

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¹ 高木 優希² 串田 高幸¹

概要: 位置測位の主要な技術として GNSS がある。壁や天井に代表される遮蔽物が存在する屋内空間では衛星からの電波が遮られることにより、10m 以下の精度で位置を特定できない。このことから、自己位置の特定が困難となる測位誤差が発生するため、近距離無線通信による受信信号強度 (RSSI) を用いた屋内測位を提案する。既存手法では BLE ビーコンを 1.5m 間隔で設置し屋内測位を行った。取得した RSSI 値をヒストグラムで表すとグラフの山が複数現れることにより距離に対して正確な RSSI 値を決定することが出来ず、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 BLE ビーコンの配置場所を探索し、測位精度誤差の削減を行う。提案として IoT デバイスが受信した RSSI 値の取得回数を比較するために階級幅 1 の度数分布にし、取得した値の範囲が狭い 3 つの BLE ビーコンの配置場所で 3 点測位を行う。さらに、BLE ビーコンごとの個体差を数値化する基準となる RSSI 値の決定に最小値と最大値の平均値と最頻値の 2 つを平均した値を基に BLE ビーコンの位置の決定を行い、測位誤差の削減を図る。評価として BLE ビーコン間隔を 1.5m にした手法との位置測位誤差を比較する。

1. はじめに

背景

GNSS(Global Navigation Satellite System) は、屋外環境において正確で信頼性の高い位置情報を取得できる [1]。しかし、GNSS 電波は建物を透過する際に弱まるため、位置測位の誤差が発生する。また、GNSS の一つである GPS(Global Positioning System) の精度は約 10m で、位置情報をマッピングした際に、壁にのめり込むことや誰もいない座席を指したりといった誤差が引き起こされるため、測位精度が 50cm 以上だとユーザが座っている位置を特定できない [2]。そこで、BLE(Bluetooth Low Energy) ビーコン (以下: ビーコン) を用いた屋内測位が注目されている [3]。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。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や屋内駐車場のゲート開閉、O2O(Online to Offline) のマーケティング目的での利用範囲が拡大している。現在の主要な屋内測位方法として、ビーコンから発する電波を受け取り、RSSI(Received Signal Strength Indicator) という信号

強度から、最も近くにある 3 つの隣接ノードの信号強度を収集し、位置を計測する方法がある [4]。しかし、BLE 電波は Wi-Fi ネットワークに比べて減衰しやすく、電波が届かない場所が発生するため、多数のビーコンを設置してカバーレッジエリアを広げる必要がある [5]。また、屋内測位手法の一つとして複数のビーコンを用いた多点測位が提案されている [6][7]。複数のビーコンを用いた多点測位では 9 つのビーコンを 1.5m 間隔で固定し、ビーコンの信頼度を基に、近くにある 3 つのビーコンを選び、屋内測位を行っている。この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 [8]。BLE 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、電波範囲を狭める [9]。

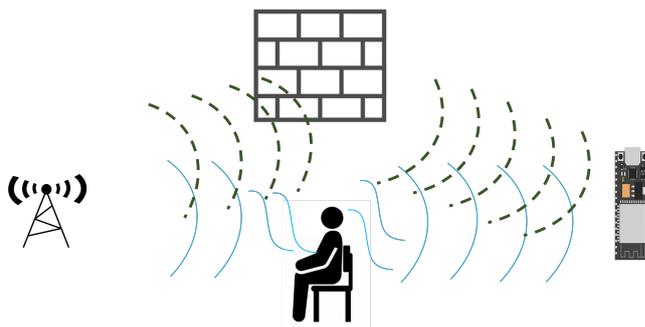


図 1 ビーコンから発する電波が壁で反射する

¹ 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

² 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

図1のように屋内環境には壁や人間といった、電波反射の原因である遮蔽物が存在しているため、環境に合わせた測位手法が必要である。壁にビーコンを設置した場合、金属やコンクリートの壁は電波を反射し、壁とは反対側へ電波は放射されるため、壁から離して設置する必要がある。

課題

本研究で解決する課題は屋内測位の誤差が大きいことである。屋内測位では、屋外測位に比べて、壁や家具といった遮蔽物が存在しており、電波の反射が起こる。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、電波範囲を狭める[9]。このことにより、取得した電波強度が複数の値に分かれるため、正確な値を選択できず、位置測位の誤差が大きくなる。出席管理をビーコンを用いた多点測位で実現したいが、基礎実験の結果から測位誤差は約100cmあり、ユーザの座席特定が実現できない[10]。

各章の概要

第2章では、本稿の関連研究を紹介し、課題と方法、今後の課題について述べる。第3章では、本稿で行う提案と、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詳細について述べる。第5章では本稿の実験で出たデータを分析し、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、本稿のまとめを述べる。

2. 関連研究

関連研究では、本稿と類似した研究を3つ紹介する。

Torii, HiroyukiらはBLEのRSSIによって観測されたフィンガープリントを利用した屋内測位方法を研究している[6]。トレーニングフェーズ(オフライン)とテストフェーズ(オンライン)の2つのフェーズでアプローチしている。トレーニングフェーズでは、ビーコンを複数の場所に置いて、レシーバーが受信したRSSIの値をテストフェーズ前にトレーニングデータとして保存する。フィンガープリントの屋内測位は、固定したデバイスのRSSI値をデータベースに保存し、参照することで、精度を向上する事が出来る。今後の課題として送信アンテナの指向性を考慮する必要があると述べられている。ビーコンの向きに対して多方向から測位する必要がある。

高木らはビーコンの多点測位による測位精度を研究している[7]。9つのビーコンを1.5m間隔で配置し、最も近いビーコンを重みづけによって選択している。ラーニングフェーズでは、ビーコンからのRSSIの値をレシーバーで複数回受け取り、複数回受け取った値から最頻値となる点を選択し、RSSIの値を距離に変換している。この研究では、最低誤差は15.4cmである。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、精度が低下することが課題である。そのためには、ラーニングフェーズの段階で、より多くの実測値を取得し、近似曲線をより正確にする必要があると述べられている。座席の特定を行うためには50cm以下の誤差にする必要がある。

Yu Tianらはビーコンの数とビーコンを屋内環境のどこに配置する必要があるか研究している[11]。フィンガープリントを収集するために廊下とホールに54個のビーコンを配置し、複数のビーコンの組み合わせを試したうえで、最小数のビーコンと最小数のフィンガープリントの組み合わせを見つけた。この研究では、障害物や人の動きによる影響を避けるために、環境内の障害物を取りのぞいている。今後の課題として、屋内の障害物のある空間での精度の向上が必要である。

3. 提案方式

本研究の目的は、既存研究である高木らの実験より多点測位の誤差を削減させることである[7]。本研究は、基礎実験、トレーニングフェーズ、実装フェーズの3つの段階に分けて行う。前提として受信デバイスは固定し、ビーコンのみ配置を変えることにより高木らの研究より多点測位の誤差を削減させる。まず、本研究で使用するヒストグラムの山の検知は高木らの研究の方法で行う[7]。上に凸の部分を山という。

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、4台のビーコンと1台の受信デバイスを用いて、RSSI値の山の数が少ない位置を特定
 2. トレーニングフェーズとして基礎実験で取得した値をもとに、各ビーコンのRSSI値の基準値を決定
 3. 実装フェーズとして、基礎実験で特定したビーコンの配置場所で、3点測位をして受信デバイスの座標を計算
- 本研究では、基礎実験としてビーコンの電波を複数回取得したときのRSSI値の山が2つになる配置を探索する。方法として、1.0mごとに15分間、基礎実験で確定した分割場所でRSSI値を測定し、測位誤差の削減を図る。基礎実験を18回行った結果、山の本数は2つから4つになることが分かった。基礎実験の結果から山の本数が2つになるときに分散が最も小さくなるため、山の本数が2つになる配置を探索することで測位精度誤差が削減できると考えられる。山の本数が2つにならない場合は、RSSI値を度数分布にしたときに値の範囲が最も狭くなる配置場所を探索する。また、教室での位置測位を行うため、教室内の椅子と机の間隔の1.0mずつでRSSIを取得する。さらに、RSSI値を15分間取得する理由として、講義に出席した人を特定したいため、講義で出席が締め切られる15分間で実験を行う。

電波は理論上、球体状に放出されるが歪みになる可能性がある。歪みとなる場所は目視では確認できないため、電波範囲の円周上にビーコンを配置することで歪みを検知で

きる。基礎実験で確定した分割場所で電波強度を測定することで、大まかに歪みを検知でき、正確な RSSI 値を取得できると考える。また、トレーニングフェーズを設け、ビーコンごとに基準値を決定していくことにより、測位誤差の削減を図る。以上の具体的な説明に加えて、実際に使用できるユースケースについての説明を述べる。

基礎実験

提案方式確立のためにビーコンと受信デバイスの距離を変化させることによる RSSI 値の変化の基礎実験を行った。図 2 は受信デバイスと 1 つのビーコンまでの距離を 0m にして RSSI 値を 1004 回取得し、グラフ化したものである。

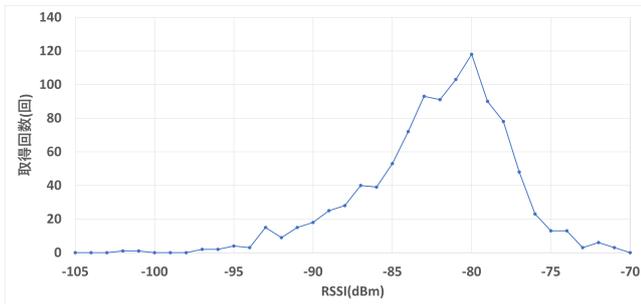


図 2 受信デバイスと受信デバイスの距離が 0m の時の RSSI 値

図 2 を見ると距離が 0m の時は RSSI 値の山が 9 つになることが分かった。しかし、受信デバイスとビーコンの距離間隔が 3 点測定時に 0m になることはない。そのため、0m より広い間隔で RSSI 値の山が出来る限り少なくなる位置を特定する必要がある。

次に、受信デバイスとビーコンの距離を変化させたときの距離ごとの実測した RSSI 値を見ると、ビーコンと受信デバイスの距離が 2.0m の時は-71.91, 2.5m の時は-73.69, 距離が 3.0m の時は-75.14, 距離が 3.5m の時は-76.37, 距離が 4m の時は-77.43 となり、距離が 3m 以上になると RSSI 値の減衰が起こりづらくなることが分かった。そのため、受信デバイスとビーコン間の距離は 3m までとする。

図 3 は基礎実験のために設定した実験環境である。全てのビーコンが異なる位置に配置されていて、ビーコン 1 から受信デバイスまでの距離が 1.41m, ビーコン 2 とビーコン 3 は受信デバイスまでの距離が 1.12m, ビーコン 4 から受信デバイスまでの距離が 0.7m, ビーコン 5 から受信デバイスまでの距離が 2.06m である。

図 4 はビーコン 1,2,3,4,5 から取得した RSSI 値をグラフ化したものである。各ビーコンの山の数はビーコン 1 が 2 つ, ビーコン 2 が 3 つ, ビーコン 3 が 3 つ, ビーコン 4 が 3 つ, ビーコン 5 が 2 つである。基礎実験の結果、ビーコンと受信デバイスの距離が 0.7m 以上の場合、山の数は最低 2 つ, 最大 4 つになることが分かった。図 2 の受信デバイスとビーコンの距離を 0m にした時と、山の数を比べてみ

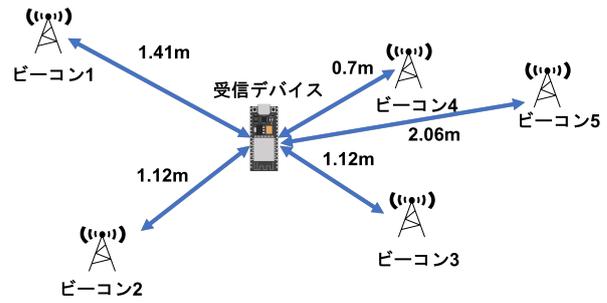


図 3 基礎実験の実験環境

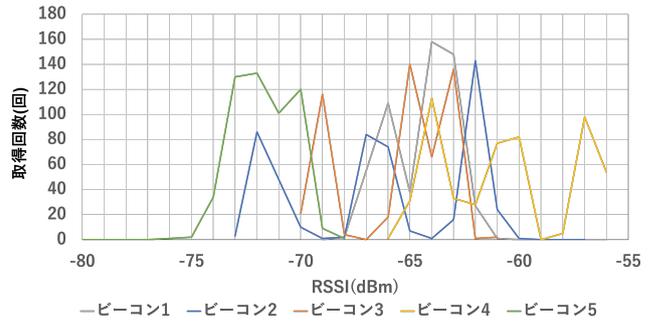


図 4 図 3 環境における各ビーコンの RSSI 値

ると、距離が離れるほど RSSI 値の山の数が少なくなることが分かった。このことからグラフが複数の山に分かれた原因はビーコンと受信デバイスの電波干渉だと考える。また、ビーコンの電波は消費電力を抑えるために Wi-Fi の電波より弱いため、RSSI 値は同じ場所に配置していても変化する。そのため、同じ場所で 3 回 RSSI 値の測定を行い、3 回分の山の平均数と階級数の平均を求める。図 5 は図 4 からビーコン 2, ビーコン 3 を抜き出したものである。受信デバイスからビーコンまでの距離が 1.12m で同じにもかかわらず、ビーコンの配置位置が異なるため、異なる RSSI 値の範囲で山が出現している。このことからビーコンと受信デバイスの距離が同じであっても、配置位置によって RSSI の値が変化する [12].

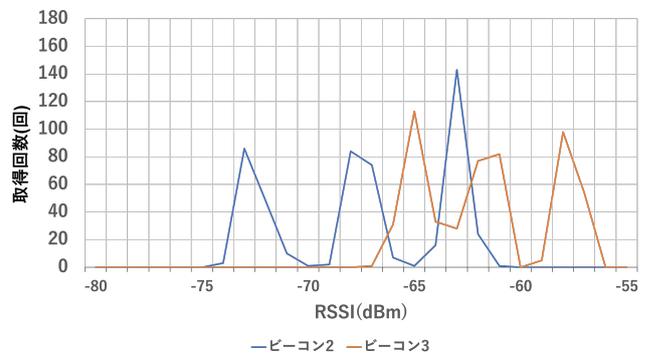


図 5 図 3 環境におけるビーコン 2, ビーコン 3 の RSSI 値のヒストグラム

次に、受信デバイスとビーコンの距離変化による RSSI 値の変化の基礎実験を遮蔽物がない空間で行う。まず、受

● :受信デバイス

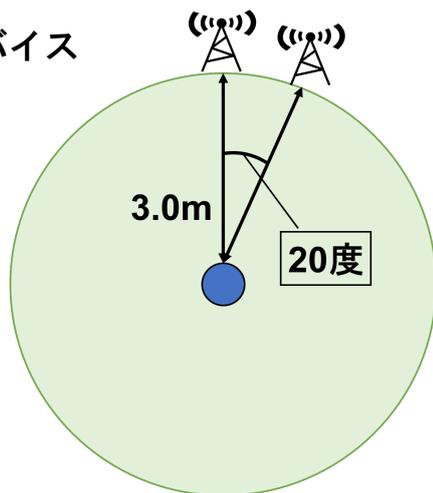


図 6 基礎実験：ビーコンの方位の決定方法

受信デバイスとビーコンの距離を固定し、方向によってRSSIがどのように変化するかの実験を行う。図6に示すように、受信デバイスを中心とした半径3.0mの円がある。ビーコンと受信デバイスの距離を3.0mにし、ビーコンを中心点から20度間隔で360度分設置しRSSI値を15分間取得する。3.0mを基準にする理由は、距離によるRSSI値の減衰の実験から、RSSI値の減衰が3.0m以上で起こりにくくなることで、3.0m以上の位置をRSSI値から判別することが困難となるためである。また、ビーコン間の距離間隔が1.0m以下になると電波干渉により測位誤差が大きくなるという研究結果がある[13]。本提案では測位誤差を減らしたいため、ビーコン間の距離が1.0m以上である20度間隔でビーコンを設置する。取得したRSSI値のヒストグラムから山の数が2つになる位置を特定する。また、隣同士のビーコンのRSSI値の山の数と階級数が同じになるかどうかを比較する。隣同士のビーコンのRSSI値の山の数と階級数が同じであれば、20度間隔の配置ではRSSI値に差がないと言えるため、図7のビーコンの配置間隔をビーコン1つ分広くし、40度間隔で隣り合うビーコンのRSSI値を比較する。40度間隔で比較したRSSI値の山の数と階級数が同じであれば、RSSI値に差がないと言えるため、ビーコンの配置間隔をビーコン1つ分広げる。この作業を繰り返し、隣り合うビーコンのRSSI値に差があるような配置場所で図7を行う。取得したRSSI値の山の数が3つ以上になる場合、階級数が最小となり、最小の階級数になる位置が4つ以上になる配置を探索する。

図7は実験の様子を示し、図6の実験で山の数が2つになる位置が4つである。

まず、図7に示すように受信デバイスとビーコンの距離間隔を変えながら4方向で同時にRSSI値を測定する。受信デバイスを中心とした半径1.0mの円周上で、図7で確定した位置の直線上にビーコンを配置し15分間でRSSI値を取得する。それぞれのビーコンの位置を右回りで変化さ

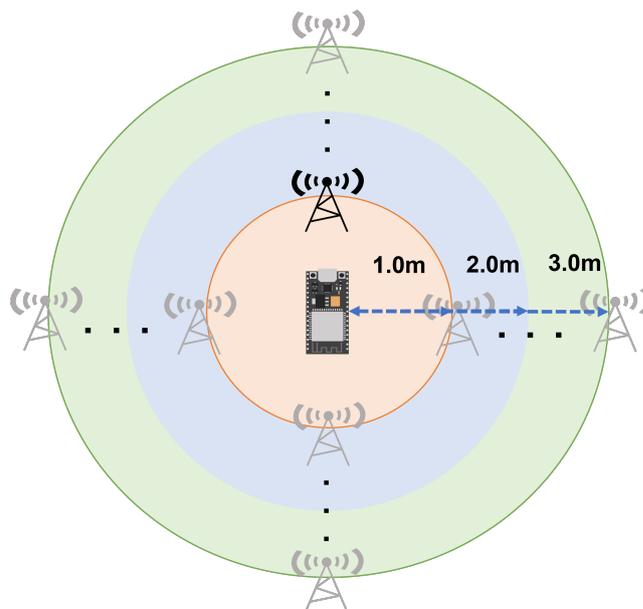


図 7 基礎実験：受信デバイスとビーコンの距離の変化

せながら計4回実験を行う。同距離につき、4か所で実験を行うことでビーコンの個体差を見る。次に距離を1.0m延長し、半径2.0mの円周上の図7で確定した位置の直線上にビーコンを配置し15分間でRSSI値を取得する。受信デバイスとビーコンの距離は1.0mから最大3.0mまでとする。ビーコンと受信デバイスの距離によるRSSI値の山の数の推移を調べたいため、1台につき12箇所でもRSSI値を取得する。実装フェーズでは4つのビーコンから3つを選択し、位置測位を行うため、ビーコン4台分のRSSI値を取得する。

トレーニングフェーズ

基礎実験で取得したデータを基に、ビーコンごとの基準値となるRSSIを決定する。

基礎実験の結果、RSSI値のヒストグラムの山が2つになった場合は、図8に示す方法でビーコンの基準値となるRSSI値を決定する。取得したRSSI値の最大値と最小値の平均であるミッド・レンジと最頻値の平均を基準値とする。本研究は階級数の少ないビーコンを選択することで外れ値を含みにくく最大値と最小値の差が小さくなり、実際のRSSI値との差も小さくなるミッドレンジを使用した。また、最頻値は必ずしも正しいとは限らないため、ミッド・レンジと最頻値の平均値を取ることで精度向上を図る。図3の実験環境における取得したRSSI値を参照すると、図4のビーコン1の階級数は8、図4のビーコン2の階級数は14、ビーコン3の階級数は10、図4のビーコン4の階級数は11、ビーコン5の階級数は9である。階級数が少ない方が分散が小さくなるため、図10のように階級数がより少ない3つのビーコンを選択する。

図11は3つのビーコンの配置が決定した後の図である。

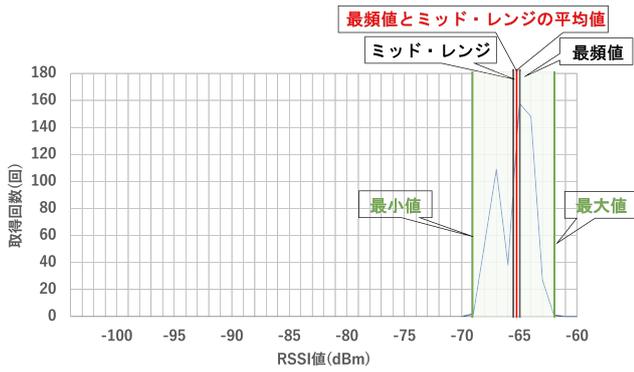


図 8 トレーニングフェーズ：山が2つの場合の RSSI 値の選択



図 9 トレーニングフェーズ：山が2つの場合の RSSI 値の選択

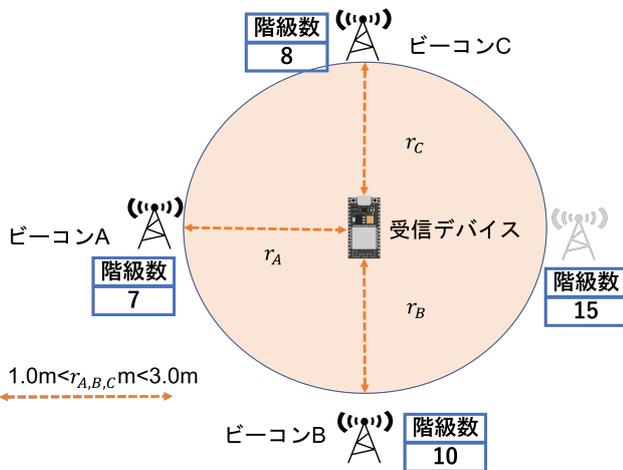


図 10 トレーニングフェーズ：階級数の昇順でビーコンを選択

次に、各ビーコンの基準値となる RSSI 値を距離に変換する。高木らの実験では、受信デバイスとビーコンの距離を 1.0m から 3.0m まで 1.0m ずつ離しながら RSSI を取得し、得られた距離ごとの RSSI から近似曲線を求めて距離を算出している [7]。基礎実験の方向毎 1.0m ごとに近似曲線を計算して距離 r の計算式を算出する。この研究より距離 r を求める式を以下に示す。

$$r = 2.6019x^2 + 327.91x + 10434 \quad (1)$$

r : 算出する距離 (m)

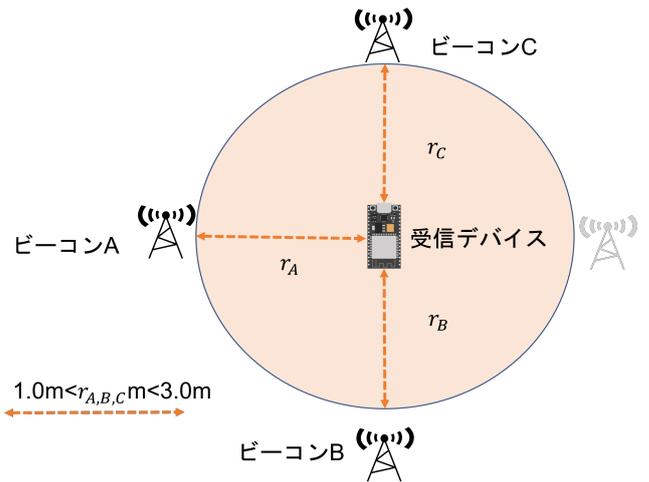


図 11 基礎実験の環境：受信デバイスとビーコンの距離

x : 計測した RSSI 値 (dBm)

RSSI から距離を導く際は式 (1) を使って計算を行う。

実装フェーズ

実装フェーズでは、基礎実験とトレーニングフェーズで定めた配置と基準値を使って、受信デバイスの位置測位を行う。図 12 は高木らの計算方法に従って受信デバイ

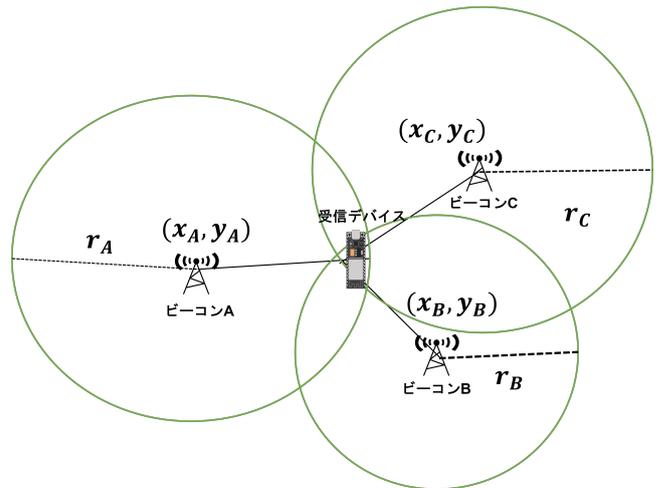


図 12 実装フェーズ：3点測位

スの座標を求めている [7]。3つのビーコンの中心座標を $(x_A, y_A), (x_B, y_B), (x_C, y_C)$ とし、RSSI 値を半径 (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 [7]。 r_A, r_B, r_C を以下の式で求める。

$$r_A^2 = (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 \quad (2.0)$$

$$r_B^2 = (x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 \quad (3.0)$$

$$r_C^2 = (x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 \quad (4.0)$$

(2.0), (3.0), (4.0) を変形すると以下の式が得られる。

$$r_A^2 = x^2 - 2x \cdot x_A + x_A^2 + y^2 - 2y \cdot y_A + y_A^2 \quad (5.0)$$

$$r_B^2 = x^2 - 2x \cdot x_B + x_B^2 + y^2 - 2y \cdot y_B + y_B^2 \quad (6.0)$$

$$r_C^2 = x^2 - 2x \cdot x_C + x_C^2 + y^2 - 2y \cdot y_C + y_C^2 \quad (7.0)$$

上記の式で2つの円の交点を求めることが出来るが、非線形連立方程式であるため、数学的に解くことはできない。そのため、球面交差のラジカル平面を求める方法を用いて、式(7.0)から式(6.0)を引くと以下の一次方程式が得られる[14].

$$r_B^2 - r_C^2 = 2x(x_C - x_B) + x_B^2 - x_C^2 + 2y(y_C - y_B) + y_B^2 - y_C^2 \quad (8.0)$$

式(6.0)から式(5.0)を引くと以下の一次方程式が得られる。

$$r_B^2 - r_A^2 = 2x(x_A - x_B) + x_B^2 - x_A^2 - 2y(y_A - y_B) + y_B^2 - y_A^2 \quad (9.0)$$

式(8.0)を変形して以下の式を作る[14].

$$v_A = \frac{(r_B^2 - r_C^2) - (x_B^2 - x_C^2) - (y_B^2 - y_C^2)}{2} \quad (11.0)$$

式(9.0)を変形して以下の式を作る[14].

$$v_B = \frac{(r_B^2 - r_A^2) - (x_B^2 - x_A^2) - (y_B^2 - y_A^2)}{2} \quad (12.0)$$

式(11.0), 式(12.0)を解き、交点x, 交点yを求める[14].

$$y = \frac{v_B(x_C - x_B) - v_A(x_A - x_B)}{(y_A - y_B)(x_C - x_B) - (y_C - y_B)(x_A - x_B)} \quad (13.0)$$

$$x = \frac{v_A - y(y_C - y_B)}{(x_C - x_B)} \quad (14.0)$$

式(13.0)と式(14.0)から受信デバイスのx座標, y座標を求めることが出来る[14].

ユースケース・シナリオ

本研究により測位誤差が50cm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。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13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の値をServerに送信する。Server側でRSSIの値を基に位置を計算し、ユーザがどの席に座っているのかを特定する。

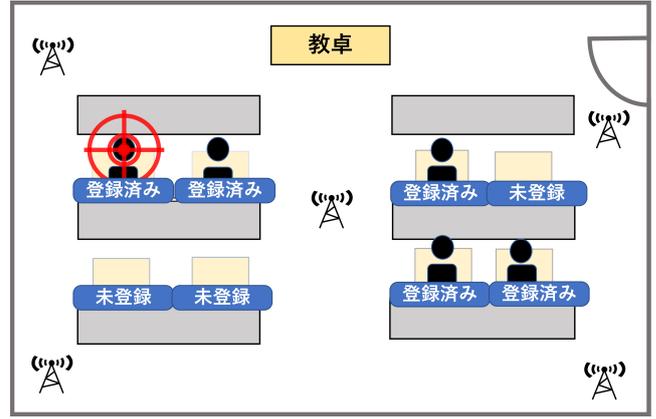


図13 ユースケース：講義における出席管理

4. 実装と実験方法

実装

本研究では、ビーコン4台と受信デバイスを用いてRSSI値を取得し、Serverに送信する。図14にソフトウェア構成図を示す。

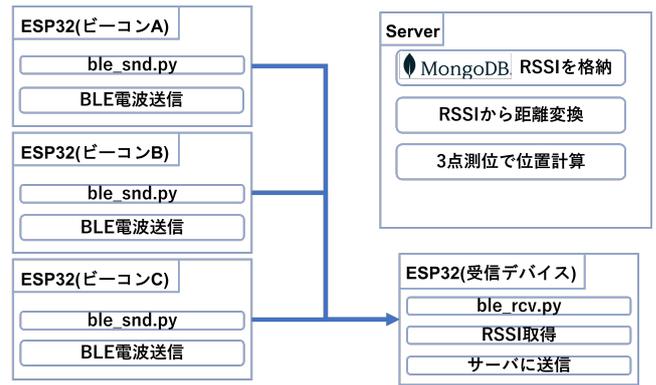


図14 ソフトウェア構成図

図14では、ビーコンの電波を受信デバイスがRSSIとして取得し、Serverに送信する。ServerではRSSIをデータベース(MongoDB)に格納し、RSSIから距離に変換する。変換した距離から3点測位の位置を計算する。

実験環境

本研究ではビーコン4台, 受信デバイス1台, 計4台のESP32を使用する。受信デバイスの位置を計算するために、WebサーバとしてOSはUbuntu18.04の仮想マシンを用いた。使用言語はMicropythonである。基礎実験, トレーニングフェーズの実施場所は東京工科大学研究棟A9階の会議室で行う。実装フェーズは、東京工科大学講義棟A201教室に人を1人配置して行う。

5. 評価手法と分析手法

本研究における評価手法は以下の5つである。

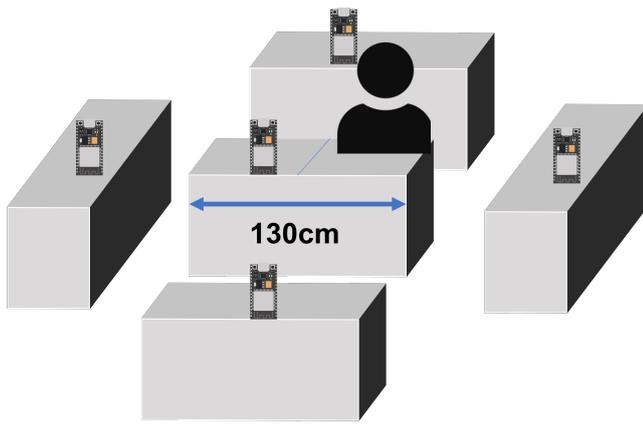


図 15 実験環境

- ・本研究の提案手法
- ・ビーコンの配置を固定した状態の測位 [7]
- ・巻き尺で測定する手法
- ・RSSI の平均値をビーコンの基準値とする手法
- ・最頻値をビーコンの基準値とする手法

本研究による提案では、RSSI 値を複数回取得したグラフの山が 2 つになる配置で位置測位を行い、実際の位置との誤差を比較する。また、9 つのビーコンの間隔を 1.5m にし、高木らの方法で位置測位したものと比較する。

6. 議論

提案手法は、ビーコンの RSSI 値の階級数が小さい順に配置場所を特定し、位置測位を行う方式である。しかし、屋内環境は壁や人といった障害物があるため、同じ位置でも RSSI 値が変化し位置測位の精度が低下する。そのため、基礎実験の段階で RSSI 値の山が 2 つになる点を配置の条件を変えながら見つける必要がある。基礎実験段階では、人を配置せずに実験を行うが、実装フェーズで人を配置して実験を行うため、電波の減衰により位置測位精度が低下する可能性がある。そのため、人を配置したときに減衰する RSSI 値をトレーニングフェーズで取得したデータを基に予測して実際取得した値をキャリブレーションする必要がある。人を配置している場合と配置していない場合の RSSI 値を比較し、RSSI 値の差分を人を配置していない場合の値で補うことで測位精度誤差の削減を図ることが可能である。

7. おわりに

本研究では、BLE の RSSI を用いた配置による測位誤差を課題としている。課題解決のために、基礎実験として距離ごとに RSSI を測定し、グラフの山が 2 つになる位置を特定する。ビーコンごとに配置場所を特定し、電波の減衰を受けにくい場所で RSSI を取得し精度向上を図る。以上の点から、本研究は BLE を用いた屋内測位の測位精度誤差の削減に有用である。

参考文献

- [1] Subedi, S. and Pyun, J.-Y.: A Survey of Smartphone-Based Indoor Positioning System Using RF-Based Wireless Technologies, *Sensors*, Vol. 20, No. 24 (online), DOI: 10.3390/s20247230 (2020).
- [2] Yen, H.-Y., Tsai, Z.-T., Chen, Y.-C., Shen, L.-H., Chiu, C.-J. and Feng, K.-T.: I/Q Density-based Angle of Arrival Estimation for Bluetooth Indoor Positioning Systems, *2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*, IEEE, pp. 1–5 (2021).
- [3] Spachos, P., Papanagioutou, 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] 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).
- [6] 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).
- [7] ”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”, CDSL-TR-083, Dec. 22, 2021.
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] Tian, Y., Huang, B., Jia, B. and Zhao, L.: Optimizing AP and Beacon Placement in WiFi and BLE hybrid localization, *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 164, p. 102673 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102673> (2020).
- [12] Baala, O., Zheng, Y. and Caminada, A.: The impact of AP placement in WLAN-based indoor positioning system, *2009 Eighth International Conference on Networks*, IEEE, pp. 12–17 (2009).
- [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 (online), DOI: 10.1109/JSYST.2020.2969088

- (2020).
- [14] 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).