

Wi-Fiでの三点測位と歩行者自律航法を用いた 屋内測位の精度改善

神戸 優樹¹ 串田 高幸¹

概要: スマートフォンが普及し、スマートフォンでの位置情報の活用需要は増加している。屋内測位では、GPS による位置測位の誤差が増加するため、正確に位置を求めることができない。屋内測位での手法の1つとして、Wi-Fi の RSSI 値を用いた三点測位がある。しかし、2.4GHz 帯の Wi-Fi ではアクセスポイントと測定対象の IoT デバイスの間に壁や柱がある場合や歩行者がいる場合では電波の遮蔽や吸収によって誤差が増加する課題がある。本提案では Wi-Fi の RSSI 値を用いた三点測位と加速度センサー、地磁気センサーを用いた歩行者自律航法を組み合わせ屋内測位の精度改善を行う。評価と分析では、提案手法で測位した位置情報と実測値との誤差を比較し評価を行う。

1. はじめに

背景

スマートフォンとは

スマートフォン (Smartphone) とは携帯用の電話にパーソナルコンピュータの OS を付けたものであり、タッチパネルを搭載している端末である。スマートフォンの普及が進み、スマートフォンを活用した位置情報サービスが増加している [1]。多くのスマートフォンには情報サービスやナビゲーションを行うアプリケーションがインストールされている。ナビゲーションを行うアプリケーションでは、位置情報を取得する際に、スマートフォンに組み込まれている加速度センサーや地磁気センサー、GPS、ジャイロスコープを活用している [2]。

GPS とは

GPS(Global Positioning System) は GPS 人工衛星からの信号を使用し、位置情報を測位している。GPS は3つ以上の人工衛星と1つの受信機の距離を求め位置を測位する。距離の測り方は、送信機から送った電波が受信機に到達する時間と電波の速度を使い距離を割り出す。また受信機の時計が正確でない場合は4つ以上の人工衛星が必要である。GPS は屋外での位置情報を正確に取得できるためスマートフォンでの道案内アプリケーションで使われている。

図1はGPSの電波障害の例である。赤の点線は人工衛星からの電波が建物にさえぎられており、信号が届かない

状態を示している。緑の矢印は人工衛星からの電波が受信機に届き、信号が届いている状態を示している。受信機が屋内や建物の影にある状態では、GPS衛星からの信号が建物で遮蔽されてしまい、正確な測位を行うことができない。

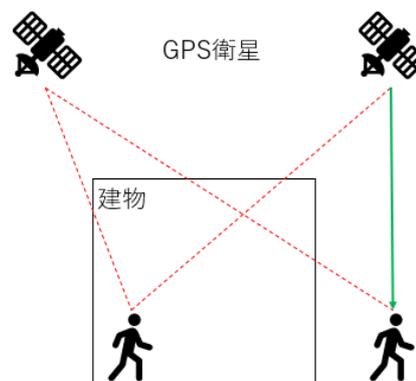


図1 GPSの障害

屋内測位

屋内や建物の影では、GPSで正確な測位を行えないため屋内での位置測位には近接無線通信が使われている。屋内で正確に位置情報を取得する場合には Wi-Fi や RFID タグを使用した近接無線通信があげられる [3]。その中でも Wi-Fi は屋内環境では広く利用されているため Wi-Fi での位置測位は導入しやすく屋内での位置測位に適している [4]。Wi-Fi を使用した屋内測位では、Wi-Fi の RSSI 値を利用した三点測位があげられる。

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

Wi-Fi とは

Wi-Fi とは無線 LAN の国際標準規格のひとつである。無線 LAN の中で、IEEE 802.11 という国際基準の認証を受けたものを Wi-Fi と呼ぶ。無線 LAN とは無線通信を利用したコンピュータネットワークである。電波には周波数があり、Wi-Fi の電波には 2.4GHz 帯のと 5GHz 帯が用意されている。2.4[GHz] 帯のは、5[GHz] 帯に比べ周波数が低い。周波数の低い電波は壁や床を通り抜けるが、周波数の高い電波は壁や床に吸収されてしまう。また、2.4[GHz] 帯は、無線の免許不要で使用できる電磁波の周波数と同じであるため他の製品との電波干渉が起こりやすい。

RFID とは

RFID(radio frequency identification) 値は、無線通信を使用し RF タグの中のデータを読み取りできるシステムである。タグからの情報が乗った電波を受けてタグのつけられた物を識別することができ、電波の届く範囲にタグがあれば離れていても読み取りが可能である。RF タグの例として駅の改札で使用できる非接触の IC カードがあげられる。

RSSI 値とは

RSSI(received signal strength indicator) は、Wi-Fi のアクセスポイントから受信した電波信号の強度を数値で表したものである。単位は dBm(デジベルミリワット) を使用して表し、値が大きいほど電波信号の強いことを表している。ESP32 では、0[dBm]~−98[dBm] で表される。Wi-Fi のアクセスポイントと受信機の距離によって変動し、Wi-Fi のアクセスポイントと受信機の距離の目安として利用できる。

三点測位とは

三点測位とは、図 2 のように、3 つの円の中心点の三点からの距離を半径として円の方程式を使い 3 つの円の交点の座標を求めることである。A, B, C はそれぞれアクセスポイントを示している。D は受信機を示している。

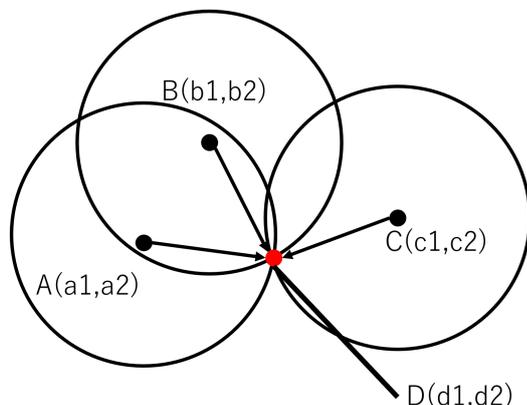


図 2 三点測位

式 (1.1), (1.2), (1.3) によって各アクセスポイントの円の半径を求めることができる。

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

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

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

式 (1.4), (1.5), (1.6), (1.7) では、求められた半径を使い 3 つの円の交点を求め、受信機の座標である (d1), (d2) が求まる。

$$\frac{(r_A^2 - r_C^2) - (a_1^2 - c_1^2) - (a_2^2 - c_2^2)}{2} = v_1 \quad (4)$$

$$\frac{(r_A^2 - r_B^2) - (a_1^2 - b_1^2) - (a_2^2 - b_2^2)}{2} = v_2 \quad (5)$$

$$\frac{v_2(c_1 - a_1) - v_1(b_1 - a_1)}{(b_2 - a_2)(c_1 - a_1) - (c_2 - a_2)(b_1 - a_1)} = d_2 \quad (6)$$

$$\frac{v_1 - d_2(c_2 - a_2)}{(c_1 - a_1)} = d_1 \quad (7)$$

歩行者自律航法とは

図 3 は、歩行者自律航法を示している。自律航法は図のように、過去の座標からどの角度にどのくらいの速度で移動したかデータを取り、現在の座標を決定する。過去の座標を元に現在の座標を測位する手法である。長時間、長距離の移動では誤差のある座標を元に測位をするため、誤差の蓄積により精度が落ちてしまう欠点がある。実験では、加速度センサーから取得したデータから移動速度を取っている。また、地磁気センサーから取得したデータから移動方向を取っている。

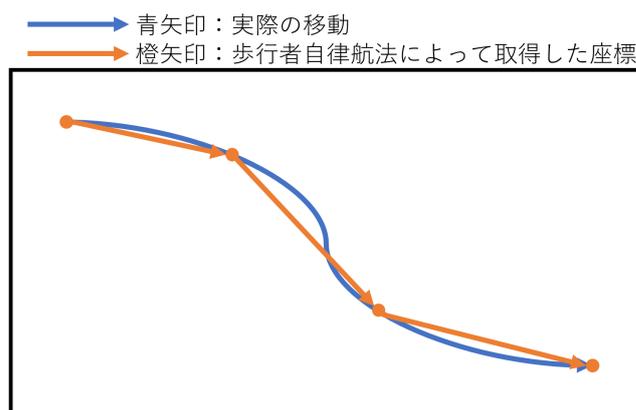


図 3 歩行者自律航法

ESP32 とは

ESP32 とは、低コスト、低消費電力で、Wi-Fi と Bluetooth を搭載したマイクロコントローラのひとつである。また、マイクロコントローラとは、主にセンサーやサーボ

の制御に使用される小型のコンピュータのことである。マイクロコントローラは、物理的な小ささや小低消費電力が求められるウェアラブルデバイスに向いているコンピュータである。本実験では、ESP32-WROOM-32D という中国の Espressif Systems 社が開発している規格の ESP32 を使用する。

ESP32-WROOM-32D の主な仕様

- 動作周波数 80-240MHz
- RAM 520[KB]
- フラッシュメモリ 4[MB]
- 使用できる Wi-Fi 規格 802.11b, 802.11g, 802.11n

本実験では、センサーから得たデータをサーバーへ送る動作をしている。

LSM9DS1 とは

図 4 は実験で使用したセンサーの LSM9DS1 である。LSM9DS1 とは、3 軸の加速度センサーと 3 軸のジャイロセンサー、3 軸の地磁気センサーが合わさったセンサーである。本実験では、加速度センサーで取得したデータから移動速度を検出し、地磁気センサーで取得したデータから移動方向を検出する。また、ジャイロセンサーで取得できるデータは使用しない。



図 4 実験で使用する LSM9DS1

基礎実験

課題を検証するため、Wi-Fi の RSSI 値を用いた三点測位の精度を計測した。実験で使用した機器は ESP32 は 4 台である。Wi-Fi アクセスポイントのルーターとして使用する ESP32 を 3 台、IoT デバイスとして Wi-Fi の受信機として使用する ESP32 を 1 台とした。図 5 は実験で使った ESP32 である。赤枠で囲まれた部分はアンテナである。

図 6 のように各アクセスポイントのアンテナが受信機の方を向くように設置した。受信機は RSSI 値を取得し、取得したデータは研究室のサーバーのデータベースへ送信している。受信機の座標はメジャーで計測した。

図 7 のように各アクセスポイントの間は 90[cm] 空け設

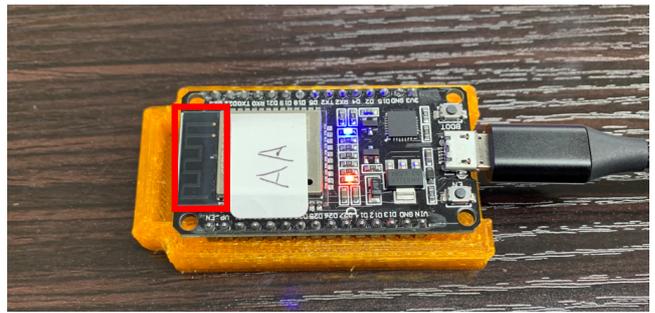


図 5 実験で使用する ESP32



図 6 基礎実験

置した。RSSI 値の計測中には、電波の反射や吸収によって RSSI 値が大きく変動するのを防ぐため、送信機の ESP32 のアンテナから受信機の ESP32 のアンテナの間には人や障害物のない状態にした。RSSI 値を距離に変換するために、35[cm]、45[cm]、55[cm]、65[cm]、75[cm]、85[cm] の距離でそれぞれ 100 回ずつ測定した。

図 8 は基礎実験の距離ごとの RSSI 値を 100 回取得した値の平均をグラフにしたものである。縦軸は受信機で受信した RSSI 値、横軸は送信機から受信機までの距離を示している。RSSI 値は、数値の大きいほど電波信号が強いことを表している。アクセスポイント 1 では、アクセスポイント 2、アクセスポイント 3 と比較して全体的に RSSI 値が大きくなった。アクセスポイント 1 とアクセスポイント 2、アクセスポイント 3 の機器ごとそれぞれ距離に対応した RSSI 値に違いがある。これより、事前に各アクセスポイントごとの RSSI 値を測定しておき、それぞれ RSSI 値に対応する距離を調査しておく必要がある。アクセスポイント 2 では、45[cm] で取得した RSSI 値の平均は-47.9[dBm] であり、55[cm] で取得した RSSI 値の平均は-42.6[dBm] となっており、45[cm] よりも距離の遠い 55[cm] のほうが RSSI 値が大きくなっている。三点測位では、アクセスポイント 1、アクセスポイント 2、アクセスポイント 3 のうち一点でも誤差がある場合では座標をひとつに定めることができな

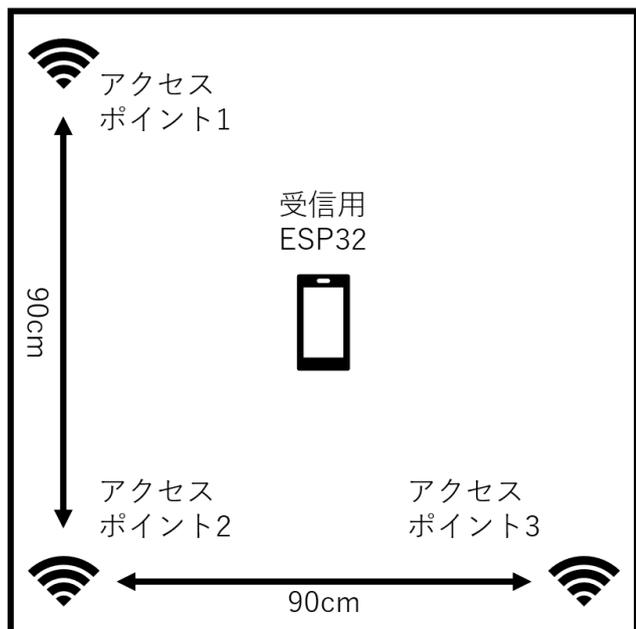


図 7 ESP32 の配置

なくなってしまう。また、RSSI 値と距離は比例の関係ではないことがわかる。これにより、1[dBm] あたりの RSSI 値の変化で検知できる距離の幅が広がり、精度が落ちていく。

基礎実験の結果では距離 65[cm] 以遠では RSSI 値を距離に対応づけをし Wi-Fi の RSSI 値による三点測位は難しい。

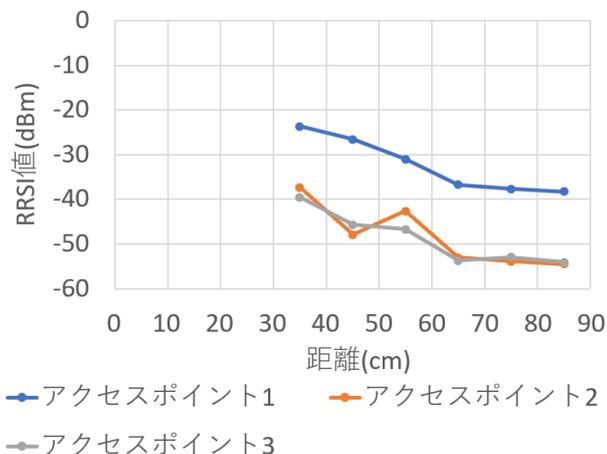


図 8 距離ごとの RSSI 値の平均

課題

2.4[GHz] 帯の Wi-Fi の電波は屋内の壁や柱、人によって遮蔽されたり反射されたりする。屋内測位で Wi-Fi による三点測位を使用する場合、アクセスポイントと位置測定をしたい対象物の間に障害物がある場合や、同じ周波数帯の 2.4[GHz] 帯の電波のある場合では、電波の遮蔽や反射によって電波の強度が変化し正確な位置を求めることができない [5]。歩行者自律航法による自己位置推定では、ユーザの移動距離と移動方向から自己位置を求める。加速度セ

ンサーと地磁気センサーの 2 つからの値で現在位置を更新するため、センサーで取得したデータによっては誤差が出る。誤差のある座標から進んだ速度と方向を測位し自己位置を決定するため、センサーの取得回数が増加するほど誤差が蓄積されていき測位の精度が落ちていく。

道案内をするためには、正確な位置と案内の位置のずれによってユーザーが迷わないような誤差に収める必要がある。

各章の概要

2 章では、本研究の関連研究についての紹介する。3 章では、本研究での具体的な提案方式とユースケース・シナリオについての説明をする。4 章では、提案方法をもとに実装と実験方法についての説明をする。5 章では本研究の評価方法とデータの分析方法についての説明をする。6 章では、本研究の議論を述べる。7 章では、本研究のまとめを述べる。

2. 関連研究

スマートフォンの Wi-Fi の RSSI 値を利用した Fingerprint 手法を使用した屋内測位の研究がある [6]。この研究では、Wi-Fi や BLE が公共機関に設置されていることに注目している。Fingerprint 手法は、単一方向でアクセスポイントからの電波強度を取得し、位置を決定する手法である。屋内環境を考慮し各部屋ごとの間取り図を使用する必要があり、各部屋の間取り図から Fingerprint を作成することは、時間と人件費がかかる。また屋内に電波の遮蔽や干渉するものを後から設置された場合には対応ができなくなる。

Wi-Fi の RSSI 値を利用した三点測位による屋内測位の研究がある [7]。この研究では、最小限の人件費で済む測位効率を改善した Wi-Fi の三点測位システムを提案している。しかし、この手法では、Wi-Fi の RSSI 値を使用しているため、障害物による電波の反射や吸収に弱い特性を解決していない。障害物の設置された環境での調査を行う必要がある。

3. 提案

提案方式

本研究における提案では Wi-Fi の RSSI 値による三点測位、加速度センサーと地磁気センサーを用いた歩行者自律航法をもとに、屋内測位の精度を向上させる手法を提案する。ユーザーが道に迷わない精度で道案内をする必要がある。

提案の概要図を図 9 に示す。建物や部屋の入口で Wi-Fi の RSSI 値による三点測位を行い位置情報を測位する。図中の青い円は Wi-Fi の RSSI 値による三点測位によって正確に屋内測位が可能な範囲を示している。Wi-Fi の RSSI

値を用いた三点測位、加速度センサーと地磁気センサーを用いた歩行者自律航法の精度をそれぞれ比較し、正確に屋内測位が可能な範囲を決定する。正確に屋内測位が可能な範囲は、Wi-Fi の RSSI 値による三点測位の位置精度が歩行者自律航法の屋内測位の位置精度を上回る範囲とする。青の線は Wi-Fi の RSSI 値による三点測位の屋内測位で測位した移動を示しており、オレンジの線は加速度センサーと地磁気センサーによる歩行者自律航法によって測位した移動を示している。青い円から出た場合 3 つある Wi-Fi のアクセスポイントからの電波が届かなくなり、三点測位による自己位置の確認ができない。そこで歩行者自律航法へ切り替えを行う。歩行者自律航法では加速度センサー、地磁気センサーの 2 つを用いる。加速度センサーでは取得したデータから移動の速度を求めることができる。移動の速度と移動の時間から移動の距離を算出する。地磁気センサーでは取得したデータからユーザーの向いている向きを求めることができる。加速度センサーと地磁気センサーを組み合わせることで、ある時間での移動の距離と移動の方向が分かり位置情報を測位できる。目的地に着くまで、三点測位と歩行者自律航法を切り替えながら屋内測位を行い、道案内をする。Wi-Fi の RSSI 値による三点測位によって正確に屋内測位が可能な範囲から離れた場合に、加速度センサーと地磁気センサーによる歩行者自律航法へ切り替え、現在位置を補正する。また、再度 Wi-Fi の RSSI 値による三点測位によって正確に屋内測位が可能な範囲に入った場合は Wi-Fi の RSSI 値による三点測位に切り替え屋内測位を行う。

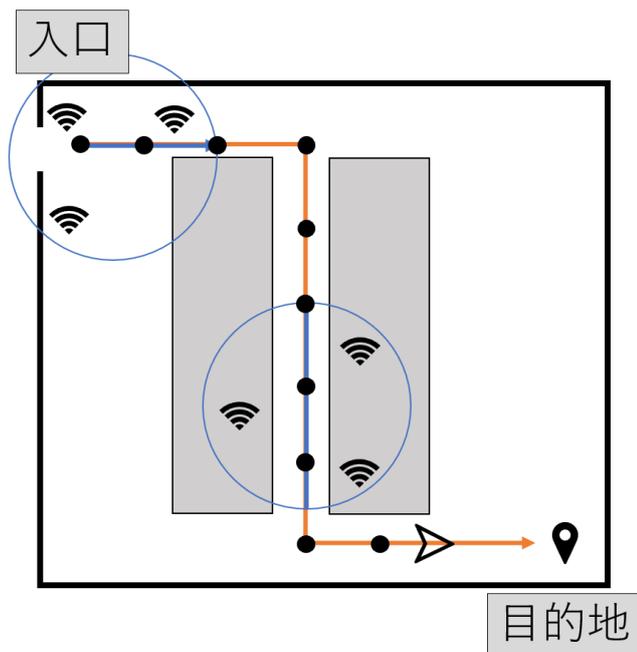


図 9 提案の概要

ユースケース・シナリオ

本提案のユースケースは、屋内にてリアルタイムで正確な位置を知りたい場合である。具体的には、Wi-Fi ルーターを設置済みである大型商業施設、地下鉄である。図 10 は駅構内の図である。使用するユーザは IoT デバイスを所持し、持ち歩いている人とする。ユーザーが電車を乗り換えたいが乗り換え口が柱の陰にあり見えないような駅で道に迷っているとす。ユーザーは IoT デバイスで道案内アプリケーションを使う。IoT デバイスで Wi-Fi を使い RSSI 値を取得し、現在の座標を確認する。ユーザーの移動によって Wi-Fi の RSSI 値による三点測位によって正確に屋内測位が可能な範囲から出た場合や柱の陰などに移動して Wi-Fi の RSSI 値による三点測位によって正確に屋内測位が可能な範囲から出た場合は歩行者自律航法へ切り替えながら乗り換え口まで道案内を継続する。Wi-Fi の RSSI 値を用いた三点測位に加えて、加速度センサーと地磁気センサーを用いた歩行者自律航法によって持ち歩いている端末で現在の位置と進んでいる方向を確認することが可能である。これによって、や地下鉄の駅の乗り換え口へナビゲーションに使用可能である。

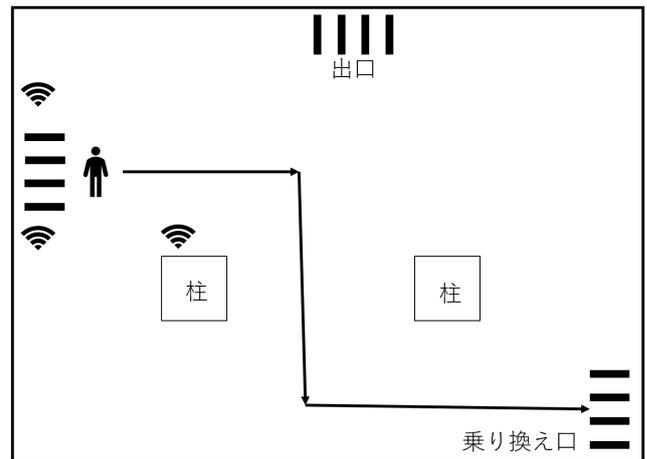


図 10 ユースケース図

4. 実装

本研究では ESP32 と加速度センサー、地磁気センサーで取得した RSSI 値と速度、方向をサーバへ送信し、位置情報の計算を行っている。実験で使用する機器は、ESP32 というマイクロコントローラ、LSM9DS1 というセンサー、プログラム作成用の PC、研究室のサーバーである。

ソフトウェア構成図を図 11 に示す。受信側の ESP32 では送信側の 3 つの ESP32 から Wi-Fi の RSSI 値をそれぞれ取得し、Web サーバへ送信する。受信側の ESP32 に接続された加速度センサーと地磁気センサーから得られたデータを、Web サーバへ送信する。Web サーバで受信側の ESP32 から得られた RSSI 値をもとに三点測位の計算を行

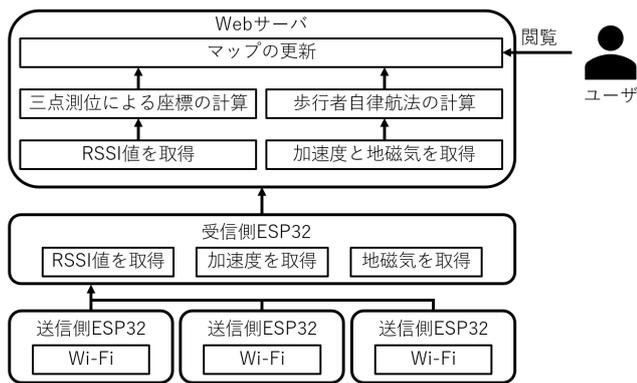


図 11 ソフトウェア構成図

い、現在位置の座標を計算する。Wi-Fi のアクセスポイントから離れ、三点測位によって現在の位置の測定の誤差が大きくなる RSSI 値を指標として、直前の Wi-Fi の RSSI 値を用いた三点測位を基準点とし、歩行者自律航法へ切り替える。歩行者自律航法へ切り替えた後は、加速度と地磁気を用いた歩行者自律航法により位置情報を更新する。ユーザは、ブラウザを通してマップと現在の座標を示すピンを閲覧することで自己位置を確認する。

5. 実験と分析

実験環境

本研究は、GPS の使用できない屋内でも本システムで位置情報を取得することが出来るか確認するため東京工科大学八王子キャンパス内の研究棟 A の 9 階の屋内で行う。図 12 は実験を行う東京工科大学八王子キャンパス内の研究棟 A の 9 階の A910 室である。この部屋は奥行き 6m、横幅 10m の部屋で中央に机と椅子が配置されている。



図 12 実験で使用する部屋

この部屋の机は実験では使わないため実験の際には移動する。部屋の出入り口で Wi-Fi の RSSI 値による三点測位を利用し位置を測定するためアクセスポイントを縦横 90cm の正方形になるよう離して送信側の ESP32 を 3 台設

置する。IoT デバイスに見立てた受信側の ESP32 には加速度センサーと地磁気センサーを搭載する。受信機は屋内測位をする人物の足に設置し実験を行う。屋内測位をする人は、部屋の出入り口からスタートする。壁まで直進し、壁で折り返して部屋の出入り口に戻ってくるルートで計測を行う。ソフトウェア環境では、送信側の ESP32、受信側の ESP32 ともに MicroPython でコードを組み込む。受信機で取得した Wi-Fi の RSSI 値を閾値とし、三点測位と歩行者自律航法を切り替える。受信側の ESP32 で取得した Wi-Fi の RSSI 値と LSM9DS1 から取得したデータを研究室内のサーバへ送信する。

評価方法

評価では以下 3 つの手法で求めた座標と実際の移動の座標を比較し、差を誤差とする。実際の移動はメジャーを利用して座標を測定する。

- Wi-Fi の RSSI 値による三点測位のみで屋内測位した座標
- 加速度センサーと地磁気センサーを使用した歩行者自律航法のみで屋内測位した座標
- Wi-Fi の RSSI 値による三点測位と、加速度センサー・地磁気センサーによる歩行者自律航法を合わせた屋内測位での座標

上記 3 つの手法の誤差を比較し、誤差の少なさを精度として評価する。

6. 議論

本提案手法では、Wi-Fi の RSSI 値による距離で精度を判断し、歩行者自律航法に切り替える。しかし、柱や壁による Wi-Fi の電波の干渉や吸収によるノイズを考慮していない。この問題は、あらかじめ柱や壁のノイズを考慮した RSSI 値をマップに対応させておくことで解決できる。これにより、アクセスポイントと測位したい対象物の間に柱や壁がある場合でも誤差を考慮した座標がわかるため誤差を増加させずに三点測位することが可能である。

7. おわりに

本稿では、屋内測位において、2.4GHz 帯の Wi-Fi を使用した際の、電波が屋内の壁や柱、人によって電波が遮蔽されたり反射されたりする点を課題として挙げた。この課題に対して、2 つのセンサーを用いた歩行者自律航法を組み合わせることで、Wi-Fi のみの屋内測位の精度を改善する提案をした。基礎実験では、歩行者自律航法の基準点である三点測位による座標の測位が難しいことが分かった。

謝辞 本卒業論文の作成にあたり、提案や実験手法についてのご指導をいただきました。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の高木優希さんに感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Griffiths, F. and Ooi, M.: The fourth industrial revolution - Industry 4.0 and IoT [Trends in Future I amp;M], *IEEE Instrumentation Measurement Magazine*, Vol. 21, No. 6, pp. 29–43 (online), DOI: 10.1109/MIM.2018.8573590 (2018).
- [2] Retscher, G., Kleine, J. and Whitmore, L.: Trilateration Approaches for Indoor Wi-Fi Positioning, *E3S Web of Conferences*, Vol. 94, EDP Sciences, p. 02002 (2019).
- [3] An, Z., Yang, L. and Lin, Q.: Identifying UHF RFIDs in Range of Readers With WiFi, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 29, No. 3, pp. 1252–1265 (online), DOI: 10.1109/TNET.2021.3057392 (2021).
- [4] Saloni, S. and Hegde, A.: WiFi-aware as a connectivity solution for IoT pairing IoT with WiFi aware technology: Enabling new proximity based services, *2016 International Conference on Internet of Things and Applications (IOTA)*, pp. 137–142 (online), DOI: 10.1109/IOTA.2016.7562710 (2016).
- [5] Marques, N., Meneses, F. and Moreira, A.: Combining similarity functions and majority rules for multi-building, multi-floor, WiFi positioning, *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pp. 1–9 (online), DOI: 10.1109/IPIN.2012.6418937 (2012).
- [6] Chirakkal, V. V., Park, M. and Han, D. S.: Navigating through dynamic indoor environments using WIFI for smartphones, *2014 IEEE Fourth International Conference on Consumer Electronics Berlin (ICCE-Berlin)*, pp. 376–378 (online), DOI: 10.1109/ICCE-Berlin.2014.7034268 (2014).
- [7] Yi, G. H., bin Djaswadi, G. W., bin Md Khir, M. H. and Ramli, N.: An Adaptive Wi-Fi Trilateration-Based Indoor Localization, *2018 International Conference on Intelligent and Advanced System (ICIAS)*, pp. 1–6 (online), DOI: 10.1109/ICIAS.2018.8540628 (2018).