

加速度センサーを用いた BLE の 3 点測位の精度改善

秋山 佑太¹ 高木 優希² 串田 高幸¹

概要: 近年, IoT デバイスを使った位置測位が増加している. その中で主に使われているデバイスは GPS である. しかし, 屋内では GPS の信号が届かない場合がある. そこで GPS を使用せずに位置情報の特定が必要である. 本研究では ESP32 を使用し, BLE と加速度センサーで測位を行う. BLE の 3 点測位だけでは誤差が発生し, 正確な位置特定が困難である. また, 誤差があるだけでなく, 座標をマップに表示させた際に, 壁の中や障害物の上に表示されてしまうことがある. そこで, 歩数で距離を測定できる加速度センサーを使用して, BLE で取得した距離で 3 点測位を行い, 計算した座標を加速度センサーで修正し, 位置推定の精度改善を行う. 結果は 2 歩目までは従来の 3 点測位より, 60cm 以上誤差を修正することができた.

1. はじめに

背景

近年, IoT(Internet of Things) デバイスの普及が進み, 飲食店や公共施設, 一般的な家庭に IoT が使われ, 人々の生活を支えている [1]. IoT デバイスには WiFi や Bluetooth が搭載されており, それらの電波を利用してデバイス間やサーバにデータを送信することができる. 例として GPS(Global Positioning System) が有名である.

GPS は GPS 衛星を使った位置情報を特定するものである. まず, GPS を搭載し使用している端末の GPS 受信機が電波を受信する. 次に端末側の受信機は送信機から送られてきた信号が届くまでの時間に電波の速度を乗算し, 送信側の衛星と受信側の端末の距離を推定する. そして送信側の衛星の 4 台から取得した距離をもとに自分が使用している端末の現在位置を特定するものである. GPS は位置情報を手軽に取得できることで多くの車や端末で使われている. しかし地下通路やデパートの地下, 屋内の場所では GPS の信号が微弱になるため, 図 1 のように現在地が取得できないことや測位に時間がかかる場合がある. なお, 図 1 は, 複数階層の建造物内での位置の誤差について示しており, GPS は位置のずれが発生するが, BLE では屋内に配置されたビーコンを用いるため, 高精度な位置測位が可能である.

このように, 地下通路やデパートの地下, 屋内の場所で

正確に位置情報を取得できる技術が必要である. 屋内測位の例として, BLE を使ったビーコン測位や RFID タグを使った近接無線通信が挙げられる [2]. また, 位置情報を取得する方法やスマートフォンを使った加速度センサーで歩行者の歩数を推定して歩幅を計算し, 移動距離を算出できる [3]. その中でも BLE ビーコンと加速度センサーを使った方法は導入コストが低く, 消費電力も低いため, 屋内測位で使用されることが多い [4].

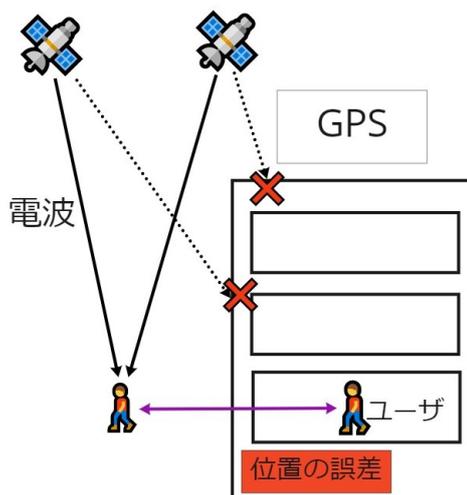


図 1 位置の誤差

加速度センサーは, 速度の変化を計測して加速度を計測して移動距離を推定するものである. BLE の測位方法としてビーコンを使った近接測位と 3 点測位が挙げられる [5]. 近接測位では 1 つのビーコンを用いて距離が近いビーコンを判別し, データをサーバに送信および分析をすることで

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

現在位置を取得する方法である。この方法では詳細な位置は取得できず、誤差 100cm の範囲しか取得できない。

一方 3 点測位では、まず、3 つ以上のビーコンを使用し、電波強度である RSSI をそれぞれ取得する。次に RSSI の値を距離に変換し、この距離を半径とする円を作成する。これらによって作成された 3 つの円の交点を計算することで座標として位置が求められる。3 点測位では、絶対値によって取得できるため、近接測位の電波強度のみで測位する方法よりも精度が高くなる。

課題

GPS では地下通路やデパートの地下、屋内といった電波が届かない場所では、正確に位置情報を取得することが難しい。そのため、図 1 のような電波が届きにくい場所では屋内測位技術を使用する必要がある。しかし、屋内測位技術では誤差が大きいという課題がある。

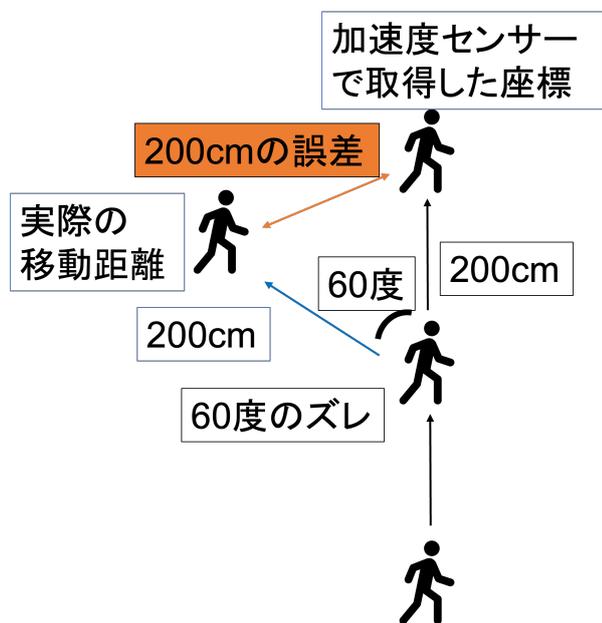


図 2 加速度センサーの誤差

図 2 のように正面に向かって真っすぐ歩いている状態から 60 度左にずれて移動した場合、加速度センサーは単一方向の距離のみ計算可能であるため、60 度左にずれて 200cm 進んだ場合、200cm の誤差が生じる [6]。

また、BLE を用いた測位手法のうち、絶対値で距離が求められる点から 3 点測位に焦点を当てる。3 点測位では、電波干渉の発生により誤差のばらつきが大きいという課題がある [7]。

BLE で位置を推定するには、3 つ以上のビーコンを使用し、絶対値として取得した距離を用いて座標を求める。求めた座標が正確ではなかった場合、実測値 (170,200) に対して、計測値 (152,148) で図 3 のようにマッピングされ、56cm 以上の誤差によって壁の中に表示されてしまう恐れがある。

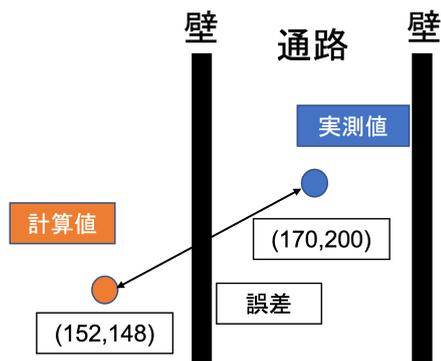


図 3 BLE の課題点

各章の概要

第 2 章では関連研究について述べる。第 3 章では提案するシステムについて述べる。第 4 章では提案したシステムの実装と実験方法について述べる。第 5 章では実験の評価と分析を述べる。第 6 章では提案したシステムの議論を述べる。第 7 章では本研究のまとめを行う。

2. 関連研究

関連研究では、本研究と類似した既存方法を 4 つ取り上げ、残された課題について述べる。

1 つ目に画像認識技術を使った方法がある。カメラによってキャプチャし、画像から距離を推定し、座標を導き出すというものである [8]。低コストで画像処理を行い、移動ロボットでラベル ID をつけて座標を検出し、低コストで測位を行うことができる。しかし、ラベル付けに制限がある。

2 つ目に超音波を用いた位置特定システムを挙げる [9]。従来の超音波では電波干渉によって、測定が難しい場合がある。しかし、超音波信号の角度制限と電波の干渉を最小限に抑えてロボットを使うことによって精度が向上している。しかし、ポーリングによって測定値を収集しているため、ポーリングプロセスが発生する。結果、データの収集率が悪くなり、ロボットの座標を絶えず結合する必要がある。

3 つ目に加速度センサー・ジャイロセンサー・地磁気センサーを用いた歩行者推測航法 (PDR) がある。PDR だけでは誤差が起きてしまうがアルゴリズムで誤差を減らす方法がある [10]。GPS が劣化した場合に、歩数の長さや方向を PDR で補正する必要がある。拡張カルマンフィルターと 2 軸のコンパスを使って提案された結合モデルで方位を補正している。しかし、磁気コンパスで予想可能な誤差を減らしているため、磁気擾乱が多い環境では正確な方位を取得できない。

4 つ目に BLE を用いた屋内測位システムがある。BLE の誤差を閾値 k と類似性メトリック関数を使い、精度改善を行っている。結果、推定位置の誤差は約 180cm である [11]。しかし、動的な受信による補正や、BLE ビーコン以外のデバイスを組み合わせた測位できない

3. 提案方式

本提案では、基礎実験として BLE を用いた 3 点測位と加速度センサーを用いて歩数を計測し、それぞれの RSSI 値と加速度センサーの取得した値を使用し、3 点測位をするために各ビーコンの基準値の決定と加速度センサーで歩数を計測するための閾値を採用した [12]。また、デバイス同士の基準値を決める必要と加速度センサーで歩数を計測するための閾値を決定するためにキャリブレーションとしてラーニングフェーズを設ける。

ラーニングフェーズ

ラーニングフェーズとしてユーザから身長を入力してもらい、加速度センサーで歩数を推定することによって歩幅を計算する。歩幅を求めることによって、移動距離が計算可能である。次にセンサー搭載デバイスは大学で実験を行うため、20 代の 173cm 男性によって移動されるものとする。次に各ビーコンの RSSI 値から距離を算出する必要がある。RSSI 値から距離を算出するためには、基準値として各ビーコンの 100cm の RSSI 値を決める必要がある。ラーニングフェーズでは各ビーコンの 100cm の RSSI の基準値を決める [13]。図 4 では 2 つのビーコンを使用し、ビーコンの間隔を 100cm にし、測定を行った結果である。

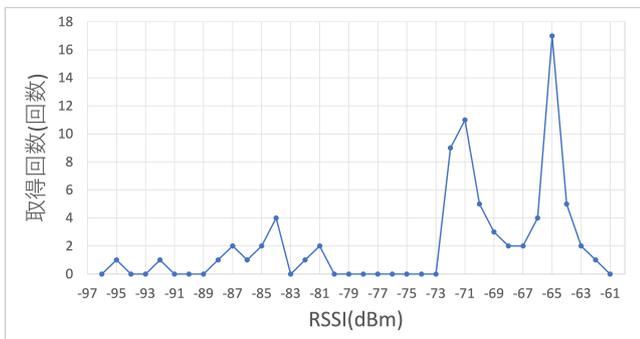


図 4 100cm の RSSI の値

基準値を決める際の取得回数は 100 回と決める。また、ビーコン 1 つ 1 つの精度を決めるため、取得した値が密集している山を探索する。図 4 を元に基準値を算出する方法を図 5 を用いて説明する。

図 4 の分布図から山がいくつあるのかを把握する。RSSI の値が増加した場合に 1、減少した場合に -1、変化がない場合は 0 として数値を置き換える。したがって、-1 と 0 あるいは -1 と 1 という組み合わせができた場合に、その地点を山の区切りとして判断する。図 5 の場合、山が 7 つあることになる [12]。

この山の数を基準にビーコン 1 つ 1 つの精度を決める。RSSI の基準値は最頻値で決める。

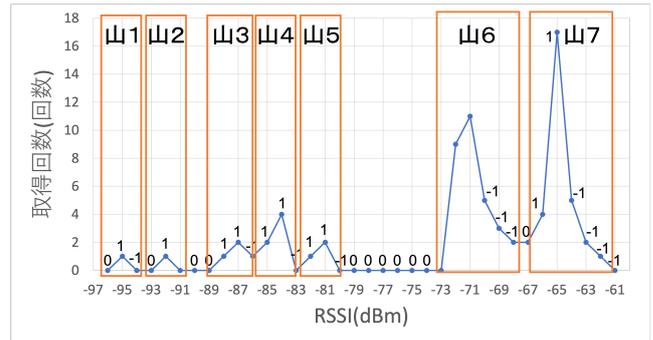


図 5 基準値の計算方法

基礎実験

基礎実験として、ビーコンの位置を 300cm 間隔で設置し、位置情報の測定を行った。RSSI の値から距離を求めるために、以下の式を用いた [13]。なお、使用した実験空間は障害物のない理想的な自由空間ではないため、伝搬指数 n は 6.5 に定めた [13]。

$$\text{距離} = 10^{(TxPower - RSSI)/(10 * n)}$$

$TxPower$ (dBm) は送信側の持つ電波強度である。RSSI(dBm) は受信した無線信号に存在する電力の測定値である。そのため、基礎実験で取得した 100cm での RSSI の最頻値を入力する。実際の位置はメジャーで測定した。実際の位置はデバイスの位置であり、計算で求められた距離は 3 つのビーコンを使った 3 点測位の位置である。この実験では 100 個のデータの最頻値を使用した。実験で座標の位置の誤差を測定した結果、誤差が 56cm の場合の実際の位置と計算によって得られた位置を表 1 に示す。

実際の位置	計算で求めた位置	ユークリッド距離
(170, 200)	(152, 148)	56

実際の位置と計算によって得られた位置を比較すると、従来の 3 点測位の場合 56cm より小さい誤差で測定することができない。

提案方式

BLE と加速度センサーを組み合わせた測位方法を提案する。本提案の条件として、ビーコンはすべて固定して行う。加速度センサーで判定した歩数の 1 歩と判定する閾値は $-1m/s^2$ から $-1.2m/s^2$ の範囲で行う。加速度センサーの初期位置を 0 としたときそこから上方向に振れば値はプラスになり、下方向に振れば値はマイナスになる。したがって、歩くときには下方向に腕を振るため、マイナスの値の範囲で取得する。500m 歩いた時の認識率が 95 % と最も高かったからである [12]。

提案方式のアルゴリズムや手法の説明を行う。まず、3 つのビーコンから RSSI を取得し、3 点測位を行う。これら

の説明を図を用いて説明を行う。なお、図6はOguejioforらの計算方法に従って橙色の点の座標を求めている [7].Oguejioforらは各ビーコンからの距離である d_a, d_b, d_c を以下の式で求めている [7].

$$\text{SphereA}; d_a^2 = (x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 \quad (3.0)$$

$$\text{SphereB}; d_b^2 = (x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 \quad (4.0)$$

$$\text{SphereC}; d_c^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 \quad (5.0)$$

3つの式は独立した非線形連立方式であり、2つの円の交点を求めることは可能である。しかし、これらを連立方程式として解くことはできないため、球体交点のラジカル面を求める方法を用いる。Oguejioforらはこれらの式を並び替えることで、2つの交点 x および y を以下の式で求めている [7].

$$v_a = \frac{(d_b^2 - d_c^2) - (x_b^2 - x_c^2) - (y_b^2 - y_c^2)}{2} \quad (11.0)$$

$$v_b = \frac{(d_b^2 - d_a^2) - (x_b^2 - x_a^2) - (y_b^2 - y_a^2)}{2} \quad (12.0)$$

$$y = \frac{v_b(x_c - x_b) - v_a(x_a - x_b)}{(y_a - y_b)(x_c - x_b) - (y_c - y_b)(x_a - x_b)} \quad (13.0)$$

$$x = \frac{v_a - y(y_c - y_b)}{(x_c - x_b)} \quad (14.0)$$

上の式を用いて x, y を求めることができ、座標として表示を行う [7].

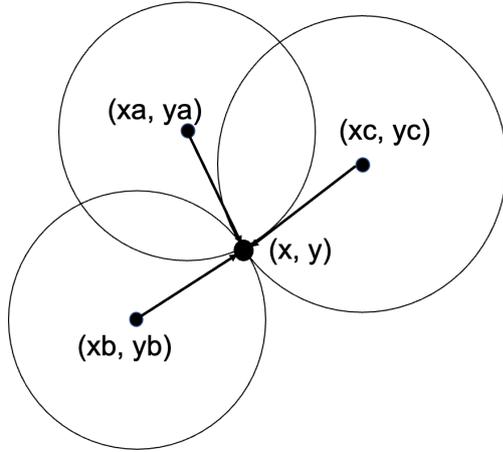


図6 3点測位の方法

また、本研究では加速度センサーで歩数を測定した1歩を半径とした円で3点測位で求めた座標を補正する。3つのビーコンを使用し、3点測位を行い、加速度センサーの1歩の半径に最も近い座標に補正を行う。図7は図6に加速度を追加した補正方法である。初期位置の座標は与えられるものとする。図7は通常の3点測位に加速度センサーで取得した1歩の半径を追加した図である。3点測位で求めた座標に加速度センサーの1歩とする半径に最も近い外円の座標に補正を行う。

図8は図9の状況下で補正した座標である。その座標を求めるときの位置関係を図7に表示した。CPが加速度の1

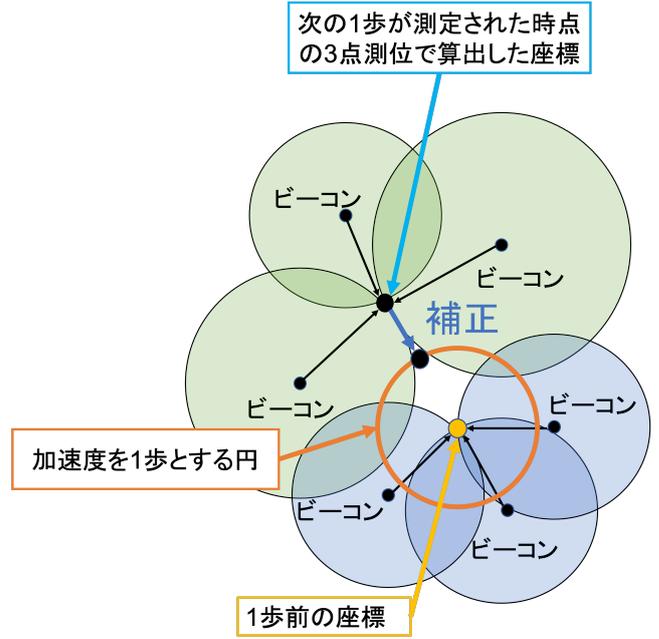


図7 提案の補正方法

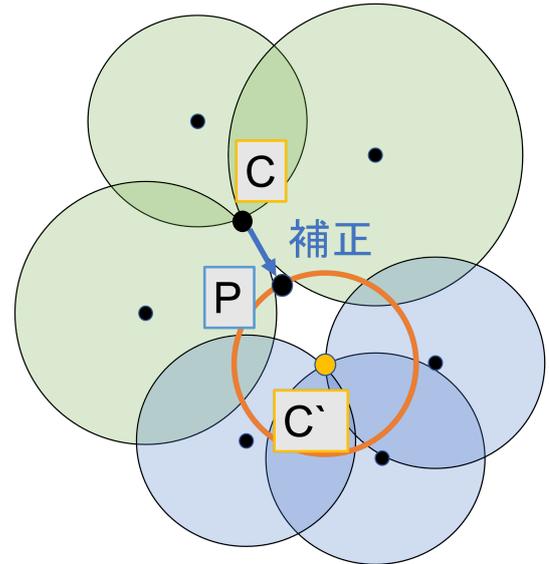


図8 座標の補正方法の位置関係

歩の円の半径の距離である。C'は加速度で1歩を計測する前の座標である。Cは加速度で1歩を計測したタイミングで計測されたRSSI値もとに3点測位して算出した座標である。CC'とCPの差分を算出して座標にする。したがって、CC'とCPの差分は各直線のCPxとCC'xに相似するため、CC'とCPのx差分を算出することができる。同様にCPyとCC'yも相似するため、CC'とCPのy差分を算出することができる。

この補正方法として以下の式と図9を使用する。Cは3点測位で算出した座標である。C'は加速度センサーの1歩前の座標である。PはCから加速度センサーで1歩を半径とする円のCとC'を直線で結んだときに交わる座標である。

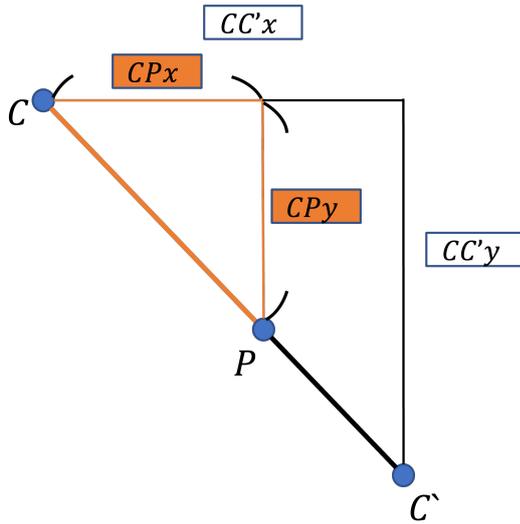


図 9 座標の補正方法

三点測位で算出した座標を $C(C_x, C_y)$, 1 歩前の座標を $C'(C'_x, C'_y)$ とする.

$$CC' = \sqrt{(C_x - C'_x)^2 + (C_y - C'_y)^2} \quad (1)$$

$$CP = |CC' - r| \quad (2)$$

ここでの r は加速度センサーで測定した 1 歩の半径の距離である. 相似の関係にあるため

$$CP_x : CC'_x = CP : CC' \quad (3)$$

に変形できる

$$CP_x = \frac{CC'_x * CP}{CC'} \quad (4)$$

同様に

$$CP_y = \frac{CC'_y * CP}{CC'} \quad (5)$$

これらの数式を用いることで x と y を求めることができる.

RSSI から取得される値は図 10 のような形式で name と rssi と timekey が取得される. name は各ビーコンの ID であり, name で各ビーコンを識別することができる. 距離計算で name を識別し, rssi の値を使用して距離に変換し, 3 点測位を行う.

```
_id: ObjectId("6194bb72b44383b02dc32e32")
timekey: "2021/11/17 17:21:05"
data: Object
  name: "BLE2"
  addr: "622739346239376564363034623627"
  rssi: -59
```

図 10 RSSI で使用するデータ

距離計算では図 11 の過程を行う. 下から加速度センサーのデータを取得, RSSI のデータを取得を行う. 次に加速度

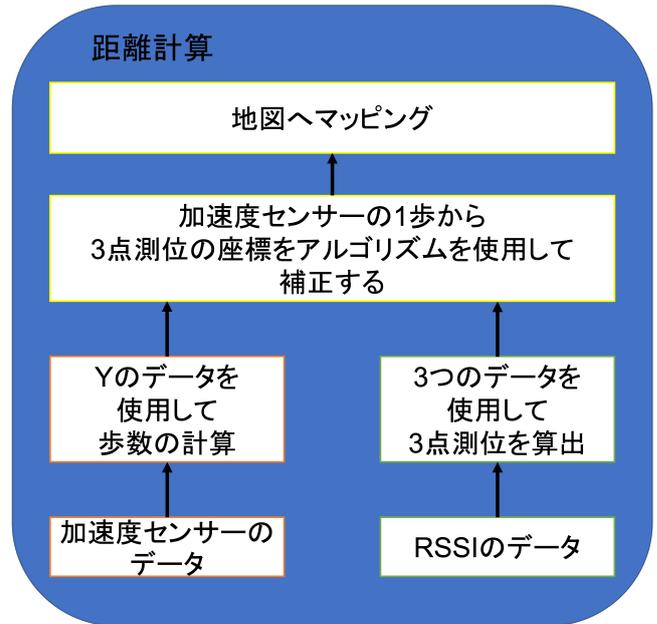


図 11 距離計算の処理

センサーから取得した y データと前期で使用した認識率 95 % の閾値をもとに歩数の計算を行う [12]. また, 図 6 の計算式を使用して 3 つのビーコンの RSSI 値をもとに 3 点測位で座標を算出する. 次に図 9 のアルゴリズムを使用して 3 点測位の座標を加速度センサーで補正を行う. その後, 地図へマッピングを行う.

ユースケース・シナリオ

本研究のユースケースは, GPS が届かないような屋内で, BLE ビーコンが設置されている状況下であり, 地下通路やデパートの地下, 展示会やリアル脱出ゲームといった, リアルタイムで正確な位置情報が必要な場合を想定している. GPS では展示会やリアル脱出ゲームのようなルートを表示する場合に, 正確な位置情報を表示できず, 正規のルートで動いているか把握することが困難になってしまう. また, BLE の RSSI を使った 3 点測位だけでは, 図 12 のように青の点線が実際の歩いた経路で赤の線が計測した経路である. 赤い線のように遅延時間や電波干渉によってマップから出てしまうような誤差が発生してしまうため, 正確な位置をリアルタイムで取得できない.

そこで本提案を使用することによってユーザは機器を持って歩いてもらうことによって, 壁や障害物に座標がかぶることなく, マップに自動反映され, 位置を確認できるようになる.

4. 実装と実験方法

実装

本研究では BLE ビーコンと IoT デバイスと加速度センサーを使用した. IoT デバイスと BLE ビーコンはすべて ESP32 を使用した. BLE ビーコンは 4 台, IoT デバイスに

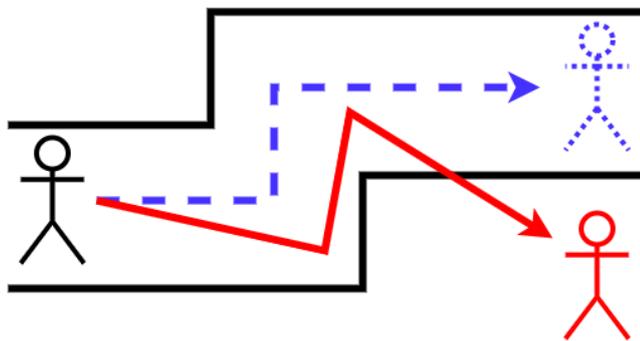


図 12 測定位置の誤差

加速度センサーを装着したものと RSSI を取得する IoT デバイスを各 1 台ずつ使用し、加速度センサーは BMX055 を使用した。各デバイスから取得したデータを格納する必要があるため、データサーバとして mongoDB を用いた。なお、mongoDB を構築した仮想マシンの OS は Ubuntu20.04 を使用している。サーバソフトウェアとして Flask を使用した。使用言語は ESP32 では micropython を使用し、各サーバでは python を使用した。まず、各ビーコンの RSSI の 100cm の基準値を決める必要がある。そこで前期使用したシステムを使い、ビーコンごとに RSSI 値の基準値を決め、各データベースに格納する [12]。閾値の取得方法も前期の研究同様に行う。

システム全体の構成図を図 13 に示す。図の IoT デバイスでは搭載されているセンサーから取得された加速度の値と BLE から取得した RSSI 値を web サーバに送信して格納している。その後、格納したデータを各アルゴリズムを使用してマップに反映している。この反映したマップをもとにユーザが確認し、視覚的に位置を確認することができる。

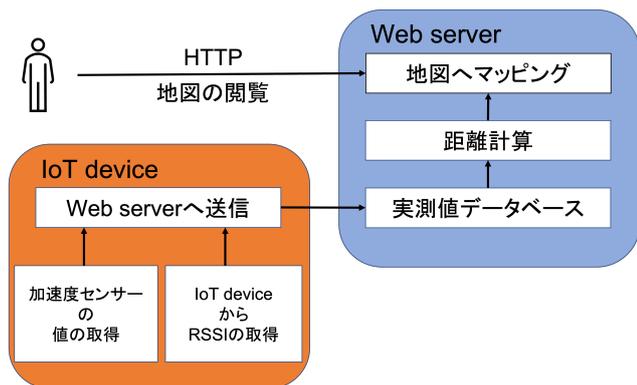


図 13 システムアーキテクチャ図

IoT device で取得される加速度センサーの値は図 14 のような形式で x, y, z のデータと timekey が取得される。この中で y のデータを距離計算の中で使用する [12]。

次に図 15 は図 13 で示したシステムアーキテクチャをもとに実装するソフトウェアである。各デバイスからデータを送信して保存するために、mongoDB をデータベースとして採用した。RSSI は送信側から発信された電波を受信側

```
_id: ObjectId("6194bbe8b44383b02dc32ebc")
timekey: "2021/11/17 17:23:03"
data: Object
  x: 0.40866
  z: -0.42238
  y: -0.61054
```

図 14 加速度センサーで取得できるデータ

の ESP32 が受信し、電波強度を推定し RSSI 値を取得する。加速度センサーは x, y, z のデータの中から y のデータを使い、歩数を計測する。RSSI をデータベースに格納する際に、各ビーコンごとに保存先を変更し、mongoDB の rssidata1, rssidata2, rssidata3 に分けて送信し格納する。加速度センサーのデータは 1 種類しかないため、mongoDB の accldata に送信し格納する。

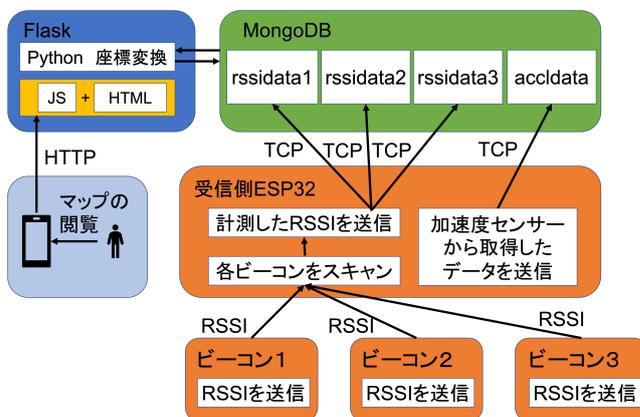


図 15 ソフトウェアの実装

図 16 は図 15 で示したソフトウェアをもとに実装するサーバソフトウェアである。MongoDB の各データベースは必要な数だけ配置されているものとする。web アプリケーションとして Python のフレームワークである Flask を使用して、web ブラウザ上のマップに算出した座標をプロットする。座標のプロットのプロセスは HTML5 と Flask と JS で実行される。

web に表示される画像として図 17 のような状態で表示する。

実験環境

本研究の実験では東京工科大学の研究棟 A909 で行い、GPS が届かない場所と定義し、実験をした。RSSI を取得するために、送受信するデバイスとして ESP32 を使用する。図 18 は実験した環境の図である。研究棟 A909 は人がいない環境で障害物として高さ 70cm の机と椅子が複数設置されている状態で行った。3つの ESP32 を固定するために高さ 70cm の机を使用した。

3点測位するために BLE ビーコンを縦横 300cm の正方

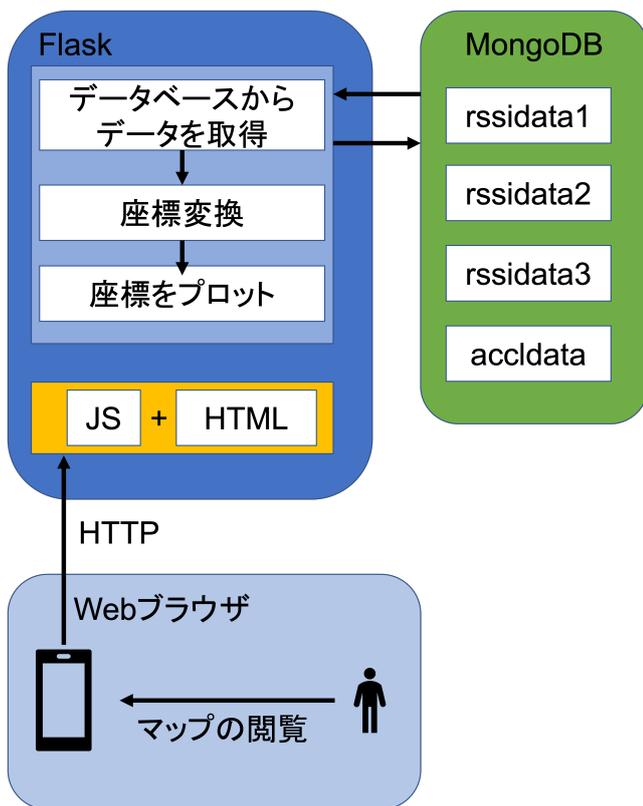


図 16 サーバのソフトウェア実装

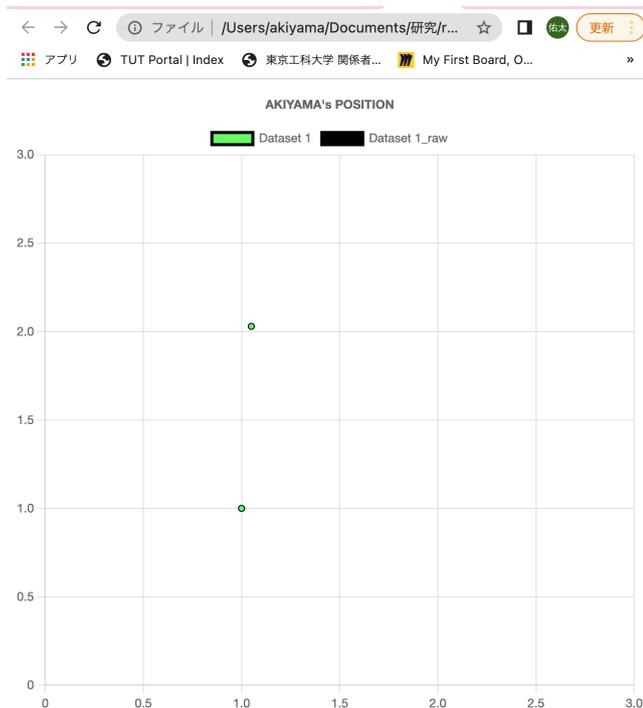


図 17 web ブラウザの表示

形で設置した。300cm の理由としては ESP32 の RSSI の値が正しく測定できる最大の距離が 300cm であることが基礎実験でわかっているため、最大限使用できる 300cm 間隔で設置をした。座標の数値 1 ごとに 100cm と定義した。歩く方向としては (0, 0) から (3, 3) に向かって歩く。

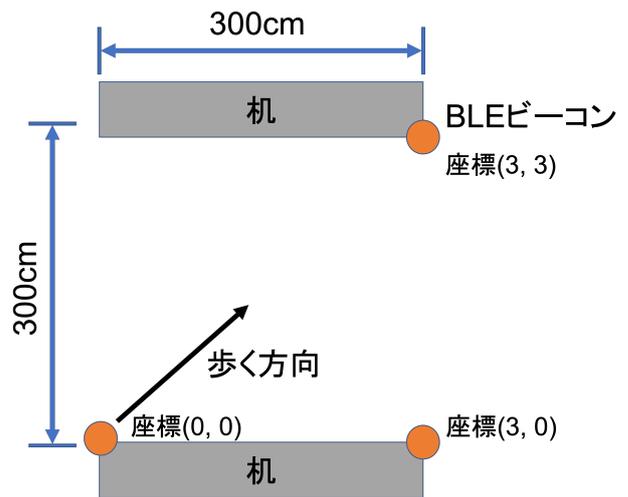


図 18 実験環境

実験結果

図 19 は実験を行った結果である。加速度センサーの歩数と RSSI の 3 点測位で同期できてマップにプロットできた座標は 1 つだけだった。原因としては ESP32 の性能上、加速度センサーで算出する歩数は連続で取得でき、データベースへ格納できるが、連続で取得できる上限があり、150 以上のデータを格納することができない。したがって、加速度センサーで歩数を計測できる時間が 10 秒になってしまう。

次に BLE で取得する RSSI は 1 度に複数のビーコンから RSSI を取得できない。したがって、1 つずつ取得する必要があるため、3 つのビーコンが揃うタイミングが不規則になってしまう。例えば、BLE2 や BLE3 が取得できず、BLE1 のみ連続して取得することが挙げられる。また、取得できない時間が 8 秒以上続いてしまうことが起きる。このような状況が 10 秒以内に起きてしまうため、10 秒以内で 3 点測位ができる回数が最大で 1 回、2 回程度になってしまう。このため、一度の実験で得られる座標が 1 つになった。

図 19 の実験結果としてメジャーで測った座標は (0.5, 0.5) で 3 点測位の座標は (1.7, 1.3) で 3 点測位を加速度センサーで補正した座標は (0.5, 0.4) であった。

図 19 は同じ環境で実験を行った結果である。実験結果としてメジャーで測った座標は、1 歩目 (0.5, 0.5)、2 歩目 (1.0, 1.0)、3 歩目 (1.5, 1.5) であった。

3 点測位の座標は、1 歩目 (1.9, 0.8)、2 歩目 (1.4, 1.0)、3 歩目 (1.4, 1.0) であった。3 点測位を加速度センサーで補正した座標は、1 歩目 (0.6, 0.26)、2 歩目 (0.8, 0.6)、3 歩目 (1.3, 1.0) であった。

3 点測位の座標の 2 歩目と 3 歩目が同じ座標の理由として、加速度センサーで 1 歩を計測したタイミングで 3 点測位の座標が取得できていなかったのが原因である。

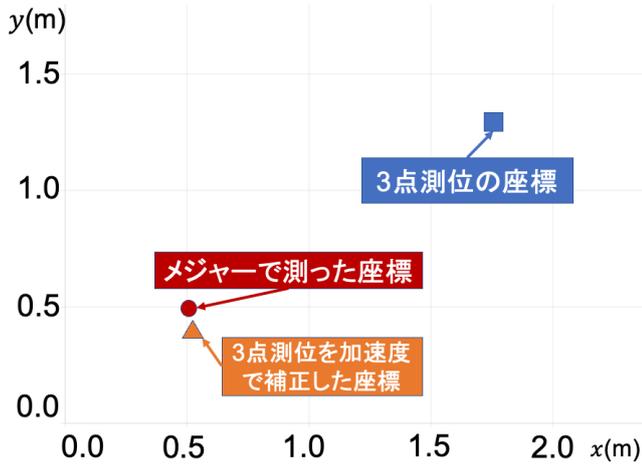


図 19 実験による 1 歩だけの補正結果

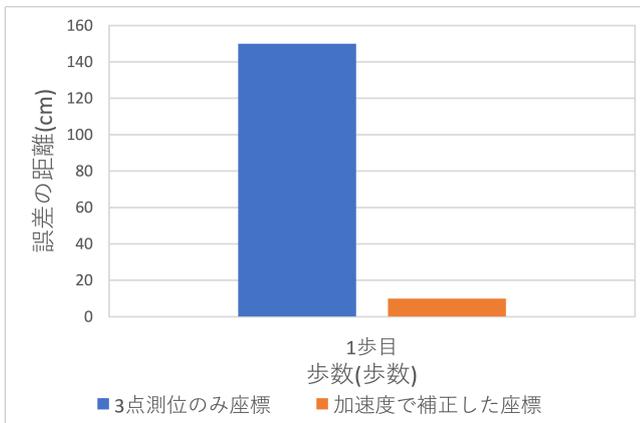


図 20 実験による 1 歩の補正結果

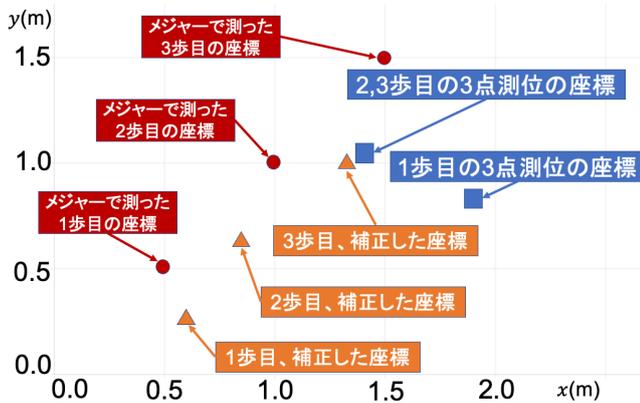


図 21 実験による 3 歩の補正結果

5. 評価と分析

3点測位に加速度センサーで補正をすることによって、精度改善を行った。図 19 の実験結果では、図 20 のような誤差の結果になった。縦軸は誤差の距離を示している。横軸は歩数を示している。この実験は 1 歩だけ計測した場合の誤差の結果である。この場合、(0, 0) から歩き始めているため、誤差が蓄積しにくい。したがって、3 点測位の座標の向きと動いた方向が同じ、または近い値だと 1 歩目は誤差が

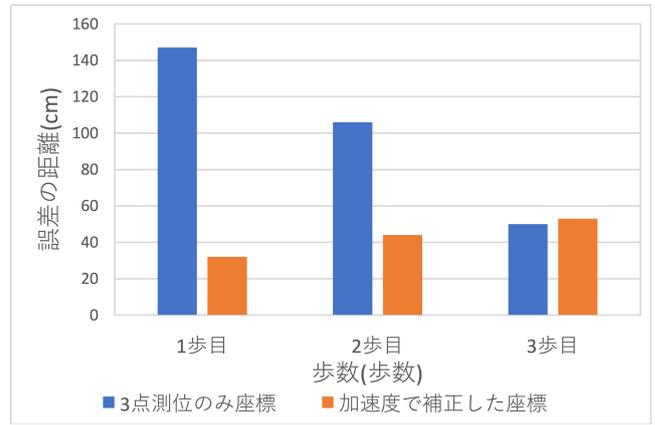


図 22 実験による 3 歩の補正結果

少なくなる。

次に図 21 の実験結果では、図 22 のような誤差の結果になった。縦軸は誤差の距離を示している。横軸は歩数を示している。3 歩計測した場合の誤差の結果である。1, 2 歩目は 3 点測位のみ座標より誤差が小さい。しかし、3 歩目では補正している方が誤差が大きい。そして、1 歩だけの実験より 1 歩目の誤差が大きい。また、加速度センサーで補正した座標の誤差は蓄積している。したがって、1 歩目の誤差が大きくなると 2 歩目からの誤差が蓄積することがわかる。

上記の分析により、加速度センサーで補正した場合は 1 歩目がずれてしまった場合に誤差が蓄積する。しかし、3 歩の実験の場合、3 つ目の 3 点測位のみ座標は 2 つ目と同じ座標である。そのため、3 歩目の座標は信頼性が低い。したがって、3 歩目は加速度センサーで補正する必要がないと実験結果からわかる。

6. 議論

本研究の提案における加速度センサーを用いた BLE の 3 点測位の精度改善という観点では、歩数が増えていくほど、誤差が大きくなるため、改善する必要がある。これは、加速度センサーの特徴であり、問題点である。課題で述べているように、加速度センサーは横に動いてしまった場合に、誤差が蓄積する。今回その蓄積誤差を BLE の 3 点測位によって方向を指定し、誤差を改善する提案を行なった。しかし、蓄積誤差が修正できていない結果となった。しかし、1 歩目の誤差のみに焦点を当てた場合、平均 100cm 以上誤差を改善している。したがって、進む方向を修正できれば、より誤差を軽減できる。地磁気センサーを使うことによって向きの補正を行うことができる。

また、今回 3 歩までしか計測できていないため、4 歩目以上のデータが取れていない。原因としてメモリ不足である。改善する方法としては、ESP32 に別のメモリを追加することである。メモリを追加することによって今まで以上のデータを保存できるようになるため、10 秒以上実験を行う事が可能である。搭載するメモリとして EEPROM を想

定している。

また、3点測位の式は3つの円の交点の座標を算出するため、中央に座標が寄る特徴がある。座標が中央によってしまうと補正する座標も中央に寄るため、3点測位ではなく、多点測位に修正する必要がある。

7. おわりに

本研究では、従来のBLEの3点測位に加速度センサーで補正を行うことで、歩いたときの補正が可能となった。提案方式として従来のBLEの3点測位に加速度センサーで歩数を計測し、歩幅の距離に座標を補正することによって精度改善を行った。提案システムの実装後、300cmの四角形の角にビーコンを設置して3点測位を行い、加速度センサーで歩数を計測して3点測位を補正し、実験を行った。結果として2歩目までは従来の3点測位より60cm以上の精度改善ができた。

参考文献

- [1] Ensworth, J. F. and Reynolds, M. S.: BLE-backscatter: Ultralow-power IoT nodes compatible with Bluetooth 4.0 low energy (BLE) smartphones and tablets, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 65, No. 9, pp. 3360–3368 (2017).
- [2] Deng, Z., Yu, Y., Yuan, X., Wan, N. and Yang, L.: Situation and development tendency of indoor positioning, *China Communications*, Vol. 10, No. 3, pp. 42–55 (2013).
- [3] Yasir, M., Ho, S.-W. and Vellambi, B. N.: Indoor positioning system using visible light and accelerometer, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 32, No. 19, pp. 3306–3316 (2014).
- [4] Zolfaghari, A., El Said, M., Youssef, M., Zhang, G., Liu, T. T., Cattivelli, F., Syllaios, Y. I., Khan, F., Fang, F. Q., Wang, J. et al.: A multi-mode WPAN (Bluetooth, BLE, IEEE 802.15.4) SoC for low-power and IoT applications, *2017 Symposium on VLSI Circuits*, IEEE, pp. C74–C75 (2017).
- [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)*, IEEE, pp. 92–95 (2015).
- [6] Lee, M. S., Ju, H. and Park, C. G.: Map assisted PDR/Wi-Fi fusion for indoor positioning using smartphone, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 15, No. 2, p. 627 (2017).
- [7] Oguejiofor, O., Aniedu, A., Ejiofor, H. and Okolibe, A.: Trilateration based localization algorithm for wireless sensor network, *International Journal of Science and Modern Engineering (IJISME)*, Vol. 1, No. 10, pp. 2319–6386 (2013).
- [8] Maxwell Donelan, J., Kram, R. and Arthur D, K.: Mechanical and metabolic determinants of the preferred step width in human walking, *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, Vol. 268, No. 1480, pp. 1985–1992 (2001).
- [9] Hsu, C.-C., Chen, H.-C. and Lai, C.-Y.: An improved ultrasonic-based localization using reflection method, *2009 International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, IEEE, pp. 437–440 (2009).
- [10] Chen, W., Chen, R., Chen, Y., Kuusniemi, H. and Wang, J.: An effective pedestrian dead reckoning algorithm using a unified heading error model, *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, IEEE, pp. 340–347 (2010).
- [11] 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).
- [12] 秋山 佑太, 高木 優希, 串田高幸: 加速度センサーを用いたBLEの3点測位の精度改善, 技術報告, クラウド・分散システム研究室, CDSL-TR-054 (2021).
- [13] 太田 康平, 串田 高幸: BLE ビーコンを用いた移動型IoTデバイスの位置情報の精度改善, 技術報告, クラウド・分散システム研究室, CDSL-TR-030 (2021).