

BLE ビーコンの個数増加による推定座標の精度の改善

小林 竣¹ 串田 高幸¹

概要: 地球上の物体の位置を特定するのに一般的な方法として、GNSS (Global Navigation Satellite System) が用いられるが、衛星信号が十分に届かない閉じた構造での自己位置の取得が困難とされることから、近距離無線通信が屋内測位システムに使用されている。しかし、屋内測位では、屋外に比べ障害物および遮蔽物が密集している傾向があり、近距離無線通信での位置推定に用いられる受信信号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) の値に影響を与え、距離の測定精度は下がり、位置推定の精度が低くなる。そのため本研究では、100 (cm) での実測の約 50 万の RSSI 値を用い距離推定を行い、各ビーコンの精度をもとに重み付けを優先度として定義し、3次元座標空間における多点測位による精度改善を行った。その結果、ユークリッド距離にして最小誤差 10 (cm) を示すことができ、既存方式に対し 82.1%の改善ができた。

1. はじめに

背景

地球上の物体の位置を特定するのに一般的な方法として GNSS(Global Navigation Satellite System) が用いられる [1]。GPS(Global Positioning System) 機能を搭載した IoT(Internet of Things) デバイスの普及により、自己位置を推定することが容易となった。しかし GPS を用いた位置推定では、衛星の電波が届く範囲に限られているため、地下通路やトンネル、デパートの建物内部では十分な衛星の電波が届かず、利用できない事が欠点である [2]。そのため、衛星の電波が届かない範囲の位置推定の手法が求められている。

その衛星の電波が届かない範囲の位置推定の手法として、電波通信による受信信号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) をもとに行う屋内での自己の位置推定手法がある。RSSI の値は受信機入力に入る受信信号の強度を示す数値であり、受信した受信機の入力電圧の対数値に対しほぼ比例した値を生成し、RSSI 値として出力され、RSSI からノード間の距離を計算できることが知られている。このとき、あらかじめ測定された 100 (cm) での RSSI 値をもとに距離を推定し、理論的には 3 点での RSSI 値が計測できれば測位が可能である。

その中でも一般的にビーコンとして知られている BLE (Bluetooth Low Energy) 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おり、これらの要因から距離推定や屋内測位システムに使用され、

適した技術の 1 つとしてあげられる [3]。

課題

BLE を特徴とする近距離無線通信を用いた屋内測位では、屋外とは異なり、異なる素材からなる壁や天井、障害物および遮蔽物の多く存在する空間であることから、屋内空間では通信に影響を与え、ノード間の測定精度は下がり、位置推定の精度が低くなることが課題である [4]。

従来手法では、誤差 100 (cm) 前後発生し、屋内における進むことが不可能であるエリアに位置推定が検知されるといったことが問題として挙げられる。3 点測位での実測の推定座標の誤差では、最大でユークリッド距離にして約 150 (cm) の誤差が出るといった結果がある [5]。

そのことから本研究では、BLE の RSSI を受信する受信機が出力する RSSI 値を実際の距離へ可能な限り変換する必要がある、それを踏まえ多点の RSSI 値を用い精度向上と個数変化による評価を行う。

各章の概要

第 2 章では、関連研究について紹介する。第 3 章では、提案方式の具体的な説明と、ユースケース・シナリオについて説明する。第 4 章では、提案方式をもとに開発したソフトウェアの実装と実装方法について述べる。第 5 章では、評価手法とデータの分析手法に関して述べる。第 6 章では、本研究について議論を述べる。最後に第 7 章では、本研究のまとめを述べる。

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. 関連研究

関連研究では、本研究の課題を既存方式ではどのような手法を用い解決および精度向上を図ったのかについて、2つの手法を上げる。

Korhan Cengiz は、RSSI 値をベースに最小二乗三角測量アプローチを提案し、AP (Access Point) の増量およびラインフィッティングアルゴリズムを使用することにより、三角測量法での位置推定の確実性の向上を図った [6]。三角測量は、2つの角度とそれらの間の距離に基づいて未確認の場所を決定するために使用される数学的手法であり、この方法はワイヤレスネットワークに適用するにはモバイルノードが角度を知る必要がある。 θ_1 と θ_2 および 2つの基地局間の距離から 3 番目の頂点として測定点を決定することができる。AP の増量による精度向上を図った結果から AP, 3つから 4つに増加させた際に最大に精度向上が見られ、その後精度向上を見られるものの他の AP の影響を受け、精度改善幅は低下してしまう。

Tahar Abbes Mounir らは、ノードの数に等しい数の線形方程式を必要とする数学的手法 (三辺測量)、ローカライゼーションアルゴリズムを用い提案した [7]。また、Tahar Abbes Mounir らは、Hua-Jie Shao や S. Han また Hojae Lee らの提案に基づいて中心 $A(x_a, y_a)$ とする半径 r_a 、中心 $B(x_b, y_b)$ とする半径 r_b 、中心 $C(x_c, y_c)$ とする半径 r_c の円の方程式を連立や、行列計算を用い、3つの円の交点の位置を計算した [8], [9], [10]。また、3つのノードからなる円の交点を求めると共に経路損失モデルにて、2つのノード間の距離は、一方の端で受信信号のエネルギーを測定することによって推定を行い、予想されるノードの位置を改善を図り、ノード間の距離の変化に焦点を当てた。Tahar Abbes Mounir らの研究から送信機の信号強度を原因とし、センサーノード間の距離の増加に伴い受信信号の電力が減少することを分かった。またフィールド規模が大きくなると交差する点が無くなり精度低下を招くことが分かり、送信機の信号強度を基にしたフィールド規模の検討が必要である。

これら関連研究から送信機の信号強度を基にしたフィールド規模の配慮、並びに AP の増加は屋内測位における精度改善に結び付くことが示され、精度向上の要因を踏まえた改善案を必要とする。

3. 提案方式

基礎実験

本研究では、BLE の RSSI の値を用いて多点測位による IoT デバイスの位置推定を行うものであり、以下で RSSI の値から距離情報を取得するための計算式 (3.1) [11] また、TxPower の選出 (3.2) を説明を行う。

TxPower の選出 (3.2) は距離情報を取得する (3.1) とし、本研究の距離推定の基準となる値である事から RSSI の値に信頼性を持たせるため、約 50 万の RSSI 値の集積を行い、選出を行なっている。

3.1 TxPower と RSSI を用いたノード間距離計算

送信機の放出する電波が全方位に均等に放出される場合、表面積 S は距離 D (m) を半径とする球面であり、表面積 S は、式 (1) と表せる。

$$S = 4\pi D^2 \quad (1)$$

単位面積あたりの電力 P (mW) = 電力密度を P_D (mW/m²) とすると、電力密度 P_D は電力 P を、通信距離 D を半径とした球の表面積 (1) で割った値になり、式 (2) で表せる。

$$P_D = \frac{P}{S} \quad (2)$$

式 (1), (2) から電波は「距離の 2 乗に比例して減衰する」ということになる。

RSSI は対数で受信電力 P_D の大きさを表し、電力の単位は、通常 W (ワット) だが、通信に使用する比較的小さい電力の表示は dBm を使用される。これは $1mW$ を基準として対数表示したものであり、 dB の後ろに mW の m を付加する。よって、RSSI を式にすると式 (3) となる。

$$\begin{aligned} RSSI &= 10 \log_{10} \frac{P}{S} \\ &= 10 \log_{10} \frac{P}{4\pi} - 10 \log_{10} D^2 \end{aligned} \quad (3)$$

送信機からの距離 100 (cm) での RSSI の値を TxPower とするとき、式 (3) で $D = 1$ とすると、式 (4) が得られ、式 (4) から式 (5) を得ることができる。

$$TxPower = 10 \log_{10} \frac{P}{4\pi} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} RSSI &= TxPower - 10 \log_{10} D^2 \\ &= TxPower - 20 \log_{10} D \end{aligned} \quad (5)$$

式 (5) の 20 という定数は論理値であり、実際には場所により異なる値となることが知られている。定数 20 を RSSI 減衰定数 N とし、それぞれの場所に適した値にする必要がある。式 (5) を減衰定数 N とし、式 (6) に変形することにより距離 D が求められることが可能になる。

$$D = 10^{\frac{TxPower - RSSI}{N}} \quad (6)$$

D : 距離

RSSI: 計測した RSSI 値 (dBm)

TxPower: 100cm での RSSI 値

N : RSSI の減衰定数 (理論値 : 20)

RSSI の値から距離変換を行う際は式 (6) に従い計算を行い、RSSI 減衰定数 N は場所ごとに適した値を使用する。

3.2 TxPower の選出

TxPower はビーコンが発する信号の強度を示し、100 (cm) 離れた地点での RSSI を利用する。また、TxPower の選出は距離情報を取得するために行う。

本研究において、受信機は同じ環境下であり、8 方位、等間隔、送信機から 100 (cm) 離れた地点に受信機を円状に配置し、541,570 個の RSSI 値を取得した。取得した 100 (cm) 時の取得度数および正規分布を図 1 に示す。

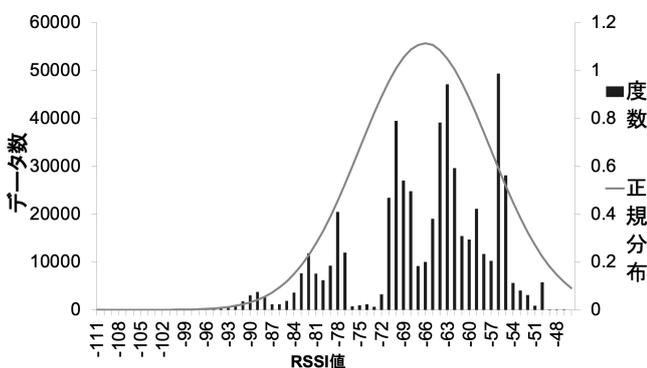


図 1 RSSI 値の取得度数

図 1 で示すヒストグラムでの RSSI 値の取得度は山形ではなく、凸凹な形である。100 (cm) 離れた地点、8 方位で観測したことから受信側ビーコンと送信側ビーコンの位置関係により取得する RSSI の強弱は異なることがわかる。そのことから、本研究での TxPower の選出として、ヒストグラムが示す最頻値の使用ではなく、正規分布から得られた母平均 $\mu = -66.04$ (dBm) を使用する。

提案方式

多点測位を行うとき、実測された RSSI 値から各送信機の RSSI 値の基準値の選出方法として (3.3) にて説明をする。また (3.3) にて得られた各送信機の RSSI の値の取得情報から配置された送信機のうち、座標の推定を行うにあたり、使用する送信機の手法として (3.4) で説明を行う。(3.4) で選出された送信機の座標から求めるべき受信機の座標算出の手法を (3.5) で説明する。

3.3 実測した RSSI の基準値の選出

本研究では座標推定を行うとき、受信機の座標を 5ヶ所の変更を行い、1ヶ所 10 分間の RSSI の値から座標推定を行う。

座標推定を行うとき、図 2 は 10 分の間に受信機が各送信機から受信した RSSI 値の取得度数を示したもののうち

の 1 つであり、縦軸は取得度数、横軸は RSSI 値である。

取得した RSSI 値から RSSI 値の密集した山を探索し、基準値の選出を行う。

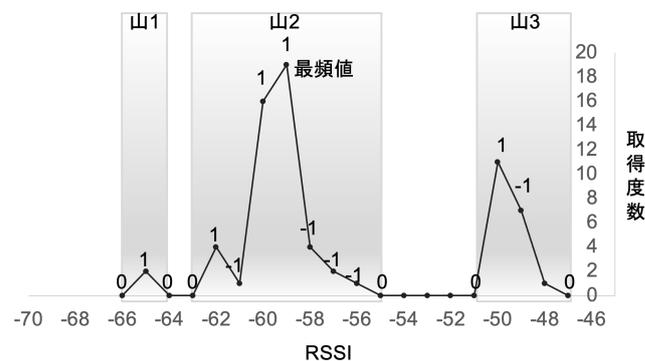


図 2 基準値の選出

図 2 の分布の折れ線グラフにおいて山の探索とは上に凸になるものであり、下記に示す条件を満たすものを RSSI 値の密集した山として捉える。

RSSI 値の取得度数が増加を示した場合に 1、減少を示した場合に -1、取得度数が 0 回である場合に 0 とする。その時、1 と 0 または -1 と 0 の組み合わせとなった場合、その地点を山の終端とし、最頻値を含む山の平均値を RSSI 値の基準値として扱う。

図 2 のように RSSI 値の密集した山を上記の条件で区切り、最頻値を含む山の平均値を選出する理由として、物体の特定において物体は移動するものであり、移動することにより各ビーコンでの RSSI 値の取得度は少なくなり、最頻値のみを用いることはできない。また平均値のみを用いる場合、極端な値が存在する場合に大きく影響を受けてしまう。そのことから、RSSI 値の密集した山を区切り、最頻値が存在する山を用いることにより、極端な値が採用されることなく、RSSI 値にはばらつきが存在することから平均値を用いることにより互いに代表値のデメリットを補えるからである。

3.4 多点測位による送信機を選択

本研究において、位置推定を行う際に使用する送信機を選択は以下の重み付けの手法で行う。

分数式において分母を全体の取得度数、分子を最頻値を含む山の取得度数とした除法の解、商を重み付けの結果とし、全体の取得度数に対する最頻値を含む山の取得度数の割合の高い送信機を多点測位を行う際、送信機として使用する。

図 3 のような重み付け結果となり、3 点測位を例とした場合、使用される送信機は (B : 重み付け結果 1.00) (D : 重み付け結果 0.95) (H : 重み付け結果 0.90) の 3 点となり、送信機として使用される。

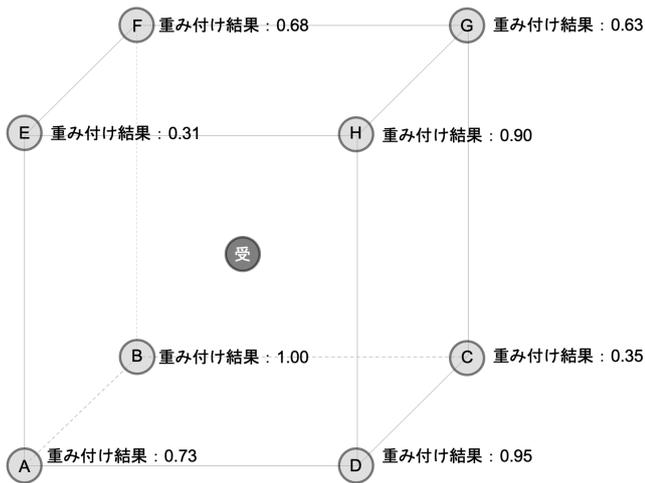


図 3 重み付け評価

3.5 位置推定の座標変換の手法

送信機の放出する電波が全方位に均等に放出される場合、RSSI 値から得られる距離 D を半径 r とする球の中心から、球面（球の表面）上のどの点までも、その距離 D は一定=半径 r となる。図 4、中心点 C から球面までの距離を r とすると、PC 間の距離は常に等しい。

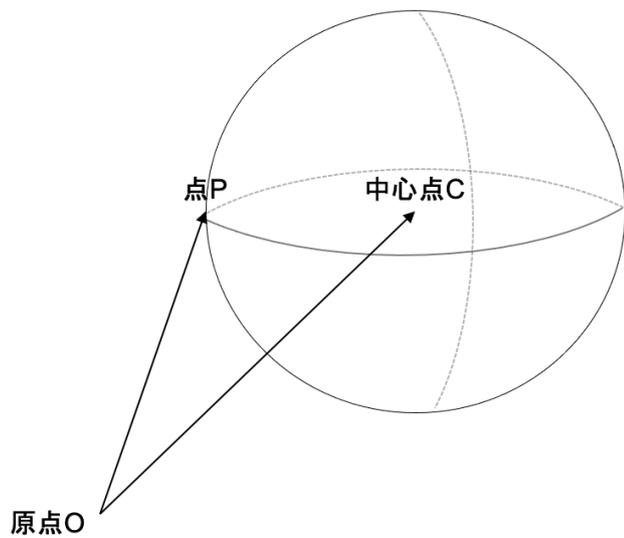


図 4 球面とその中心

そこで、球面上の点 P と中心点 C の位置ベクトルを使って、球面のベクトル方程式を式 (7) のように表すことができ、さらに点 P の座標 (x, y, z) 、点 C の座標を $C: (c_x, c_y, c_z)$ とすると、式 (8) を表すことができる。

$$|\vec{p} - \vec{c}| = r \quad (7)$$

$$|x - c_x, y - c_y, z - c_z| = r \quad (8)$$

また、式 (8) の両辺を 2 乗すると絶対値が外れ、球面の方程式 (9) を導くことができる。

$$(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 + (z - c_z)^2 = r^2 \quad (9)$$

図 5 では、空間座標中に球体が 2 つ存在し、それらが交わる時、その交わった面は円となることを示し、以下では各球からなる交線上にある共有座標の算出について説明する。

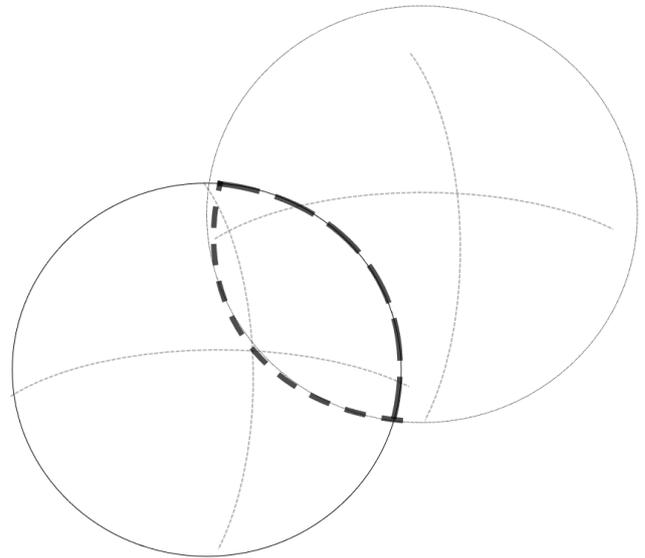


図 5 交球からなる交線

点 A を中心とする球の座標を $A: (a_x, a_y, a_z)$ 、半径 r_A をとし、点 B を中心とする球の座標を $B: (b_x, b_y, b_z)$ 、半径 r_B とする。このとき式 (9) で導いた球面の方程式に A, B 座標を代入することにより式 (10)、(11) が得られる。

$$(x - a_x)^2 + (y - a_y)^2 + (z - a_z)^2 = r_A^2 \quad (10)$$

$$(x - b_x)^2 + (y - b_y)^2 + (z - b_z)^2 = r_B^2 \quad (11)$$

式 (10)、(11) で得られた点 A, B を中心とした球体の方程式を連立方程式として解くことにより、2 つの球体からなる交線の方程式となり、式 (12) のように表せる。

$$(2a_x - 2b_x)x + (2a_y - 2b_y)y + (2a_z - 2b_z)z = r_b^2 - r_a^2 + (a_x^2 + a_y^2 + a_z^2) - (b_x^2 + b_y^2 + b_z^2) \quad (12)$$

座標変換を行う際は上記の流れ、式に従い計算を行い、全ての方程式を同時に成り立たせる未知数 (x, y, z) の値を連立方程式の解とし、座標変換を行う。

ユースケース・シナリオ

BLE を用いた屋内測位のユースケースとして工場や病院、オフィスなどで働く屋内従業者、屋内倉庫などにあるフォークリフトや屋内貨物、無人カートなどの位置推定に用いることが可能である。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、フォークリフトや屋内貨物、無人カートなどには RSSI 値の取得が可能である IoT デバイスの取付、IoT デバイスが周囲の BLE ビーコンから受信した RSSI 値をサーバへ送信し、サーバ上で座標の計算を行い、マップに反映されるといった一連の流れを繰り返すことにより位置推定は可能となる。貨物が隣接されている場合、貨物一つ一つの位置特定の精度を求めるには既存方式では誤差が大きく不向きであった、またマップに反映されるとき、誤差の大きい値を反映した場合、壁の中および隣の部屋など異なる場所に存在することとなりマップの用途を満たせないが提案方式を用いることにより最小誤差も小さく可能となる。

4. 実装と実験方法

実装

本研究では RSSI 値の送信機 8 台および受信機 1 台に ESP32 (ESP-WROOM-32) 使用し、受信機で取得した RSSI 値を含むデータを格納するため、MongoDB を用いた。

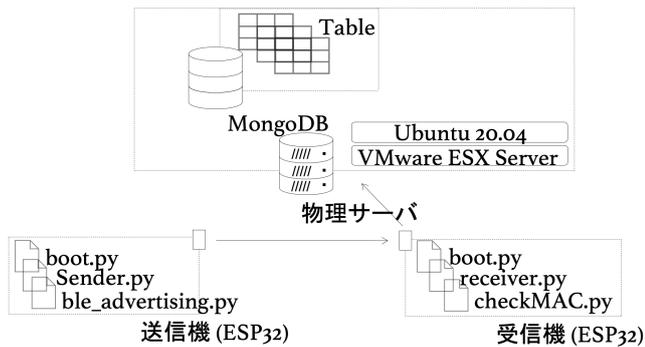


図 6 実装の環境

受信機は送信機を識別するため、送信機の MAC アドレスを checkMAC.py にて取得する。図 6, 送信機は受信機に対して BLE を放つため sender.py, ble.advertising.py を用い、受信機では受信時間、各 MAC アドレス、RSSI 値を MongoDB に送信するよう receiver.py をインポートされている。また物理サーバには OS を Ubuntu20.04 の仮想マシンを構築し、受信機で受信した RSSI 値を格納するため MongoDB をインストールした。

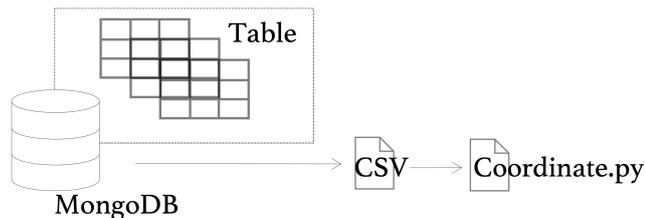


図 7 実装の環境 (2)

図 7, MongoDB に格納されたデータを CSV ファイルと

してエクスポートを行い、Coordinate.py にて座標変換を行った。また、Coordinate.py では各送信機から取得した RSSI 値を提案方式で説明した RSSI 値の基準値の選出、重み付けを行い選出された送信機が放出する RSSI 値から距離変換を行い、座標変換が行われている。

実験環境

本研究の実験は衛星信号が十分に届かない屋内であると定義し、実験を行なった。

RSSI 値の送信および受信を行うデバイスとして、ESP32 を使用する。図 8 に示す、一辺 200 (cm) の立方体を木材で作成し、各頂点に送信側 ESP32 の配置を行い、受信側 ESP32 は立方体内部に配置し、実験を行なった。

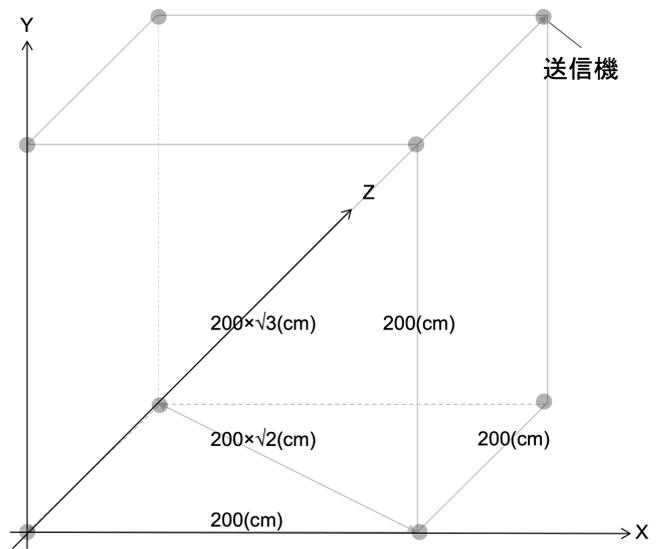


図 8 実験の環境

5. 評価と分析

評価および分析方法として、本研究で提案した座標推定の方式を以下の項目で比較および定量的評価を行う。

- 既存方式と提案方式のユークリッド距離の比較。
- 提案方式の個数変化の分析。

本研究での提案方式を定量評価および分析をするにあたり、ユークリッド距離を用い特定座標と推定座標との誤差で評価を行う [12]。

3次元空間上の2点 $A(x_a, y_a, z_a)$ と $B(x_b, y_b, z_b)$ の距離は3つの異なる方向の辺の長さはそれぞれ $|x_a - x_b|$, $|y_a - y_b|$, $|z_a - z_b|$ となる。よって直方体の対角線の長さを求める公式により2点 AB は式 (13) で求めることができる。

$$AB = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2} \quad (13)$$

提案方式を評価するため、本研究ではランダムに定め

た座標に受信機を設置し、BLE の RSSI 値を受信させた。1ヶ所 10分を5ヶ所行い座標変換を行った後、ユークリッド距離を用い誤差の算出を行った。

表 1 実験結果 (1)

	ユークリッド距離					平均
3点測位	71, 59, 50, 30, 95	61 (cm)				
4点測位	10, 33, 50, 30, 42	33 (cm)				
5点測位	10, 22, 50, 30, 42	31 (cm)				
6点測位	10, 22, 44, 30, 42	30 (cm)				
7点測位	10, 22, 44, 30, 36	28 (cm)				
8点測位	10, 22, 44, 14, 36	25 (cm)				

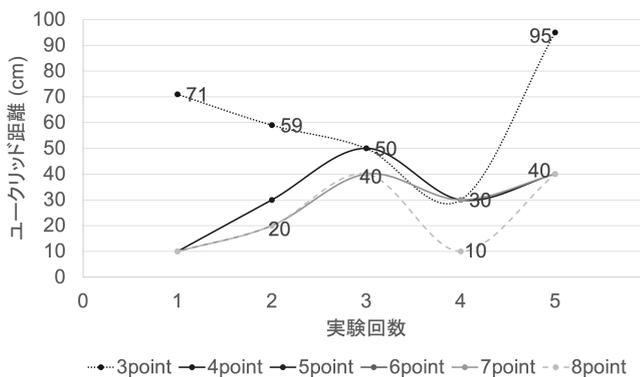


図 9 実験の結果 (2)

既存方式での三点測位では、ユークリッド距離にして最大誤差 150 (cm)、最小誤差 56 (cm) であることが示されている [5]。それに対し本研究での重み付け、また座標変換を用いた提案方式では、表 1 に示すように、ユークリッド距離にして最大誤差 95 (cm)、最小誤差 10 (cm) という結果となった。提案方式は既存方式より、最大誤差 36.7%、また最小誤差 82.1%の誤差の減少率を示し、精度の向上が明らかとなる結果となった。

図 9 は表 1 で示すユークリッド距離の誤差をグラフ化したものである。グラフを参照すると、送信機 3 台による測位を行い生じる誤差に対し他の台数による測位の誤差の方が誤差が小さくなる事がグラフからわかる。表 1 の各ユークリッド距離の平均を参照すると、誤差を最も減少させるのは 3 点測位から 4 点測位にした時であり、3 点測位での誤差 61 (cm) に対し 4 点測位では 33 (cm) となり、その差 28 (cm) であった。また、3 点測位から 4 点測位となった時が精度の改善幅が最も高い事がわかる。誤差は多点になるにつれ小さくなることを確認できるが、多点になるにつれ精度の改善幅は低下している。この事から最も有意的に誤差を減少させる事ができるのは 4 点測位であることがわかると共に、多点になるにつれ他の送信機による影響を受け、精度の改善幅が低下してしまう可能性があることを示せた。

また、多点になるにつれ誤差を減少させることができた要因として、3 点に比べ多点にすることにより信頼性のある RSSI 値の取得頻度を多くすることが可能になったことであると考える。

6. 議論

本研究の課題として屋内測位では、屋外に比べ障害物および遮蔽物が多く密集する空間であり、電波の減衰が厳しく、特定の RSSI 値の取得が困難であることから、基礎実験では、位置推定を行うにあたり、基準値となる値を取得するため約 50 万個の RSSI 値を集積し、ヒストグラムを用い基準値を定めた。しかし、各距離に対する RSSI 値の取得を行い、近似曲線を用いた距離変換方式や異なる代表値を試行し、誤差の比較を行い精度を測ることにより精度向上および方式を定めることが可能である。

また、実験では静止物体の位置推定を行い、1ヶ所 10分、約 530 個の RSSI 値を基に座標の推定を行うことを5ヶ所で行い、最小誤差 10 (cm) の結果を得ることができたが、動作し続ける物体の位置の推定を行うことは容易で無いと考える。動作する物体の座標推定を行うにあたり、RSSI 値の取得度数は動作速度に比例の関係を持ち、RSSI 値を十分に取得できないと考え、本研究における最低データ数の特定を行う必要があると共に動作し続ける物体に対し送信機の選定を行うことはデータ数が少なく信頼性のあるデータの取得が困難となり、最大誤差および最小誤差は大きくなることが考えられることから、動作物体の座標の推定を行う場合、RSSI 値のデータ数を補う動作速度に対応できる加速度センサを必要とする。

7. おわりに

本研究では、BLE を特徴とする近距離無線通信を用いた屋内測位を用いた屋内測位での位置推定の精度が低く、誤差が大きいことを課題としている。この課題を解決するため、各送信機に対し重み付けを行い、位置推定に使用する送信機の優先度を設け、測位箇所の増設による精度改善を行った。

既存方式での最小の誤差、ユークリッド距離にして 56 (cm) に対し、提案方式は 10 (cm) という結果となり、その差 46 (cm) の誤差を削減することができ、既存方式の最小の誤差に対し、誤差 82.1%の改善することができた。これによって、本研究の提案方式は近距離無線通信による屋内測位の精度改善を行うことが可能である。

参考文献

- [1] Zhu, N., Marais, J., Bétaille, D. and Berbineau, M.: GNSS Position Integrity in Urban Environments: A Review of Literature, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 19, No. 9, pp. 2762–2778 (online), DOI: 10.1109/TITS.2017.2766768 (2018).

- [2] 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 (online), DOI: 10.1109/WTS.2017.7943542 (2017).
- [3] Zolfaghari, A., Said, M. E., Youssef, M., Zhang, G., Liu, T. T., Cattivelli, F., Syllaios, Y. I., Khan, F., Fang, F. Q., Wang, J., Li, K.-Y. J., Liao, F. H.-F., Jin, D. S., Roussel, V., Lee, D.-U. and Hameed, F. M.: A multi-mode WPAN (Bluetooth, BLE, IEEE 802.15.4) SoC for low-power and IoT applications, *2017 Symposium on VLSI Circuits*, pp. C74–C75 (online), DOI: 10.23919/VLSIC.2017.8008554 (2017).
- [4] Ma, Z., Poslad, S., Hu, S. and Zhang, X.: A fast path matching algorithm for indoor positioning systems using magnetic field measurements, *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1109/PIMRC.2017.8292759 (2017).
- [5] 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).
- [6] Cengiz, K.: Comprehensive Analysis on Least-Squares Lateration for Indoor Positioning Systems, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 8, No. 4, pp. 2842–2856 (online), DOI: 10.1109/JIOT.2020.3020888 (2021).
- [7] Mounir, T. A., Mohamed, P. S., Cherif, B. and Amar, B.: Positioning system for emergency situation based on RSSI measurements for WSN, *2017 International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN)*, pp. 1–6 (online), DOI: 10.23919/PEMWN.2017.8308026 (2017).
- [8] Shao, H.-J., Zhang, X.-P. and Wang, Z.: Efficient Closed-Form Algorithms for AOA Based Self-Localization of Sensor Nodes Using Auxiliary Variables, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 62, No. 10, pp. 2580–2594 (online), DOI: 10.1109/TSP.2014.2314064 (2014).
- [9] Han, S.-J., Lee, S.-J., Lee, S.-H., Park, J.-J. and Park, S.-J.: Node Distribution-Based Localization for Large-scale Wireless Sensor Networks, *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol. 33, No. 9B, pp. 832–844 (2008).
- [10] Lee, H., Lee, S., Kim, Y. and Chong, H.: Grouping multi-duolateration localization using partial space information for indoor wireless sensor networks, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 55, No. 4, pp. 1950–1958 (online), DOI: 10.1109/TCE.2009.5373755 (2009).
- [11] 中井若菜, 川濱悠, 勝間亮ほか: 単位 RSSI 値の強弱の推定による位置推定精度の向上, 2017 年度 情報処理学会関西支部支部大会 講演論文集, Vol. 2017 (2017).
- [12] Dokmanic, I., Parhizkar, R., Ranieri, J. and Vetterli, M.: Euclidean Distance Matrices: Essential theory, algorithms, and applications, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 32, No. 6, pp. 12–30 (online), DOI: 10.1109/MSP.2015.2398954 (2015).