

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: 屋内測位は家具や人、水蒸気による影響によって位置決定の誤差が大きくなる。また、多点測位に使用する BLE ビーコンの個数と精度は場所によって変化する。本研究では、まず9つの BLE ビーコンを使用し、個体差を数値化し RSSI 値から距離へ変換可能な近似曲線を作成する。近似曲線によって RSSI 値から距離へ変換後、各 BLE ビーコン重みを計算する。各ビーコンの重みは基準とする RSSI 値の出現確率と受信機までの距離をもとに計算し、重みの降順で多点測位に使用する BLE ビーコンを選択する。実験として、人は居らず机や椅子が配置されている空間で測定を行い、多点測位に使用する個数を変化させ、精度を比較した。2次元平面で計算を行う既存方式との比較を行った。実験の結果、最も誤差が小さい時、実際の位置との誤差は 15.4cm と、既存方式より 100cm 以上の精度改善ができた。

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(以降「ビーコン」と記す)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、机や椅子といった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障害物

による減衰の影響を受けやすく、誤差が生じる。BLE の受信機である IoT デバイスと送信機であるビーコンの間に人や水、水蒸気があった場合、BLE に用いられている 2.4GHz 帯の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、信号強度の値 (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。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) 前後発生する [6][7]。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 [8]。また、多点測位における精度の高い個数は環境によって変化する。個数が多すぎる場合、電波干渉と輻輳によって検出ロスが増加する [3]。

各章の概要

2 章では、本研究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、本研究における提案について、ラーニングフェーズおよび提案方式の具体的な説明と、それを用いたユースケース・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

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

ついて説明する。5章では、本研究の実験結果をもとに評価とデータを分析し、考察を述べる。6章では、提案、実験、実験環境、評価、分析に関する議論を述べる。最後に7章では、本研究のまとめを述べる。

2. 関連研究

本研究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のかについて述べる。

Zixiang らは、BLE の RSSI ランキングに基づいたフィンガープリント手法を提案した [6]。この手法では、KTCC(Kendall Tau Correlation Coefficient) を用いて電波の位置と店舗内に設置された複数の iBeacon デバイスの電波強度ランキングとを対応づけている。実験は、特定の屋内環境下で行われたが、平均測位誤差を 0.87 メートルに抑えられることができています。しかしながら、他の環境下でも実験を行う必要がある。また、マッピングをより早く構築し、移動するユーザをより精度良く追跡する方法を構築する必要があります。

Zhu らは、RSSI を用いたオフラインによる学習とオンラインでの測位を組み合わせた手法である [9]。オフライン学習では、対数正規分布モデルに基づく区分線形近似を用いて、ビーコンの位置が異なることで生じる測位精度への影響を軽減するために、RSSI の伝搬モデルを学習する。受信した電波を前処理するために、ガウスフィルタを設計している。また、オンライン測位では、重みつきスライディングウィンドウを用いて、リアルタイムの電波の変動を低減している。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、テイラー級数展開に基づく定位アルゴリズムを提案している。これらによって、150(cm) 未満の誤差で測位できる確率が 80%以上であった。しかしながら、屋内測位には PDR に代表される手法が存在し、100(cm) 以内での精度が必要となる [10]。

Andrew らは、RSSI 技術を用いた近接推定を改善するため、3つのベイジアンフィルタリング技術を実装した [11]。狭い部屋と広い部屋の2つの環境を用いてテストしている。結果として、粒子フィルタリングとノンパラメトリックフィルタリングの使用によって、近接推定が最大 40%改善された。ビーコンが受信機から 300(cm) 以内にある場合の近接誤差範囲は 27(cm) となった。しかしながら、ラーニングフェーズが存在しないため、環境によって誤差範囲が大きく変化する。

Thai-Mai らは、iBeacon とスマートフォンのセンサーを用いた屋内測位システムを提案した [12]。手法は、RSSI から距離を推定後、メディアンフィルターと三角測量法によって初期位置を推定する。その後、フィンガープリント手法を用いて位置決定を行う。結果として、90%以上の確率で 180(cm) の誤差に抑えている。しかしながら、ラーニングフェーズによる環境ごとの適応がなく、精度も 100(cm) 以

上であり、改善する必要がある。

3. 提案

本研究の目的は、BLE を用いた多点測位を用いて、どの環境にも適応させると同時に既存方式よりも精度を向上させることである。ここで、本章における処理の流れを以下に示す。

- (1) 各ビーコンで測定した RSSI 値から近似曲線を作成
- (2) (1) を使用し、各ビーコンの基準値を計算
- (3) (2) の出現確率から各ビーコンの信頼度を計算
- (4) 各ビーコンと受信機の距離から重み(距離)を計算
- (5) (3) と (4) から各ビーコンの最終的な重みを計算
- (6) 重みの降順にビーコンを選択
- (7) 選択したビーコンを用いて多点測位から座標を計算
- (8) nC_3 通り繰り返し、最終的な座標を計算

本研究は、ラーニングフェーズによって各ビーコンのキャリブレーションを行い、その上で多点測位を行うことで誤差を削減する。これらの具体的な説明を行うとともにユースケース・シナリオについて触れる。なお、本研究では壁にビーコンがあらかじめ等間隔で設置され、座標は全てわかっているものとする。

上記の (1)~(8) は上から順に処理が行われ、(1)~(3) をラーニングフェーズ、(4)~(8) を提案方式で行う。(1)~(6) によって各ビーコンの重みをつけることによって、多点測位時に使用するビーコンを選択可能にする。(7) では、 n 個のビーコンを全探索し、3つずつ選択を行なっていく。3つのビーコンの座標を中心とする球体の交線の共有点を求めることで、座標を計算する。(8) では n 個のビーコンから3つずつ選ぶ組み合わせで座標を全て計算する。最後に、 x, y, z 座標の平均値を計算し、推定した座標とする。

ラーニングフェーズ

ラーニングフェーズでは、(1)~(3) の処理を行う。各ビーコンの個体差を数値化することで、多点測位で選択する際の指標になるビーコンの信頼度を計算する。また、RSSI 値 (dBm) から距離 (cm) へ変換するための近似曲線の作成を行う。

まず、RSSI 値から距離へ変換する際の誤差を削減するため、本研究では各ビーコンに対してメジャーを用いて計測を行い、近似曲線を用いて RSSI 値から距離へ変換を行っている。本研究での正解の値はメジャーで計測した値とする。図 1 に近似曲線の例を示す。

図 1 は縦軸が RSSI 値、横軸が距離のグラフである。青い点は取得したデータ群を示している。データ収集方法は、各ビーコンを 50cm ずつ移動させ、50cm~200cm の 4 パターンで取得を行なった。位置を固定後、10 分間 RSSI 値の取得を行い、各位置で 400 件程度を収集した。RSSI 値は送信機と受信機の距離が離れるほど減衰することから、

これらの値を元に対数近似を行なった。各ビーコンは、個体差の影響を減少させるため、それぞれ別の近似式を作成し、RSSI 値から距離への変換を行う。

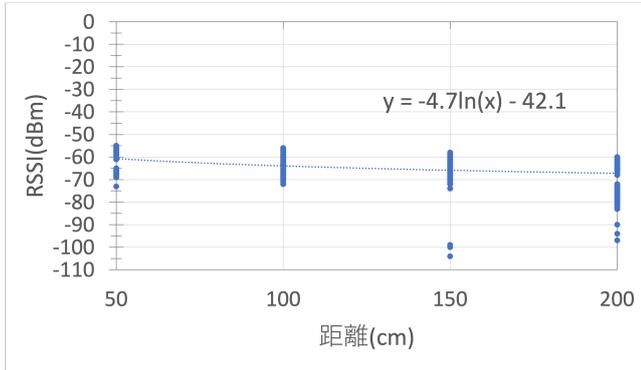


図 1 近似曲線の作成

次に、各ビーコンの信頼度の計算を行う。基準とする値の出現確率を元に個体差を数値化するためである。ここで、信頼度の計算を行うため、各ビーコンの基準値設置されている各ビーコンごとに基準値を作成する。概要を図 2 に示す。

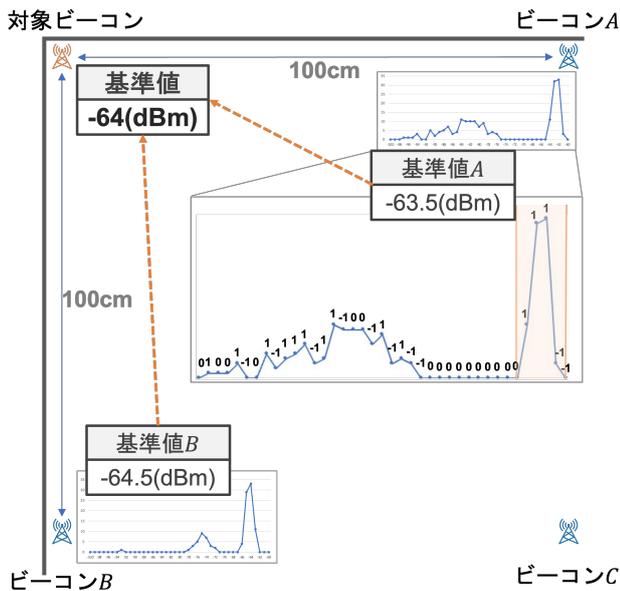


図 2 基準値の計算過程

図 2 では、100cm ごとにビーコンが配置されているとし、対象ビーコンから見て 100cm 離れているビーコン A とビーコン B をもとに基準値の計算を行う。ビーコン C は距離が 100cm ではないため、除外する。対象とするビーコンから BLE の信号をビーコン A とビーコン B に送信し、ビーコン A とビーコン B でそれぞれ指標となる基準値 A と基準値 B を決定する。この決定方法を図 3 に示す。

図 3 では、前回の研究と同様の手法を用いている [8]。対象ビーコンから送信した信号をビーコン A、ビーコン B で

それぞれ 100 回受信する。これによって、図 3 のような分布が作成される。縦軸は取得回数、横軸は RSSI 値である。この時、RSSI 値の大きい値から順に走査し、1 つ前の値と比較して数字を付与する。

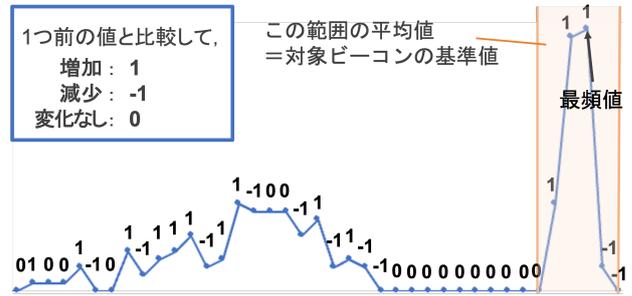


図 3 対象ビーコンの基準値を計算

増加は 1, 減少は-1, 変化なしは 0 である。これによって増加の立ち上がりを元に山を複数検出する。図 3 では、最頻値を含む山の平均値を対象とするビーコンの基準値としている。電波は干渉によって変化し続けるため、100 回の取得から基準値 A、基準値 B を作成している。また、山は複数存在するため、山ごとに平均値を計算し、最終的な精度が悪い場合、順に比較および再計算を行う。そして、図 2 の様に基準値 A、基準値 B の平均値を計算し、対象ビーコンの基準値としている。

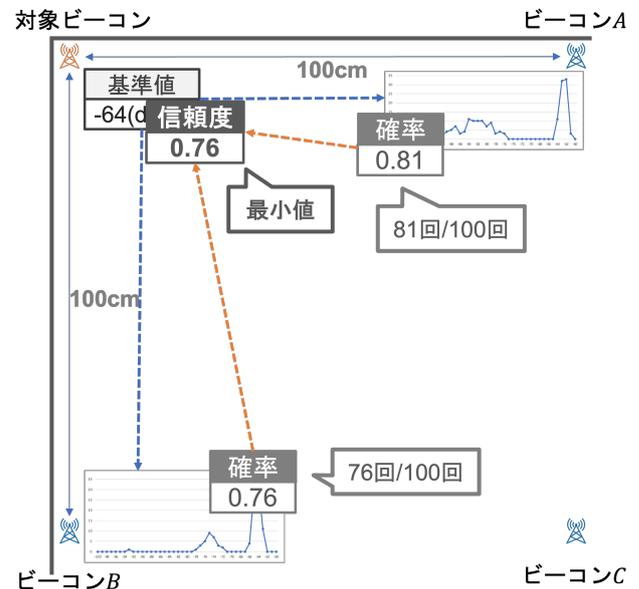


図 4 信頼度の計算過程

その次に、信頼度の計算を行う。これは、対象ビーコンが少なくとも基準値をどの程度の割合で取得できるかを表した数値である。計算の流れを図 4 に示す。各ビーコンで取得した 100 回の内、基準値を何回取得したか確率として計算している。そのうち、最小の確率を対象ビーコンの信

信頼度として設定している。図4では、ビーコンBの確率が最も小さいため、0.76が信頼度となる。この信頼度を各ビーコン全てに設定を行う。イメージ図を図5に示す。

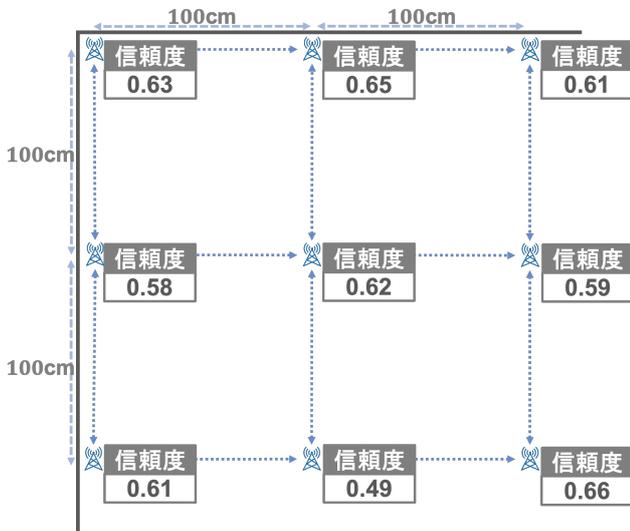


図5 各ビーコンの信頼度の計算

図5では、9個のビーコンが設置されているとして、計算を行なっている。以上の一連の流れをラーニングフェーズとしている。ビーコン設置後、これを毎回行うことで、環境に適応させ、正確な精度を実現できる。

提案方式

提案方式は、(4)~(8)の処理を行う。ラーニングフェーズで計算した信頼度と実際の距離を元にビーコンを選択し、多点測位を行う。提案方式の流れを以下に示す。

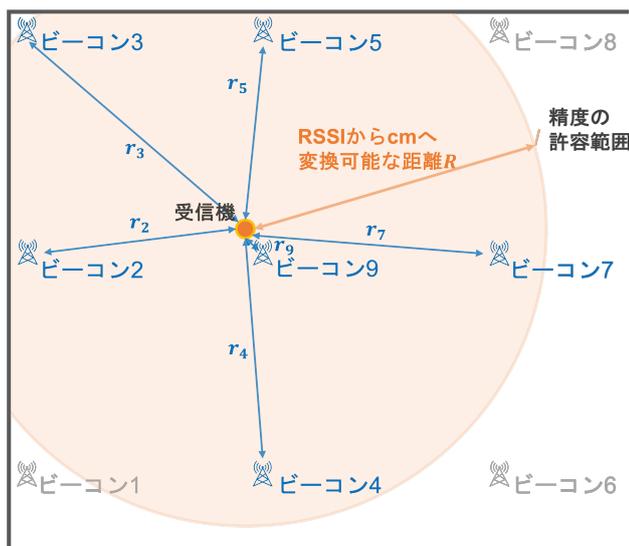


図6 各ビーコンの距離を重みに変換

まず、送信機と受信機の物理的な距離が近いほど信号は

強まり、RSSI値の変化も正確に取得しやすいことから、距離を重みに変換する。この過程を図6に示す。

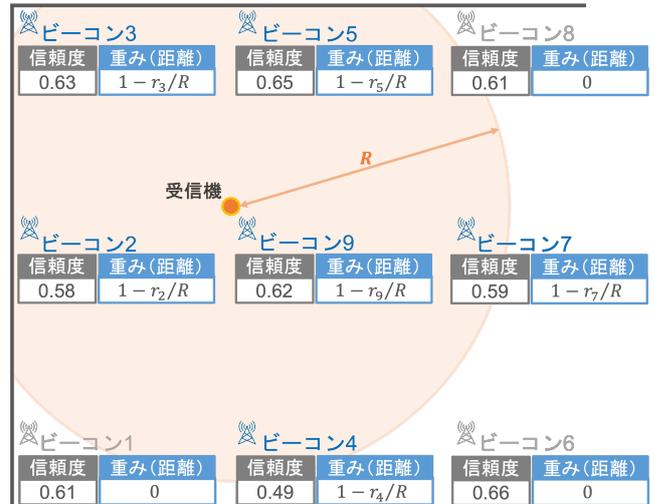


図7 各ビーコンの重み(距離)の計算

図6では、9個のビーコンの中から正しくRSSI値から距離(cm)へ変換可能な物理的な範囲を橙色で示している。なお、ビーコン*i*における受信機からの距離を r_i としている。BLEの送信機と受信機が一定距離以上離れると、信号が減衰すぎてRSSI値がほとんど変化しなくなる。これを予め考慮し、正確にRSSI値から距離へ変換できる範囲外のビーコンは計算対象外としている。図6の場合、ビーコン1、ビーコン6、ビーコン8が対象外となる。

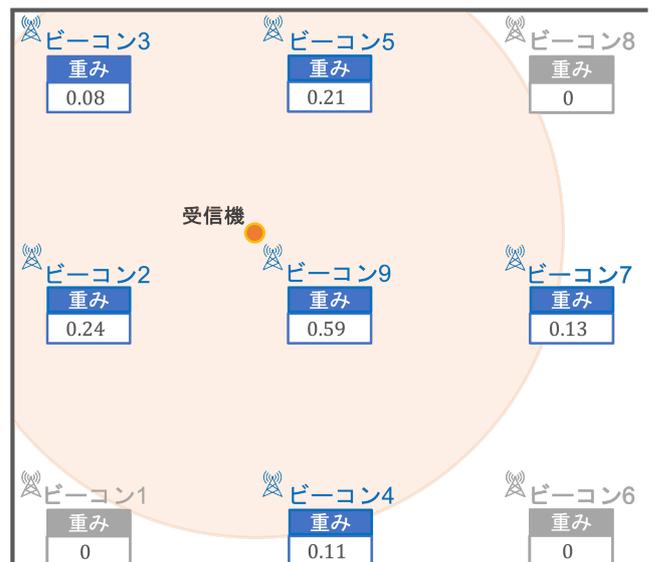


図8 各ビーコンの重み(総合)の計算

正確にRSSI値から距離へ変換できる範囲を円とすると、この半径Rを元に重みが計算できる。図7に示す。図6の後、受信機までの距離が近いほど重みを大きく設定するた

め、 R を用いて0~1の範囲に表す。これは、受信機と送信機の距離が近いほど、取得可能なRSSI値の変化が顕著であり、距離変換する際の誤差が小さくなるからである。図1のように、距離が離れるほどRSSI値は小さくなり、変化も横ばいになる。例えば、50cmから100cmの時のRSSI値の変化量は-3(dBm)程度であるが、150cmから200cmの時のRSSI値の変化量は-1(dBm)程度まで小さくなっている。この特性を考慮するため、距離が近いほど精度が高くRSSI値から距離へ変換できるとし、近いほど重みを高くしている。

最後に、各ビーコンの個体差を考慮した信頼度と距離に対する重みを乗算し、最終的な重みとする。最終的な重みを図8に示す。ビーコン1, 6, 8を除く6個のビーコンに対して、0~1の範囲で重みを計算し、これらから降順で選択を行うことで、精度の向上が実現できる。多点測位に用いるビーコン選択を図9に示す。

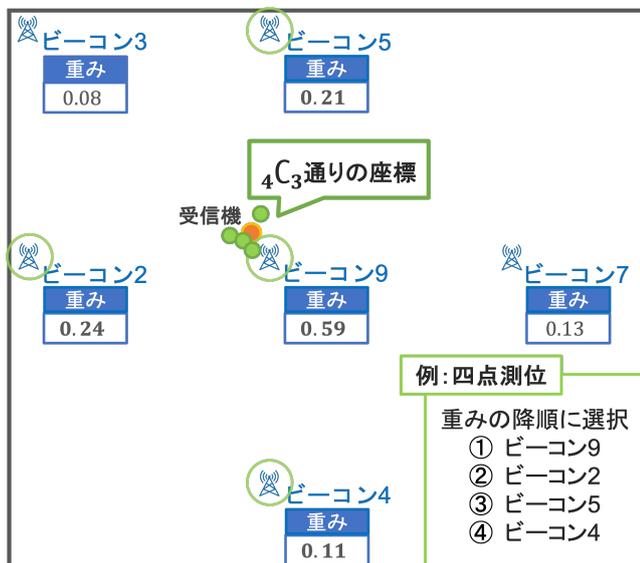


図9 多点測位に使用するビーコンの選択

図9では、四点測位を例に挙げている。6個のビーコンの内、重みが大きい4つを選択する。大きい順にビーコン9, 2, 5, 4である。この4つのビーコンを緑色の点の様に、 $4C_3$ 通りの座標を計算する。これらの重心を計算することで、最終的な座標位置となる。

ここからは、本研究で採用している多点測位における座標の計算方法について説明する。ビーコンの個数を n とすると、 nC_3 通りの計算を行うが、1つ1つは三点測位の計算である。そのため、三点測位によって、3つのビーコンの位置から受信機の位置を計算で求める。立体的な配置図を図10に示す。

3つのビーコンをそれぞれビーコン A, B, C とし、受信機までの距離を r_A, r_B, r_C 、受信機の z 座標は身長からわかっているものとし、 d_3 としている。3つのビーコンから球状にBLEの電波が出力されると仮定すると、図11の様

に表すことができる。

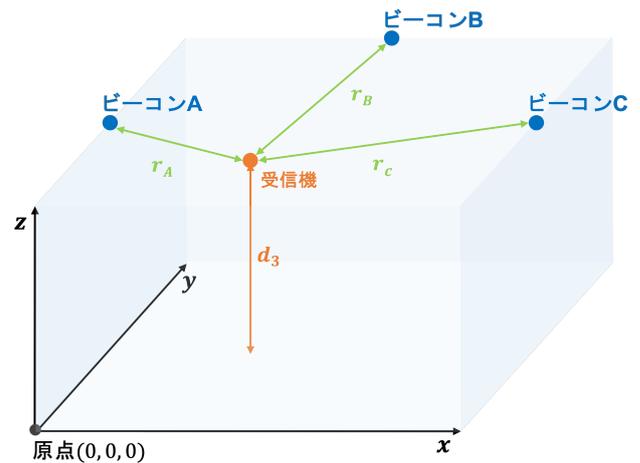


図10 3つのビーコンから受信機の座標を求める

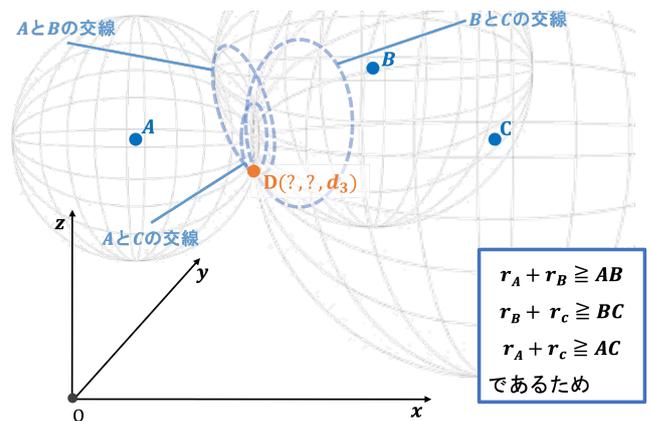


図11 3つの球の交線を求める

ここで、受信機の位置が AB 間、 BC 間、 AC 間を結ぶ一直線上に存在することはありえないと仮定する。3次元空間上で各ビーコン間のちょうど真中に受信機が位置することはほぼあり得ないためである。つまり、 $r_A + r_B \geq AB$ かつ $r_B + r_C \geq BC$ かつ $r_A + r_C \geq AC$ であるため、3つの球は交線ができる。また、この交線は円になる。この3つの交線から交点を求めることで座標が計算できる。

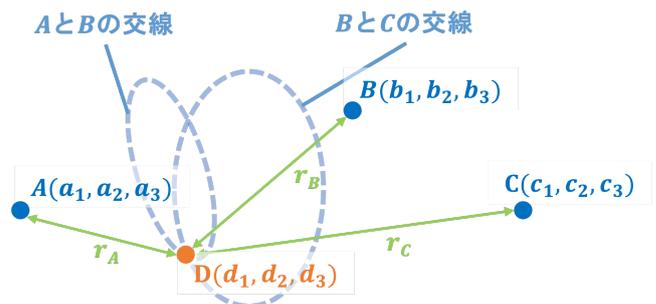


図12 2つの円(交線)の交点から受信機の座標を求める

計算過程を図 12 を用いて説明する。A の x, y, z 座標をそれぞれ a_1, a_2, a_3 とし、同様に B の x, y, z 座標を b_1, b_2, b_3 , C の x, y, z 座標を c_1, c_2, c_3 とする。受信機の位置を D とし、 d_1, d_2 を求めるものとする。A, B, C を中心とする球面の方程式は以下の式となる。

$$(x - a_1)^2 + (y - a_2)^2 + (z - a_3)^2 = r_A^2 \quad (1)$$

$$(x - b_1)^2 + (y - b_2)^2 + (z - b_3)^2 = r_B^2 \quad (2)$$

$$(x - c_1)^2 + (y - c_2)^2 + (z - c_3)^2 = r_C^2 \quad (3)$$

3つの式を用いて、2つの球面の交線(円)が乗った平面の方程式は、それぞれ以下の式で表すことができる。

$$(2a_1 - 2b_1)x + (2a_2 - 2b_2)y + (2a_3 - 2b_3)z = r_B^2 - r_A^2 + (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2) - (b_1^2 + b_2^2 + b_3^2) \quad (4)$$

$$(2b_1 - 2c_1)x + (2b_2 - 2c_2)y + (2b_3 - 2c_3)z = r_C^2 - r_B^2 + (b_1^2 + b_2^2 + b_3^2) - (c_1^2 + c_2^2 + c_3^2) \quad (5)$$

$$(2a_1 - 2c_1)x + (2a_2 - 2c_2)y + (2a_3 - 2c_3)z = r_C^2 - r_A^2 + (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2) - (c_1^2 + c_2^2 + c_3^2) \quad (6)$$

式(4)~(6)の内、2つの式を用いて計算を行う。受信機の z 座標 d_3 を代入することで、変数は x, y の2つになる。連立方程式の解を求めることで、座標が求められる。

ユースケース・シナリオ



図 13 ユースケース：買い物中のナビゲーション

本研究は、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。屋内におけるナビゲーションは、リアルタイムに位置決定を行うものである。ナビゲーションのイメージ図を図 13 に示す。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っ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。

4. 実装と実験方法

実装

本研究の実装は、BLE の受信機である IoT デバイス、送信機である BLE ビーコン、座標計算を行う Web サーバーの3つにて構成される。構成図を図 14 に示す。

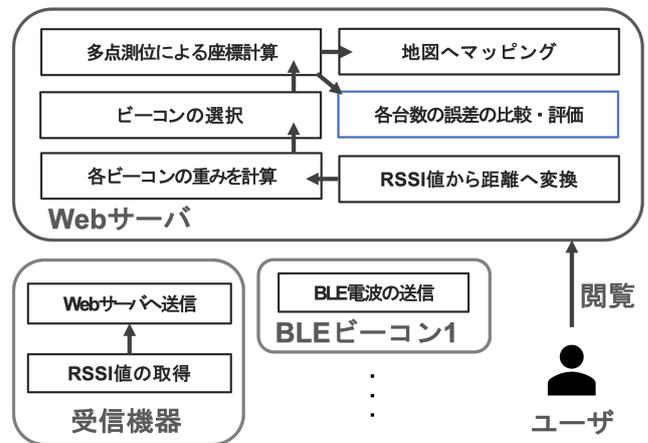


図 14 ソフトウェア構成図

実装は micropython および python で行い、基本構成は前回の研究と同様である [8]。BLE ビーコンは 9 台使用し、多点測位における個数を 3 台~9 台に変化させることが目的である。受信機器は 1 台であり、受信機器の位置を変化させ測定を行なった。Web サーバでは、主に RSSI 値から距離への変換、重みの計算、多点測位の計算といった全般的な計算を行う。

実験環境

本研究における実験環境は、四方をテーブルで囲み、BLE の送信機として一定距離に ESP32 を配置した。配置図を図 15 に示す。

ESP32 は 300cm 間隔で配置している。机の縦の長さは一部異なっており、立体的に計算をする際のチェックを兼ねている。それぞれ 77cm, 66cm である。また、中央にも配置を行い、距離と精度の関係性を調査した。これを座標変換したものを図 16 に示す。

図 16 の青い点は全て送信機の ESP32 の座標であり、わかっているものとする。図 16 のうち、橙色の点である受信機の x 座標と y 座標を求めている。

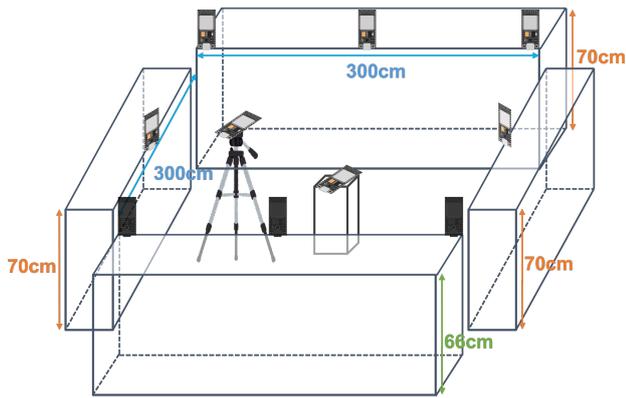


図 15 実験環境の配置図

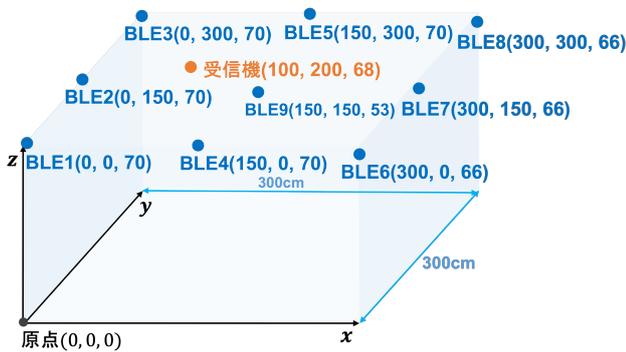


図 16 座標空間への変換

5. 評価と分析

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。

- 提案方式を用いた三点測位
- ラーニングフェーズを行った既存方式の三点測位
- 既存方式の三点測位

提案方式には、ラーニングフェーズと多点測位の2つのフェーズが存在する。そのため、既存方式と提案方式でどこが最も影響が強いのかを評価する。また、誤差の計算方法は図17の通りである。

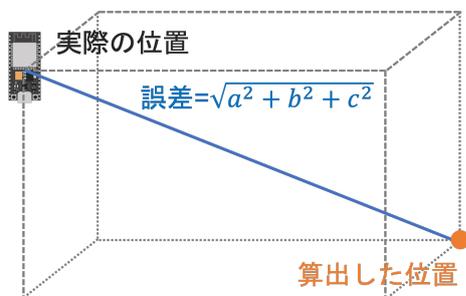


図 17 誤差の求め方

受信機の実際の位置と算出した位置が直方体の頂点だと仮定すると、頂点同士を結ぶ線として誤差が計算できる。

既存方式ではユークリッド距離を用いて誤差を算出する。どちらも直線的な誤差で評価を行う。実験結果を図18に示す。なお、メジャーで測定した受信機の位置座標 (cm) は (100, 200, 68) である。

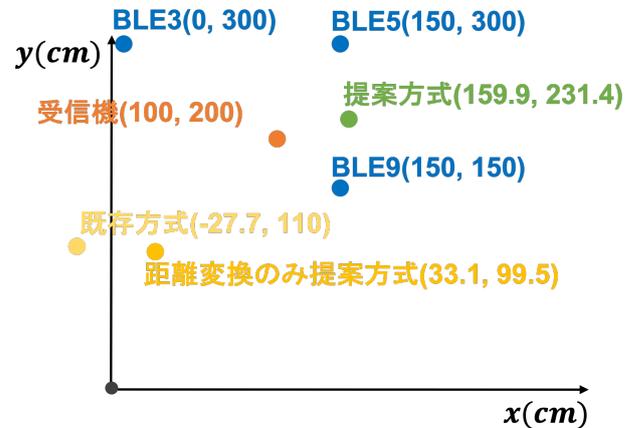


図 18 上から見た座標計算結果

図18の結果から、提案方式が最も精度が高いことがわかる。これは立体的に座標を求めた点と、各ビーコンの個体差を考慮したRSSIから距離変換を行った点の2つが要因であると考えられる。2次元的な計算のみでは、高さの距離を考慮できないため、正確な座標が計算できない。ここで、RSSI値から距離に変換する処理は最も誤差に影響を与える部分である。理論値による変換ではなく、実際の測定値を用いた変換によって正確な値が求められたと考える。

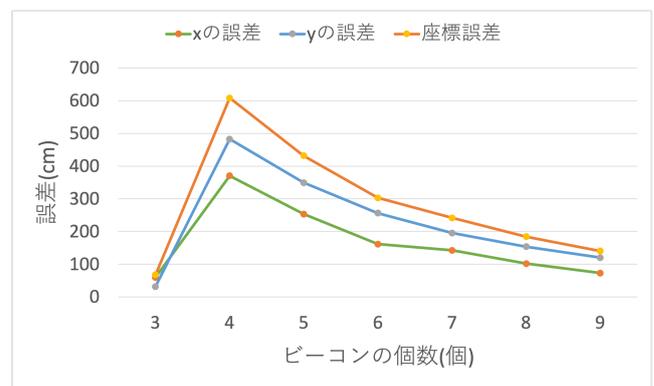


図 19 多点測位における個数と誤差の変化 1

また、多点測位における個数と誤差の変化について図19に示す。図19では、ビーコンの個数が3つの時最も精度が高く、4つの時に最も精度が低く、その後精度が高くなっている。これは、ビーコンが3つの時、座標は1つのみ計算で求められるため、ビーコンの精度に依存して精度の高さが決まっている。しかし、4つ以上の多点測位の場合、提案方式では複数の座標が重心を求めているため、計算した座標の位置が正解から離れている個数の割合によって誤

差が変化する。四点測位の時、座標は4個存在し、重心を求めている。最終的な座標を求める中で、4つの座標のうち1つの座標が与える影響が高い。九点測位では84個存在するため、1つ1つの座標が与える影響が小さくなる。これらの要因から個数が多くなるほど誤差が小さくなったと考える。

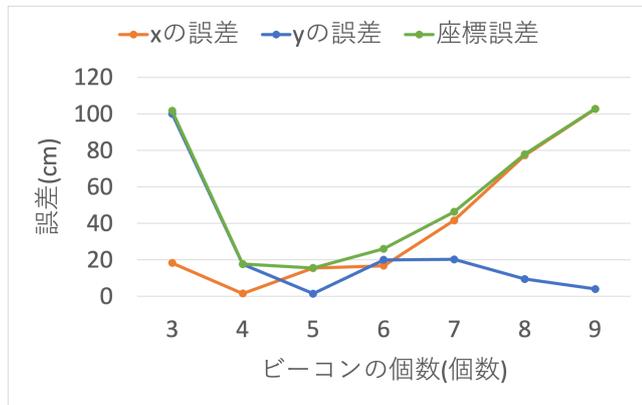


図 20 多点測位における個数と誤差の変化 2

また、正解の座標を (200, 100, 68) で再実験を行なった結果を図 20 に示す。図 20 では、図 19 とは異なる結果になった。四点測位の時最も誤差が小さく、九点測位の時最も誤差が大きい結果となった。これは、1つ1つのビーコンに対して近似曲線を作成し、これを元に RSSI 値から距離への変換を行なったが、近似曲線あるいは運用時に取得した測定値が大幅にずれたことによってこのような結果になったと考える。ラーニングフェーズおよび運用時どちらにおいても、変化し続ける RSSI 値の値を一意に定める、あるいは誤差を小さく基準値を決定しなければ、このような誤差が大きい座標が計算される恐れがある。

6. 議論

多点測位において、最も誤差に影響を与えるのが RSSI 値から距離の変換である。この変換を正確に行わない場合、多点測位に用いるビーコンの個数が増えるほど誤差が蓄積し、正確な座標が求められない。そのため、ラーニングフェーズでより多くの実測値を計測し、近似曲線をより正確なものにする必要がある。また、運用時に取得する RSSI 値も電波干渉によって値が変化する場合が多く、回数を増加させる必要がある。そのため、高速に大量の実測値を取得する仕組みが必要である。

また、本研究のラーニングフェーズは回数や時間がかかるものであり、実用化するためにはより高速かつ手順を簡易化する必要がある。あるいは、自動化によるユーザが関わらない形式での処理が必要となる。受信機の位置を動的に移動する場合や、各ビーコンのキャリブレーションを汎用性・再現性がある処理に変えることで改善が可能である。

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と、多点測位の個数決定が変化する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個体差を数値化し、これと距離を用いて重み付けを行うことで、各ビーコンごとに指標を作成している。その後、重みが降順になるようにビーコンを選択し、多点測位によって座標を求めることで、既存方式より精度の改善を行った。実験の結果、提案方式は既存方式より 56cm 以上誤差を削減することが実現できた。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 unacast (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 — MarketsandMarkets, 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] 高木 優希, 串田高幸: BLE を用いた多点測位による IoT デバイスの位置推定, 技術報告, クラウド・分散システム研究室, CDSL-TR-057 (2021).
- [9] 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).
- [10] Beauregard, S. and Haas, H.: Pedestrian Dead Reckoning: A Basis for Personal Positioning, *PROCEEDINGS OF THE 3rd WORKSHOP ON POSITIONING, NAVIGATION AND COMMUNICATION* (2006).
- [11] 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).
- [12] 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).