Vol.2022-DPS-190 No.9
Vol.2022-CSEC-96 No.9
2022/3/10

加速度センサーの1歩判定を用いたBLEによる3点測位の精度改善

秋山 佑太[1,a)]　高木 優希[2,b)]　串田 高幸[1,c)]

概要：屋内における位置測位の 1 つに BLE を用いた手法がある．実際の位置と計算した位置の誤差が大きい場合, 計算した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ることがあるため, 誤差を削減する必要がある．本研究は誤差の削減のため, BLE による 3 点測位と加速度センサーを組み合わせて位置測位を行う．初期位置はあらかじめ決定されているものとし, 閾値を用いて加速度から歩数の計算を行い, 移動距離を求める．BLE ビーコン局から得られた RSSI を距離に変換し 3 点測位を行う．提案手法は加速度センサーで 1 歩を判定したタイミングで, BLE による 3 点測位の座標と 1 つ前の座標を直線で結び, 移動距離を半径とする円との交点を求め, 座標を補正する．なお, 加速度センサーを用いた位置決定は BLE を用いた 3 点測位よりも誤差が小さいため, 提案手法では加速度センサーを基準に位置決定を行う．しかし, 進行方向は加速度センサーのみでは判断できないため, BLE を用いた 3 点測位をもとに判断する．初期位置から平均 150cm 移動する実験を 14 回行った結果, 巻き尺で測定した位置との誤差は BLE による 3 点測位では平均 145cm であり, 加速度センサーで補正すると平均 85cm であった．したがって, 本提案は BLE のみを用いた 3 点測位と比較して誤差を 52.8 %削減できた．

1. はじめに

背景

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 が使用され, 人々の生活を支えている [1]. IoT デバイスには Wi-Fi や Bluetooth が搭載されていることが多く, それらの電波を利用したビーコン測位や RFID タグを使った近接無線通信が挙げられる [2]. Bluetooth Low Energy(BLE) は低消費電力のために小型バッテリーで動作し, 低コストでもあるため IoT の屋内測位で使用される [3]. BLE の測位は電波強度である RSSI を用いて 3 点測位や多点測位で座標を計算し位置を推定する．地下通路やデパートの地下, 屋内で使用される．

課題

屋内測位で使用される BLE による 3 点測位の問題点は, 計算される位置の誤差が大きいことである [4]. BLE を用いた 3 点測位の誤差は 180cm 程度発生する [5].

[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
〒 192–0982 東京都八王子市片倉町 1404-1
[a)] c011800602@edu.teu.ac.jp
[b)] g21210300d@edu.teu.ac.jp
[c)] kushida@acm.org

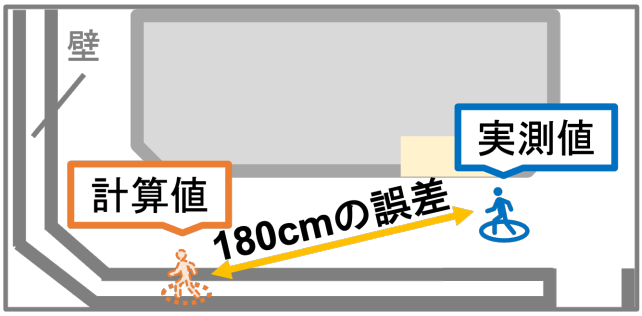


図 1　位置の誤差

屋内測位の誤差が大きい原因として, BLE は 2.4GHz 帯を使っているため, 机や椅子といった障害物によって電波が反射・吸収され, 正確な位置が決定できない．また, 各 BLE ビーコン局で取得する電波強度は設置している場所によって異なる．電波強度は RSSI(Received Signal Strength Indicator) で表され, RSSI から実際の距離に変換することで座標の計算が可能である．ここで, 全て同じ変換式を用いて距離計算を行った場合, 各 BLE ビーコン局によって電波干渉の影響が異なるため, 各 BLE ビーコン局ごとに誤差ができる．したがって各 BLE ビーコン局の配置によって受信機器に届く電波の減衰傾向が異なるため, 3 点測位を行うと正確な位置測位ができない．

屋内測位をマップ表示に用い, 180cm 以上の大きい誤差

© 2022 Information Processing Society of Japan

が発生した場合を図 1 に示す. 図 1 のように実際の位置との誤差が大きい場合, 計算した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る. 壁の中や障害物の上に表示された場合, 正確な位置を推定できない.

2. 関連研究

関連研究では, 本研究と類似した既存方法を 3 つ取り上げ, 残された課題について述べる.

１つ目に BLE の誤差を閾値と類似性メトリック関数を用いた精度改善が報告されている [5]. 実験の結果, 推定位置の誤差は約 180cm であった. しかし, 動的な受信による補正や, BLE ビーコン局以外のデバイスを組み合わせた測位できないため, 他手法と組み合わせた精度改善が必要である.

２つ目に BLE の RSSI のランク付けに基づいたフィンガープリント手法が報告されている [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 RSSI のランク付けを対応づけている. 実験は, 平均測位誤差を 87cm に抑えられている. しかし, 位置の測定対象が移動してた場合, 電波強度が著しく変化するため精度良く追跡する方法を構築する必要がある.

３つ目に 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研究が報告されている [7]. 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, 位置の近接推定が最大 40 % 改善された. 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.

3. 提案方式

提案手法は加速度センサーで 1 歩を判定したタイミングで, BLE による 3 点測位の座標と１つ前の座標を直線で結び, 移動距離を半径とする円との交点を求め, 座標を補正する. なお, 加速度センサーを用いた位置決定は BLE を用いた 3 点測位よりも誤差が小さいため, 提案手法では加速度センサーを基準に位置決定を行う. しかし, 進行方向は加速度センサーのみでは判断できないため, BLE を用いた 3 点測位をもとに判断する. 本提案では, 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. 基礎実験として各 BLE ビーコン局の RSSI と加速度センサーの取得した値を使用している. 3 点測位の前処理として各 BLE ビーコン局の基準値を決定し, 加速度センサーで歩数を計測するための閾値も定義した. これをラーニングフェーズとする.

基礎実験

誤差の原因を分析するため, 基礎実験では加速度センサーで計算された歩数の認識率を推定した. また, BLE を用いた 3 点測位で計算した位置と実際の位置の比較を行った.

加速度センサーの基礎実験は 8 人に対し, 加速度センサーを搭載したデバイスを装着させて実施した. 加速度センサーは Z 軸を下側に向けて, 半円を描くように X 軸を前後に振って行う. 加速度センサーの X 軸と Y 軸は歩数として相関がなかったため, Z 軸のデータを使用する. 実験参加者の身長は平均 170cm であった. 歩数を計算するための閾値は, 500cm の距離を歩行した際に加速度センサーが取得した加速度の値をもとにしている. 実験参加者 8 人が 500cm 歩いた際の歩数は, 7 歩が 6 人で 8 歩が 2 人であった. 加速度から歩数を決定する場合, 1 歩判定するための閾値が必要となる. 閾値は, 実際の歩数との差が最も小さい値を採用した. 実験結果から, 手を振り下げたタイミングの Z 軸の値 $-1.14m/s^2$ を閾値とした. Z 軸の値の閾値を $-1.14m/s^2$ とした場合, 実験参加者 8 人の合計歩数である 59 歩中の誤差は 1 歩であり, 認識率は 98 %あることがわかった.

BLE を用いた 3 点測位の基礎実験として, BLE ビーコン局の位置を 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, 式 (1) を用いた [8]. なお, 使用した実験環境は机や椅子があり, 電波が障害物に吸収され減衰しながら伝搬する空間であるため, 伝搬指数 n は 6.5 に定めた [8].

$$\text{距離} = 10^{(TxPower-RSSI)/(10*n)} \quad (1)$$

TxPower(dBm) は送信する BLE ビーコン局の電波出力の強さである. RSSI(dBm) は受信した電波強度の測定値である. 各 BLE ビーコン局の電波強度は異なるため, 1 つ 1 つ異なる基準とする値が必要である. そのため, 基礎実験で取得した 100cm での RSSI の最頻値を採用し, これを基準値とする. 実際の位置は巻き尺で測定し, 3 点測位で求めた位置と比較する. IoT デバイスの位置を実際の位置とし, 計算で求めた位置を 3 点測位で計算した位置とする. 基礎実験では 5 分間に 75 個の RSSI を収集して最頻値を求めた. 実験結果は, 少なくとも 101cm の誤差があることがわかった.

ラーニングフェーズ

ラーニングフェーズでは各 BLE ビーコン局の基準値の決定と歩いた距離から歩数を割って歩幅を求める. ユーザの身長はあらかじめわかっているものとし, 歩数と歩幅をかけることによって移動距離が計算可能である. 次に加速度センサーの基準値は実験参加者のデータを元に決める. 各 BLE ビーコン局の基準値を決定するには各 BLE ビーコン局の RSSI から距離を計算する必要がある. 本提案では各 BLE ビーコン局における 100cm の RSSI を基準値とすることで, RSSI から距離に変換している. ラーニングフェーズでは各 BLE ビーコン局の 100cm の RSSI の基準値を決める [8]. 図 2 では 2 つの BLE ビーコン局を使用し,

© 2022 Information Processing Society of Japan

BLE ビーコン局の間隔を 100cm にし, 測定を行った結果である.

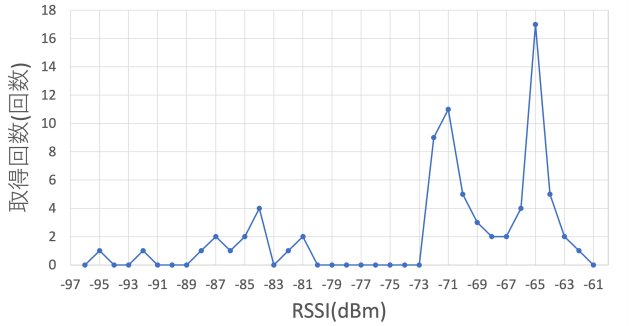


図 2 100cm の RSSI の値

基準値は基礎実験の 100cm のデータの取得方法を元に計算する. また, BLE ビーコン局 1 つ 1 つの精度を推定し優先順位の基準を決めるため, 取得した値が密集している山を探索する. この各 BLE ビーコン局の優先順位を決めることによって, 複数 BLE ビーコン局が存在している場合に精度が良い BLE ビーコン局を優先的に使用することによって 3 点測位の精度を上げるためである. 図 2 は BLE ビーコン局の RSSI を 5 分間に 75 個収集し, それをグラフ化したものである. 図 2 を元に基準値を計算する方法を図 3 を用いて説明する.

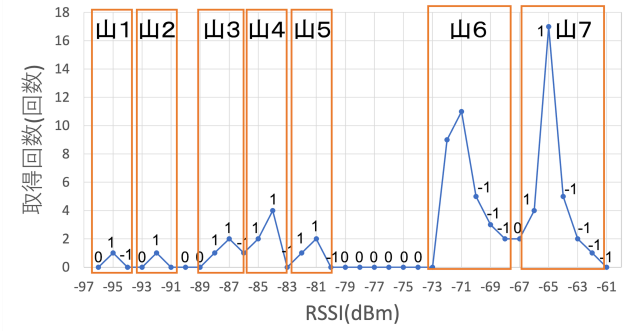


図 3 基準値の計算方法

図 3 は, 図 2 の分布図から山がいくつあるのかを計算したものである. 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 3 の場合, 山が 7 つあることになる [9].

この山の数を基準に BLE ビーコン局 1 つ 1 つの優先順位を決める. また各 BLE ビーコン局の 100cm の RSSI の基準の決定は最頻値で決定する.

提案方式

BLE を用いた 3 点測位と加速度センサーを組み合わせた測位方法を提案する. この提案では誤差の削減のため, BLE ビーコン局を使用して 3 点測位を行う. その後, 加速度センサーで歩数を求めて移動前の座標から歩幅を半径とする円を作成する. 加速度センサーから 1 歩を計算したタイミングから BLE を用いて 3 点測位した座標を直線で結び, 作成した直線と歩幅を半径とする円の交点を移動した座標として補正をする. 初期位置はあらかじめ決定されているものとし, 1 歩ずつ座標の計算する. BLE ビーコン局から送信される BLE ビーコンは IoT デバイスで受信され, RSSI が距離に変換される. 3 箇所に設置した BLE ビーコン局からの距離を用いて 3 点測位を行う. 移動距離はラーニングフェーズで得られた歩幅データと歩数を検知する閾値と加速度センサーを用いて歩数を取得し求める. 補正する座標は加速度センサーで 1 歩を判定したタイミングで, BLE による 3 点測位の座標と 1 つ前の座標を直線で結び, 移動距離を半径とする円との交点で求める. 提案手法は移動距離の範囲以外の座標を補正することで位置測位の精度改善をする.

提案方式のアルゴリズムや手法の説明をする. 本提案の条件として, BLE ビーコン局はすべて位置を固定して行う. まず, 3 つの BLE ビーコン局から RSSI を取得し, 3 点測位を行う. これらの説明を図 4 を用いて説明する.

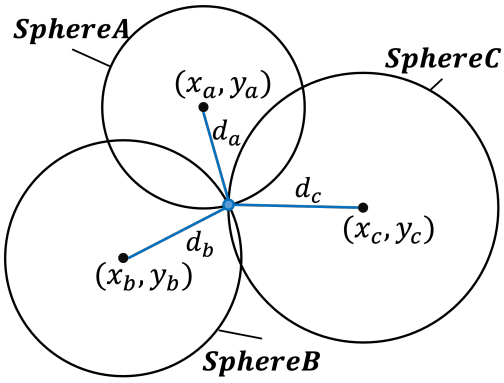


図 4 3 点測位の方法

なお, 図 4 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 [4]. Oguejiofor らは各 BLE ビーコン局からの距離である da, db, dc を式 (2)〜式 (4) で求めている [4].

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

$$SphereB; {d_b}^2 = (x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 \quad (3)$$

$$SphereC; {d_c}^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 \quad (4)$$

3 つの式は独立した非線形の連立方程式であり, 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

© 2022 Information Processing Society of Japan

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 らは式 (2)〜(4) を並び替えることで, 2 つの交点 x および y を求めている [4].

$$v_a = \frac{({d_b}^2 - {d_c}^2) - ({x_b}^2 - {x_c}^2) - ({y_b}^2 - {y_c}^2)}{2} \quad (5)$$

$$v_b = \frac{({d_b}^2 - {d_a}^2) - ({x_b}^2 - {x_a}^2) - ({y_b}^2 - {y_a}^2)}{2} \quad (6)$$

$$y = \frac{v_b(x_c - x_b) - v_a(x_a - x_b)}{(y_a - y_b)(x_c - x_b) - (y_c - y_b)(x_a - x_b)} \quad (7)$$

$$x = \frac{v_a - y(y_c - y_b)}{(x_c - x_b)} \quad (8)$$

式 (5)〜(8) で求めた x, y をマップ上に表示する [4]. 図 5 は図 4 に加速度を追加した補正方法である.

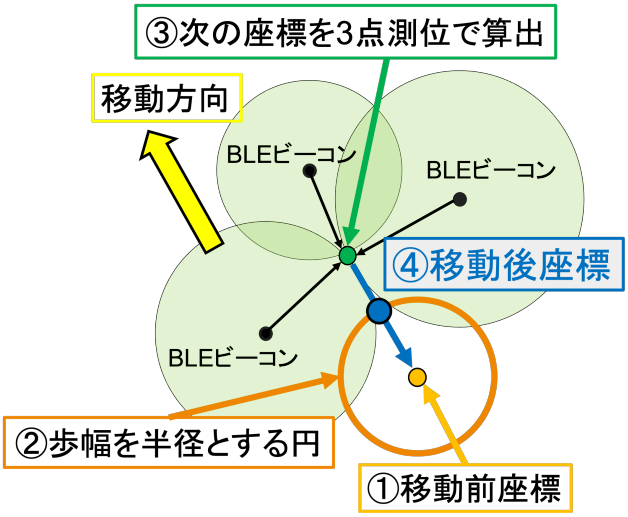


図 5 提案の補正方法

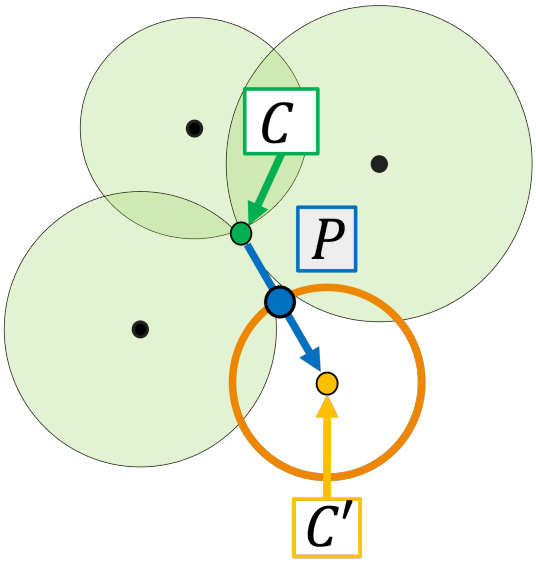


図 6 座標の補正方法の位置関係

初期位置の座標は与えられるものとする. 図 5 は通常の 3 点測位に加速度センサーで取得した 1 歩の歩幅の半径の円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 歩とする半径にもっとも近い外円の座標に補正を行う. 図 5 は図 6 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 6 に表示した. $C'P$ が加速度の 1 歩の円の半径の距離である. C' は移動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 を距離に変換したものを円の半径として 3 点測位を行い計算した座標である. この補正方法として式 (9)〜(11) を使用し, 図 7 を用いて説明を行う.

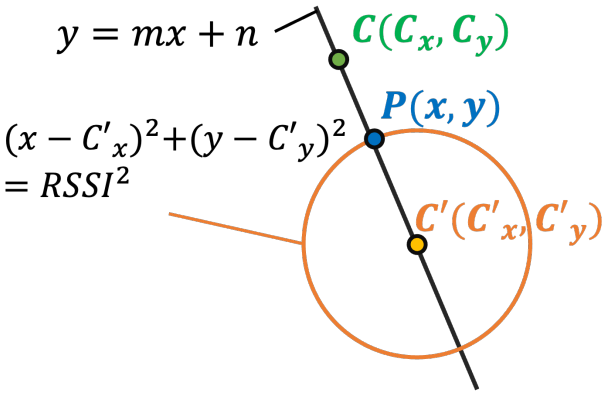


図 7 座標の補正方法

C は 3 点測位で計算した座標である. C' は移動する前の座標である. 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. この C と C' を直線で結んだときに交わる座標を本研究の補正した座標とする. この補正方法を行うことによって 1 歩の範囲からずれた BLE の 3 点測位の座標を 1 歩の範囲に補正して誤差を軽減する.

1 歩前の位置を $C'(C'_x, C'_y)$, 3 点測位で求めた位置を $C(C_x, C_y)$ とすると, 直線の方程式 $y = mx + n$ は式 (9) となる.

$$y = (\frac{C_y - C'_y}{C_x - C'_x})x + (C_y - (\frac{C_y - C'_y}{C_x - C'_x})C'_x) \quad (9)$$

1 歩前の位置を中心とし, 加速度によって判定した 1 歩の距離 $RSSI$ を半径とすると, 円の方程式は式 (10) となる.

$$(x - C'x)^2 + (y - C'y)^2 = RSSI^2 \quad (10)$$

式 (10) に直線の方程式を代入することで交点を求める. 交点を二次方程式 $ax^2 + bx + c = 0$ の形に変形すると, 式 (11) となる.

$$\begin{aligned}(1 + m^2)x^2 + (-2C'_y + 2m(n - C'_y))x \\ +({C'_x}^2 + (n - C'_y)^2 - RSSI^2) = 0\end{aligned} \quad (11)$$

© 2022 Information Processing Society of Japan

式 (11) を解の公式を用いて x の解を 2 つ求める．2 つの座標のうち，3 点測位で求めた座標とユークリッド距離が近いものを採用し，式 (9) に代入することで y も求める．求めた x, y が P の座標となる．

ユースケース・シナリオ

本研究のユースケースは，GPS が届かない屋内で BLE ビーコン局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，屋内で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を判断ことができない．また，BLE を用いた 3 点測位だけでは，誤差があり正確な位置が取得できない．図 8 のように青の点線が実際の歩いた経路で赤の線が BLE を用いた 3 点測位で計測した経路である．

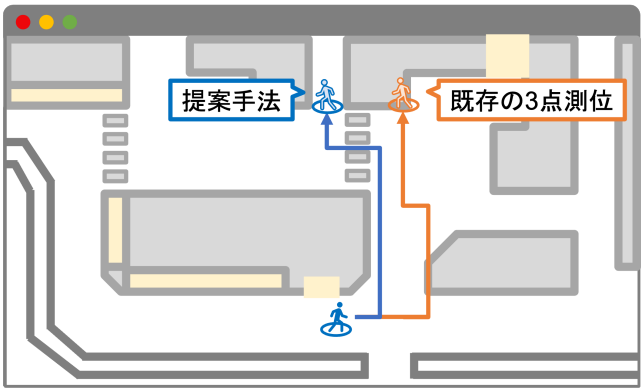


図 8 提案手法による位置補正のユースケース

赤の線のように障害物の電波干渉によってマップから外れる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しユーザは機器を持ち歩くことによって，誤差を軽減して壁や障害物に表示されず，位置を確認できるようになる．

4. 実装と実験方法

実装

実装は，BLE ビーコン局と 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 ビーコン局はすべて ESP32 を使用した．BLE ビーコン局は 4 台，IoT デバイスに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を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 Python3 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 の基準値を決め，各データベースに格納する．閾値の取得方法も前期の研究同様に行う [9]．

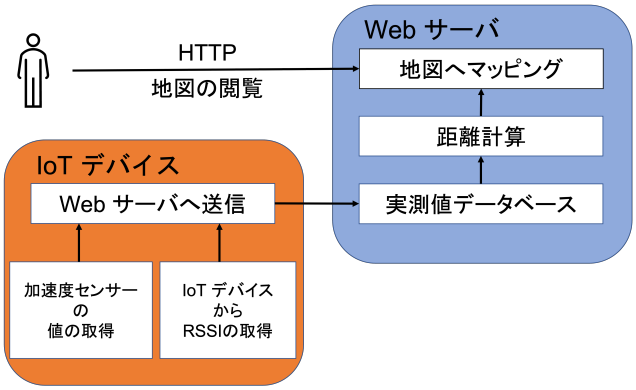


図 9 システムアーキテクチャ図

システム全体の構成図を図 9 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 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できる．

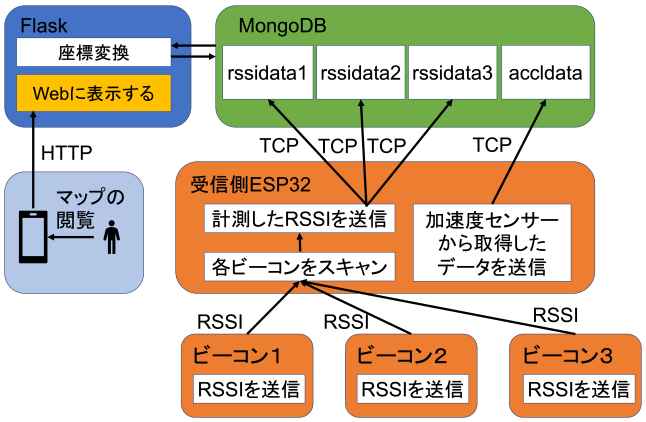


図 10 ソフトウェアの実装

次に図 10 は図 9 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 とは BLE ビーコン局から発信された BLE ビーコンを受信側の ESP32 が受信した値である．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．BLE ビーコン局から取得する RSSI を別々のデータベースに送信するため，3 つの BLE ビーコン局の RSSI を取得して座標を計算するのに 4 秒弱かかる．各ビーコン局によって RSSI を取得できる時間が異なるため，歩数を取得したタイミングで同じ 3 点測位の

© 2022 Information Processing Society of Japan

座標が表示される場合がある．加速度センサーは歩数を検出する閾値を用いて歩数を計測する．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．

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 Python3 のフレームワークである Flask を使用し，Web ブラウザ上のマップに計算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 JavaScript で実行される．

実験環境

本研究の実験では縦 650cm，横 1300cm の会議室で行い GPS が届かない場所と定義し実験をした．

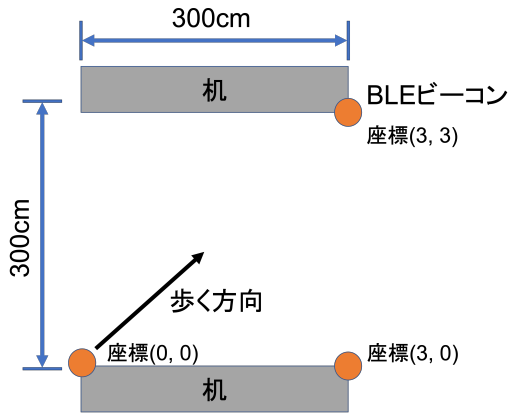


図 11 実験環境

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．移動型デバイスとして ESP32 に 9 軸センサー BMX055 を接続したものを腕に装着して実験した．移動型デバイスを動作させる位置は地面から高さ 70cm の位置で，動作範囲は体の中心から前後 29cm 間で腕を振って動作させた．

図 11 は実験した環境の図である．会議室は人がいない環境で障害物として高さ 70cm の机が 2 箇所設置されている状態で行った．3 つの ESP32 の位置を固定するために高さ 70cm の机を使用した．

実験は 2 種類行い，1 つ目の実験は 3 点測位するために 3 つの BLE ビーコン局を縦 300cm，横 300cm の正方形の座標 (0, 0) と座標 (3, 0) と座標 (3, 3) に設置した．歩く方向としては座標 (0, 0) から座標 (3, 3) に向かって歩く．2 つ目の実験は 3 点測位するために 3 つの BLE ビーコン局を縦 200cm，横 200cm の正方形の座標 (0, 0) と座標 (2, 0) と座標 (2, 2) に設置した．歩く方向としては座標 (0, 0) から座標 (2, 2) に向かって歩く．

実験結果

図 12 は縦 300cm，横 300cm の状態で実験を行った結果である．図 13 は図 12 の誤差を示したグラフである．

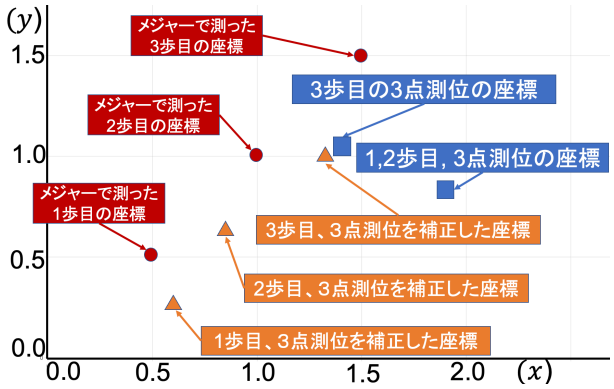


図 12 実験による 3 歩の補正結果

実験結果として巻き尺で測った座標は，1 歩目 (0.5m, 0.5m)，2 歩目 (1.0m, 1.0m)，3 歩目 (1.5m, 1.5m) であった．BLE を用いた 3 点測位の座標は，1 歩目 (1.9m, 0.8m)，2 歩目 (1.4m, 1.0m)，3 歩目 (1.4m, 1.0m) であった．BLE を用いた 3 点測位を加速度センサーで補正した座標は，1 歩目 (0.6m, 0.26m)，2 歩目 (0.8m, 0.6m)，3 歩目 (1.3m, 1.0m) であった．

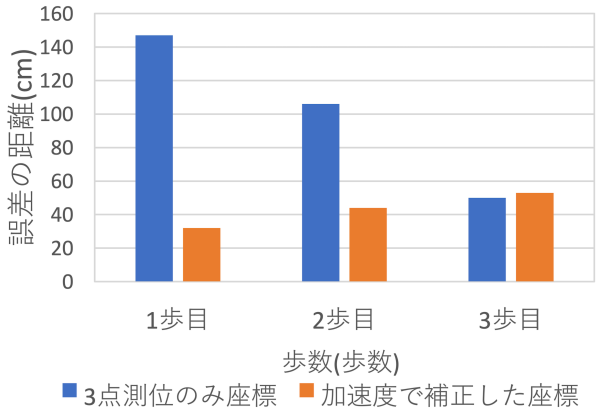


図 13 実験による 3 歩の補正結果の誤差の比較

図 13 の結果から，1 歩目の BLE を用いた 3 点測位の座標の誤差は 145cm で加速度センサーで補正した座標の誤差は 30cm だった．1 歩目の誤差は 115cm 軽減できた．2 歩目の BLE を用いた 3 点測位の座標の誤差は 104cm で加速度センサーで補正した座標の誤差は 43cm だった．2 歩目の誤差は 61cm 軽減できた．2 歩目の BLE を用いた 3 点測位の座標の誤差は 49cm で加速度センサーで補正した座標の誤差は 52cm だった．3 歩目の誤差は 3cm 増加した．BLE を用いた 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，加速度センサーの 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いことと，BLE を用いた 3 点測位で計算する座標がマップの中央による特徴が原因である．

次に縦 200cm，横 200cm の状態で実験を行った．実験は

© 2022 Information Processing Society of Japan

13 回行った．この実験結果は 13 回の中央値の比較である．3 歩目まで取得できた実験結果が図 14 である．

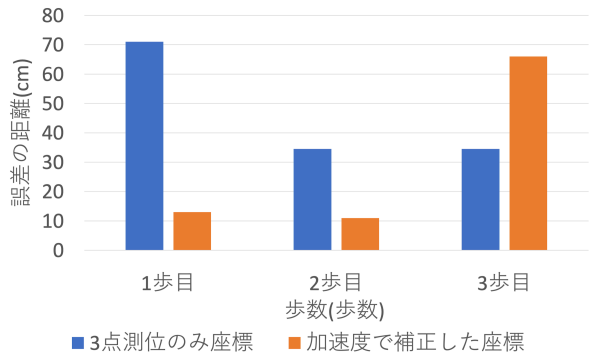


図 14 縦 200cm, 横 200cm の状態の実験による実験結果

200cm に変えた理由は BLE ビーコン局が RSSI を正確に取得できる範囲が 200cm であるため, 200cm に変更した．1 歩目の平均誤差は 59cm 軽減できた．2 歩目の平均誤差は 24cm 軽減できた．3 歩目の平均誤差は 30cm 増加した．この結果から 3 歩目の誤差が BLE を用いた 3 点測位より誤差が大きくなっていることがわかる．

5. 評価と分析

BLE を用いた 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 12 の実験結果では, 図 13 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．補正した結果, 1 歩目の平均誤差は 110cm 軽減でき, 2 歩目の平均誤差は 59cm 軽減できているため, 3 点測位のみの座標より誤差が小さい．しかし, 3 歩目では 3 歩目の平均誤差は 3cm 増えたため, 誤差が増えた．また, 図 13 の結果から加速度センサーで補正した座標の誤差は蓄積していることがわかる．

縦 200cm, 横 200cm の状態の実験を行い, 13 回のデータを取得した結果, 1 歩目の平均誤差は 59cm, 2 歩目の平均誤差は 24cm 軽減できた．3 歩目の平均誤差は 30cm 増えた結果となった．3 歩目の誤差が大きくなる原因として, 加速度で取得した 1 歩を半径とする円の内側に BLE を用いた 3 点測位の座標がある際に誤差が大きくなることがわかった．補正を行うプログラムで内側に来た場合の処理が正常に実行されないことである．精度が良い 1 歩目, 2 歩目では加速度で歩幅を半径とする円の外側に BLE を用いた 3 点測位の座標がある．3 歩目では加速度で歩幅を半径とする円の内側に座標が来ているため, 補正を行うプログラムで内側に来た場合の処理が正常に実行されないパターンが原因である．しかし, 1 歩目と 2 歩目を比較すると軽減できている誤差は小さくなっている．したがって, 蓄積誤差が発生していることがわかる．

上記の分析により, 加速度センサーで補正した場合に蓄積誤差が発生することがわかった．また, 3 歩目で BLE を用いた 3 点測位の座標より, 加速度センサーで補正を行った座標のほうが誤差が大きくなるため, 1 歩目や 2 歩目と比較して, 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 を用いたの 3 点測位の精度改善という観点では, 歩数が増えるほど誤差が大きくなるため, 改善する必要がある．蓄積誤差は加速度センサーの特徴であり, 問題点である．加速度センサーは前後左右に動いてしまった場合に, 誤差が蓄積する．この蓄積誤差の解決方法として地磁気センサーを使うことによって向きの補正を行い, 前後左右動いても誤差を削減できる．

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, 進行方向を補正することによって, より誤差を削減できる．

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．原因は加速度センサーで取得した歩幅を半径とする円の内側に BLE を用いた 3 点測位の座標が入った際に大きな誤差が起きることである．これを修正する方法として, 座標が内側に入ってしまった際の処理を追加することが挙げられる．現在の提案では, 絶対値で処理を行っていないため, 内側に座標が入ると数値が負の値になることで期待通りの処理が行われない．そこで, 数値が負の値になった場合の処理を追加することによって加速度センサーで取得した歩幅を半径とする円の内側に BLE の座標が入った際に起こる誤差をなくすことができる．

また現在の提案では, RSSI を距離に変換する式が 100cm の基準しかない．したがって, 各距離の変換する値の誤差があるため, 中央に座標が寄る特徴がある．座標が中央によると補正する座標も中央に寄る．したがって, ラーニングフェーズで行う 100m の基準値の決定を 50cm, 100cm, 150cm, 200cm と距離を刻み, 各距離の最頻値で基準値を決めることによって改善できる．

現在の提案は絶対座標で測位しているわけではないため, どこかで誤差をリセットする工夫が必要である．方法としては, ドアや狭い通路を通る際にビーコンを設置し, 近接測位でデバイスを持ったユーザが近づいてドアや狭い通路に入った際に絶対座標を決めておき, その座標にリセットすることにより, 蓄積誤差を軽減できる．

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．BLE の基礎実験では平均 150cm の誤差があることがわかった．

© 2022 Information Processing Society of Japan

加速度の基礎実験では 500cm を東京工科大学に所属している平均身長 175cm の男性 8 人に歩いてもらい, 閾値を決めた. 加速度は歩数を認識する閾値を決めれれば, 歩数の認識率が 98 %で距離を推定が可能である. 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, ２つの実験を行い, １つ目の実験で 3 つの BLE ビーコン局を縦 300cm, 横 300cm の正方形の座標 (0, 0) と座標 (3, 0) と座標 (3, 3) に設置し, ２つ目の実験で 3 つの BLE ビーコン局を縦 200cm, 横 200cm の正方形の座標 (0, 0) と座標 (2, 0) と座標 (2, 2) に設置し, 加速度センサーで歩数を計測して BLE を用いた 3 点測位の座標を補正し, 実験を行った. 結果として 14 回実験のうち, 平均 150cm 移動した際に, 実際に巻き尺で測定した値との誤差は BLE を用いた 3 点測位では 145cm あり, 加速度センサーを用いて補正した値では 85cm であった. 本提案は BLE を用いた 3 点測位より 52.8 %軽減できた.

謝辞

本研究は, JSPS 科研費 JP20K11776 の助成を受けたものである.

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* (2017).
[2] Deng, Z., Yu, Y., Yuan, X., Wan, N. and Yang, L.: Situation and development tendency of indoor positioning, *China Communications* (2013).
[3] Čabarkapa, D., Grujić, I. and Pavlović, P.: Comparative analysis of the bluetooth low-energy indoor positioning systems, *2015 12th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS)*, IEEE (2015).
[4] 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)* (2013).
[5] Pu, Y.-C. and You, P.-C.: Indoor positioning system based on BLE location fingerprinting with classification approach, *Applied Mathematical Modelling* (2018).
[6] 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)*, IEEE, pp. 1–5 (2017).
[7] 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).
[8] 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，東京工科大学クラウド・分散システム研究室，CDSL-TR-030 (2021).
[9] 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，東京工科大学クラウド・分散システム研究室，CDSL-TR-054 (2021).

© 2022 Information Processing Society of Japan