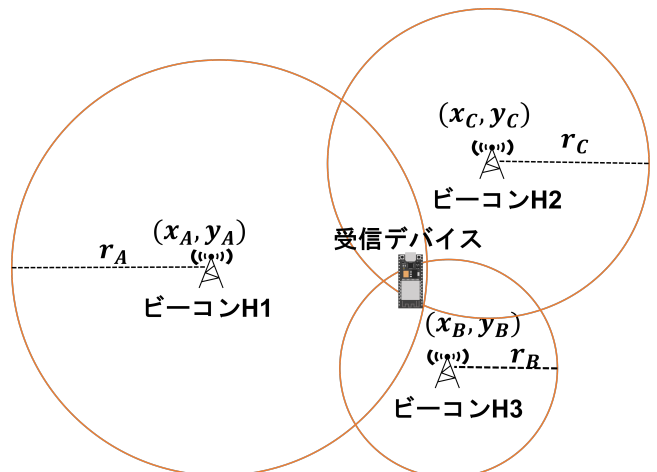


図 13 測位フェーズ: 三辺測量

三辺測量の方法として廣居の方法を用いる [17]. 図 13 のように, 3 つのビーコンの中心座標を  $(x_A, y_A), (x_B, y_B), (x_C, y_C)$ , 受信デバイスとビーコンの距離を半径  $(r_A, r_B, r_C)$  として 3 つの円を描き, 3 つの円の交点座標を受信デバイスの位置として計算する.

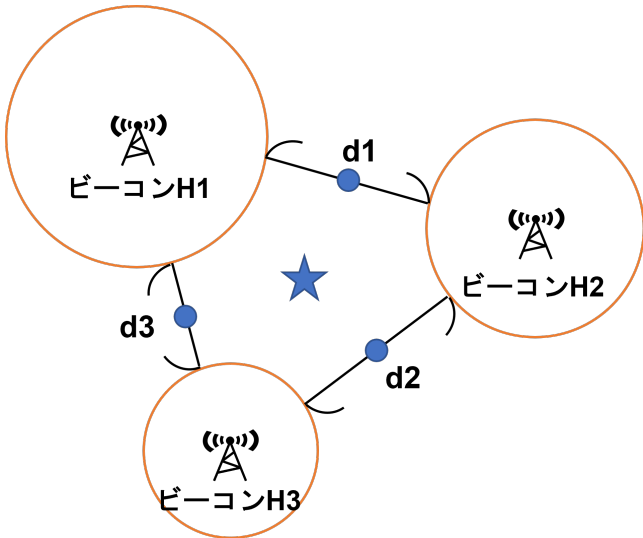


図 14 測位フェーズ：重心を用いた座標計算

しかし, 三辺測量は 3 つの円が交点していなければ計算できない. そこで, 3 つの円が 1 つでも交差していないときは重心を使って座標を計算する. 図 14 に重心を用いた手法を示す. 各ビーコンが受信デバイスまでの距離を算出した際に円が交わらないとき, 各ビーコンの円と円の最短距離をそれぞれ  $d_1, d_2, d_3$  とする.  $d_1, d_2, d_3$  の中点を青い点とし, 青い 3 つの点の重心である星マークのところを受信デバイスの座標として計算する.

#### ユースケース・シナリオ

本研究では, 図 15 のように教室内の座席特定をユースケースとする. 本研究により測位誤差が 0.6m 以下となることで, ビーコンを用いた位置測位による出席登録が可能になる.

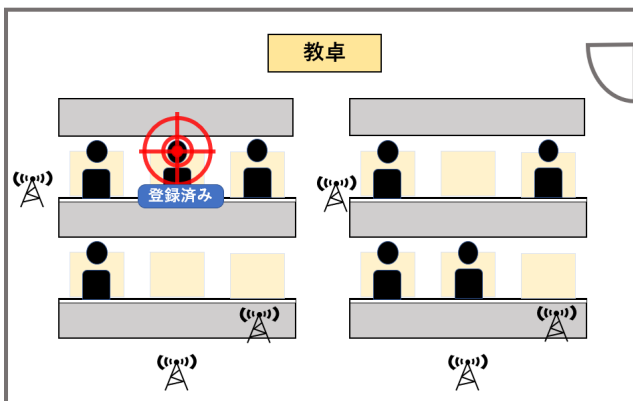


図 15 講義における出席登録

IoT デバイスを持ったユーザが席に着くと, 本研究で提案した屋内測位により座席を特定して, 図 15 のように出席しているかどうかを判断する事が出来る. IoT デバイスは周囲のビーコンから送信される電波を受信し, RSSI を Web サーバに送信する. Web サーバ側で RSSI 基に座標を計算し, ユーザがどの席に座っているのかを特定する.

## 4. 実装と実験環境

### 実装

本研究の実装は, BLE の受信デバイスである ESP32 を 1 台, 送信機である ESP32 を 3 台, 座標計算を行う Web サーバの 3 つで構成される. ソフトウェア構成図を図 16 に示す.

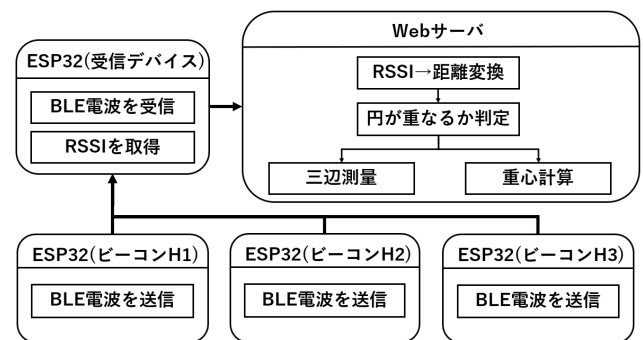


図 16 ソフトウェア構成図

実装は MicroPython と Python で行った. 受信デバイスは 1 台であり, 受信デバイスの位置を固定し, ビーコンの位置を変化させ測定を行った. Web サーバでは, RSSI から距離への変換, 三辺測量または重心計算を行った.

### 実験環境

本研究で使用した環境は東京工科大学八王子キャンパスの講義実験棟 402 教室 (以下: 講実 402 教室) と同キャンパスの講義実験棟 203 教室 (以下: 講実 203 教室) である. 講実 402 教室は縦 13.3m, 横 14.3m である. 講実 203 教室は縦 7.3m, 横 14.6m である. 図 17 は講実 203 教室で実験をするときの配置図である. 中央の受信デバイスに対して  $360^\circ$  方向にビーコンを設置し, 測位を行っている.

## 5. 実験と分析

評価として, 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.

- 提案方式を用いた三辺測量
- 高木の研究手法を用いた多点測位 [6]
- rssi フィルタリング無しの測位

提案手法の誤差の計算方法は受信デバイスの座標  $(x_1, y_1)$ , 実測値の座標  $(x_2, y_2)$ ,  $r =$  誤差とおくと (1) の式で算出できる.

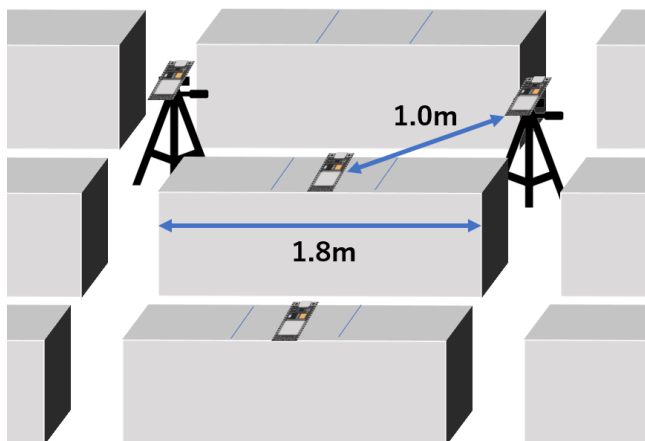


図 17 講実 203 教室での実験環境

$$r = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

既存手法ではユークリッド距離を用いて距離誤差を算出し、直線的な誤差で評価を行う。実験結果を図 18 に示す。一方、メジャーで測定した受信デバイスの座標 (m) は (7.35, 4.35) である。この時、各ビーコンの座標はビーコン H1 が (6.35, 4.35)、ビーコン H2 が (7.35, 5.35)、ビーコン H3 が (7.85, 5.21) である。

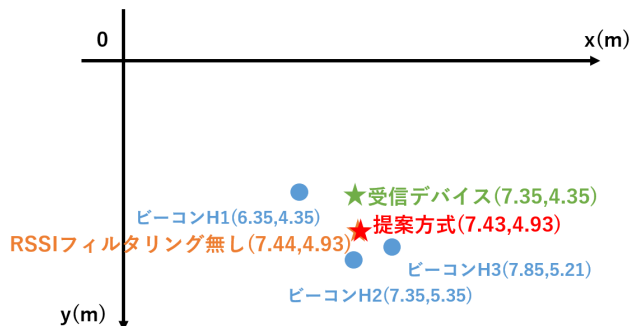


図 18 上から見た座標計算の結果

図 18 の結果から、提案手法が最も精度が高いことが分かる。受信デバイスと提案手法の最小の距離誤差は 0.58m である。また、7 回の実験における平均誤差は 0.76m である。受信デバイスとビーコンの距離が 1.0m であるのに対して、提案手法の距離変換を用いた場合、ビーコンからの推定距離で描かれた円が 3 点で交わることがなく、重心を用いた座標を計算を行っている。一方で、RSSI フィルタリング無しの最小の距離誤差は 0.59m である。RSSI フィルタリング無しの測位においてもビーコンからの推定距離で描かれた円が 3 点で交わることがなく、重心を用いた座標計算を行った。提案手法では、RSSI が強い方向にビーコンを設置することで距離誤差を削減することを提案したが、ビーコン同士の距離が 1.0m 以下になってしまったため既存研究の結果より、距離誤差が増えたと考えられる [3]。

図 19 はビーコンと受信デバイスの距離を 1.5m にして座

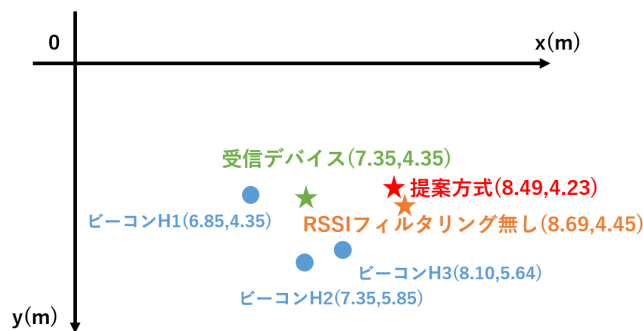


図 19 ビーコンと受信デバイスの距離を 1.5m 離した結果

標計算した結果である。受信デバイスと提案手法の最小の距離誤差は 1.15m である。ビーコンからの推定距離で描かれた円が 3 点で交わったため、ビーコンの交点座標を計算して座標計算を行っている。ビーコン H1 と受信デバイスの推定距離は 2.48m、ビーコン H2 と受信デバイスの推定距離は 2.12m となり、実際の距離よりも 0.6m 以上大きい円が推定されている。そのため、距離誤差が 1.0m を超えた。一方で、RSSI フィルタリング無しの最小の距離誤差は 1.34m である。RSSI のフィルタリングを行わない場合、提案手法よりも分散が大きくなってしまい平均値の誤差が大きくなったと考えられる。

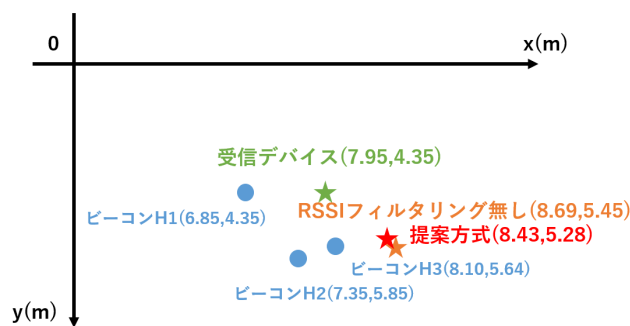


図 20 ビーコンと受信デバイスの距離を 2.0m 離した結果

図 20 はビーコンと受信デバイスの距離を 2.0m にして座標計算した結果である。受信デバイスと提案手法の最小距離誤差は 1.04m である。ビーコンからの推定距離で描かれた円が 3 点で交わらなかったため、重心計算により座標計算を行っている。ビーコン H1 と受信デバイスの推定距離は 1.6m、ビーコン H2 と受信デバイスの推定距離は 1.61m、ビーコン H3 と受信デバイスの推定距離は 0.68m となった。ビーコン H1 とビーコン H2 の推定距離は実際の距離と比較して 0.11m 以下で推定できているが、ビーコン H3 のみ実際の距離と比較して 0.82m の誤差が生じている。

## 6. 議論

本研究では RSSI が強い方向に受信デバイスを置いて座標を計算する手法を提案した。三辺測量において最も誤差

に影響を与えるのが RSSI から距離への変換である。この変換を正確に行わない場合、ビーコンと受信デバイスの距離が延びるほど誤差が増える。その理由として、RSSI は値が低くなるにつれて 1(dBm) あたりの距離の変化量が増えるためである。そのため、本研究では RSSI が最も強い方向を基礎実験の結果から求め、位置測位誤差の削減を図った。基礎実験の結果では、RSSI が最も強くなる方向が 1 回の実験ごとに 1 個出現したが、実験毎に強くなる方向が変化することが分かった。そのため、各方向の RSSI を平均化し、分散が小さく、RSSI が強い方位を選択する必要がある。

ビーコンと受信デバイスの距離が離れるほど、RSSI の 1(dBm) あたりの距離の変化量が増えることは、距離誤差を大きくする。ビーコンと受信デバイスの距離を延長しながら RSSI を取得したとき、距離が伸びたにも関わらず RSSI が強くなることがあった。これは、ビーコンと壁の間の距離が近くなると電波の反射により強い RSSI が反射すると考えられる。そのため、ビーコンと壁の間の距離を伸ばしながら、ビーコンと受信デバイスの距離を伸ばして RSSI が距離に沿って減衰する位置を探索し、壁とビーコンの適切な距離を探索する必要がある。

本研究で提案した手法を教室で使用するとき、受信デバイス 1 つに対して 3 つのビーコンを配置して測位を行っている。実際に使用する際には受信デバイスは座席数に比例して増えるため、ビーコンと受信デバイスの距離を延長したときに測位誤差が増加しないように、RSSI から距離変換の精度を向上させる必要がある。

本研究では RSSI が強い方向を選択して距離変換の対数近似を作成した。しかし、ビーコン H1 において最も RSSI が強い 270° 方向の計 3 回の実験の分散が 9.01 となり、最も分散が小さい 300° 方向の分散である 1.29 よりは分散が大きくなった。RSSI の変換で用いられる対数近似式は、あらかじめ取得した RSSI を使用して作成されるためより再現性のある方位で RSSI を取得する必要がある。

BLE 電波の RSSI は人が障害物となり減衰する特性がある。実際に教室で屋内測位をするとき、教室には人が居るため、フィンガープリントの段階よりも RSSI が小さくなることが考えられる。RSSI が小さくなると 1(dBm) あたりの誤差が増え、測位誤差が増加する。そのため、フィンガープリントの値と人が居る環境で取得した RSSI を比較し、値の差分を引くことで、フィンガープリントの値に近づける必要がある。また、RSSI は人が障害物となり減衰するが、人が居るかどうかを判別することが出来ない。人が居ることが判別出来れば、人による RSSI の減衰を検知して、RSSI を補正することが可能である。人を検知する方法として、ToF センサを用いた人数計測がある [18]。ToF は、Time of Flight の略で、光の飛行時間を用いる方式である。ToF 方式の反射型レーザーセンサは、パルス投

光したレーザー光が対象物表面で反射して返ってくるまでの時間を基に距離を測定できる。教室の入り口に ToF センサを取り付け、人数計測を行い、人が居ることを認識できる。人が一人増えたあたりの RSSI の変化量を実験から求めることによって、人数計測で取得した人数に応じた RSSI の変化量を、誰も人がいないときに取得した RSSI と参照することで RSSI を補正できると考えられる。この手法によりビーコン 3 つ当たりの測位範囲を広げることが出来ると考えられる。

## 7. おわりに

本稿では、電波の反射により RSSI にばらつきが生じ、RSSI から距離への変換で誤差が生じるため位置測位に誤差が生まれる課題に焦点を当てた。本研究では、電波減衰を受けにくいビーコンの配置場所を RSSI によって探索し、測位精度誤差の削減を行った。提案として IoT デバイスが受信した RSSI を複数回取得し、取得した RSSI の総数の 3% 以下になる RSSI の度数をフィルタリングして削除する。そして、取得した RSSI の分散が少ない方向にビーコンを置くことで距離変換誤差を小さくし、位置測位を行った。本研究によって距離誤差を最小で 0.58m にすることが出来た。以上のことから本研究は BLE を用いた屋内測位の位置測位誤差の削減に貢献可能である。

**謝辞** 本研究の遂行にあたり、終始多大なご指導を賜った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の高木優希さんに深謝致します。

## 参考文献

- [1] Pu, Y.-C. and You, P.-C.: Indoor positioning system based on BLE location fingerprinting with classification approach, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 62, pp. 654–663 (2018).
- [2] Memon, S., Memon, M. M., Shaikh, F. K. and Laghari, S.: Smart indoor positioning using BLE technology, *2017 4th IEEE International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)*, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1109/ICETAS.2017.8277872 (2017).
- [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 (online), DOI: 10.1109/MSP.2018.2846804 (2018).
- [4] Rida, M. E., Liu, F., Jadi, Y., Algawhari, A. A. A. and Askourih, A.: Indoor Location Position Based on Bluetooth Signal Strength, *2015 2nd International Conference on Information Science and Control Engineering*, pp. 769–773 (online), DOI: 10.1109/ICISCE.2015.177 (2015).
- [5] Torii, H., Ibi, S. and Sampei, S.: Indoor Positioning and Tracking by Multi-Point Observations of BLE Beacon Signal, *2018 15th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC)*, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1109/WPNC.2018.8555808 (2018).
- [6] 高木優希, 串田高幸: 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, 技術報告, クラウド・分散システム研究室, CDSL-TR-097 (2022).

- [7] Ji, T., Li, W., Zhu, X. and Liu, M.: Survey on indoor fingerprint localization for BLE, *2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, Vol. 6, pp. 129–134 (online), DOI: 10.1109/ITOEC53115.2022.9734528 (2022).
- [8] 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 (online), DOI: 10.1109/ICACT.2015.7224764 (2015).
- [9] Delnevo, G., Mambelli, G., Rubano, V., Prandi, C. and Mirri, S.: Almathere 2.0: a pervasive system to facilitate indoor wayfinding, *2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, pp. 1–4 (online), DOI: 10.1109/CCNC46108.2020.9045209 (2020).
- [10] 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 (online), DOI: 10.1109/UBMK.2017.8093459 (2017).
- [11] 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, IEEE, pp. 784–789 (2012).
- [12] Nakai, W., Kawahama, Y. and Katsuma, R.: Reducing Error of Positioning Based on Unstable RSSI of Short Range Communication, *2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, pp. 572–578 (online), DOI: 10.1109/AINA.2018.00089 (2018).
- [13] 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 (2014).
- [14] Pakanon, N., Chamchoy, M. and Supanakoon, P.: Study on Accuracy of Trilateration Method for Indoor Positioning with BLE Beacons, *2020 6th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, pp. 1–4 (online), DOI: 10.1109/ICEAST50382.2020.9165464 (2020).
- [15] Sun, D., Wei, E., Yang, L. and Xu, S.: Improving Fingerprint Indoor Localization Using Convolutional Neural Networks, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 193396–193411 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3033312 (2020).
- [16] Zhou, C., Yuan, J., Liu, H. and Qiu, J.: Bluetooth indoor positioning based on RSSI and Kalman filter, *Wireless Personal Communications*, Vol. 96, No. 3, pp. 4115–4130 (2017).
- [17] 廣居舜佑, 高木優希, 串田高幸: RSSI の度数分布に基づく階級数を用いたビーコンの位置決定による屋内測位誤差の削減, 技術報告, クラウド・分散システム研究室, CDSL-TR-104 (2022).
- [18] 山本拓海, 杉本一彦, 串田高幸ほか: ToF センサで取得する距離データと検知時間の差に基づく入退室の識別による室内人数の算出, 研究報告マルチメディア通信と分散処理 (DPS), Vol. 2022, No. 12, pp. 1–8 (2022).