

自律航法に基づく 省電力な測位と歩行時補正による精度の改善

小林 竣¹ 杉本 一彦² 串田 高幸^{1,2}

概要：GPS による長期的な通信は小型化された IoT デバイスのバッテリーに対し、消費電力が高いという課題がある。また、課題に対し加速度、ジャイロスコープ、地磁気から構成される 9 軸センサを用いた位置測位を行う自律航法が提案されるが、測位精度が低いという課題がある。先行研究では GPS の測位精度に対し自律航法を用いた測位では 2.4 倍もの測位誤差となった。そのため本研究では自律航法の測位精度向上と GPS 測位の消費電力に対し省電力な測位を行う。本研究では歩行停止時における GPS の取得回数を 1 回にすることで、移動距離を加速度センサから得られた加速度の積分による算出方法、また歩行時における補正ではユースケースから測位誤差 40 [m] に達した場合、GPS データによる歩行時補正を行うことを提案した。基礎実験の結果から GPS の取得回数および移動距離を加速度から積分による算出を可能とした。しかし歩行時補正におけるタイミングは誤差における関係性を明解することができなかったが、確率的予測より歩行距離に対し 3.28 [m] の誤差となると考察することが可能である。

1. はじめに

背景

ディスプレイの小型化、各センサの小型化、高速大容量のネットワークの普及により、小型かつ高性能な IoT デバイスが充実してきた [1]。

ウェアラブルウォッチ、スマートグラスといった身体や衣服に装着する IoT デバイス（ウェアラブルデバイス）が注目を集めていると共に普及している [2]。

IT 専門調査会社である IDC (International Data Corporation) によると、2021 年通年の IoT デバイス出荷台数は約 5 億 3360 万台であり、昨年度 2020 年に比べて 20.0% 増加している [3]。IoT デバイスの出荷台数は今後も増加し続ける見込みである。IoT デバイスは身体に取り付けることが多いことから、小型のバッテリーが搭載されている [4]。また IoT デバイスは、健康管理、通話・メッセージ通知、AR (Augmented Reality : 拡張現実) 技術を用いたゲーム、ビジネス・医療領域、GPS (Global Positioning System, 以下 GPS と記述) 機能を主な用途として活用されている。

自己位置を推定するために屋外での環境の場合、Global Navigation Satellite System (GNSS, 以下 GNSS と記述) を

備えた測位システムを利用することが一般である [5][6][7][8]。2023 年には準天頂衛星 7 機体制で運用されることが閣議で決定されており、準天頂衛星が増加することにより、屋外の測位精度は 10 [cm] 程度に改善するとされている [9]。測位精度が 10 [cm] 程度となる条件は、オープンスペースが想定されており、電波が伝播する環境に影響する。少なくとも現在、自己位置の推定を行う上では最も測位精度が高いと考えられる。センサは衛星信号から位置・距離・時刻を計算して、位置データを継続的にサンプリングし、ユーザのルートを正確にリアルタイムで特定でき、GPS モジュールから NMEA (National Marine Electronics Association, 以下 NMEA と記述) フォーマットの情報が送信される [10]。

一方、屋内およびオープンスペースでない環境の場合、GNSS 技術では衛星から送られる信号が十分に届かないため、測位そのものができない、あるいは測位精度が著しく低下してしまうことが考えられる [11][12][13]。

屋内での環境の場合、歩行者ナビゲーションシステム (Pedestrian Navigation System, 以下 PNS と記述) において問題に対する解決策として Wi-Fi や Bluetooth Low Energy (BLE) を用いた 3 点測位や多点測位が挙げられる [14]。また、この問題に対し、単体の IoT デバイスでの解決策は GPS を慣性計測装置 (Inertial Measurement Unit : IMU, 以下 IMU と記述) と統合することによる解決である [15]。通常 IMU ベースの歩行者自律航法 (Pedestrian Dead Reck-

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

oning : PDR, 以下 PDR と記述) システムは、加速度センサやジャイロ스코ープ, 地磁気センサを組み合わせる歩行者の位置を推定する技術である [16][17]. 自律航法は航空や宇宙の分野で代表され, これまで研究が進められてきた [18]. 歩行者用自律航法である PDR は一般的に安価なセンサで実現されている [19]. 小型かつ低コストである反面, 航空や宇宙の分野に用いられるものに比べて精度が悪い.

さらに IoT デバイスを利用するにあたりバッテリーを必要とするが, 小型な端末を実現するため, バッテリーのサイズが限定される. そのため, 計算処理と端末のバッテリーサイズを考慮して設計する必要がある. 近年のリチウムイオンバッテリー技術の発展により, 薄型のリチウムイオンバッテリーが市販されてきているものの, サイズ, 電力量は基本的に比例の関係となるため, カード型を想定する様な小型な端末において潤沢な電力を確保することができない. したがって PDR の動作時間を確保するためには低消費電力となる軽量の計算処理を限定する必要がある. これもまた測位精度とのトレードオフの関係にある.

課題

GPS データの受信は衛星からの電波を受信する必要があるが, 継続的な受信は通信時間が長くなることによる IoT デバイスのバッテリー寿命に悪影響を及ぼす [20].

GPS モジュールの消費電力が高いことから GPS の通信時間を抑えた場合, GPS データの取得頻度も低下してしまうため, ユーザの正確な位置情報の取得は困難である.



図 1 GPS の通信を継続した場合

図 1, 2 は東京工科大学構内において約 355 [m] の歩



図 2 GPS の通信を減らした場合

行を行い, Google が提供するウェブマッピングプラットフォーム, Google Maps にて位置情報を表示したものである.

図 1 は GPS 通信の受信頻度を継続的な受信とし, 位置情報を示したものである. また図 2 では, GPS 通信の受信頻度を減らし位置情報を示したものである. 図 2 は図 1 に対して途中の位置情報の記録が無いいため, 歩行者がどのようなルートで移動したのか, 現在どこにいるのか, どこを進んでいるのかが把握できない.

これらの課題を解決するためには, IoT デバイスの消費電力を削減しつつ, 測位精度の低下を最小限にする手法が求められる.

消費電力を削減しつつ, 位置情報の低下を最小限にする手法として, 自律航法に基づく GPS 通信回数の低減による IoT デバイスの省電力な測位手法がある [21].

田中風助らの先行研究において, 歩行が検知されない場合の複雑な動きにより移動誤差が発生しやすいと考察した [22]. そのため加速度センサによる規則的な歩行検知にて, 歩行の検知がされない場合に GPS データの受信を行うタイミングとし, 提案した. 結果として GPS のみの位置情報取得を行うとき, 提案手法による位置情報取得の時とで GPS では平均約 185.2 [mWh], 提案手法は約 32.1 [mWh] であり約 83% の消費電力の削減に成功した. しかし位置精度において GPS 測位の平均 10.9 [m] に対し, 提案手法では平均 26.5 [m] もの位置誤差となった.

また PDR は GPS の絶対位置で位置情報を取得するのとは違い, 特定位置からの移動距離で相対的に位置測位を行う. IMU センサによる PDR では, 長期的な位置測位を行うほど, 誤差の蓄積が大きくなる [23][24].

このことから GPS 受信の通信時間を抑え消費電力の削減をすると共に歩行停止時以外での GPS の動的な受信タイミングを設け測位誤差の低減を図る必要がある。そのため PDR における測位精度が課題とされる。

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。

2. 関連研究

Wu Chen らは深い都市の狭谷では、従来の GNSS 測位のパフォーマンスは GNSS 信号の遮断と反射によって簡単に影響を受ける可能性があることを挙げ、GNSS と PDR 技術の統合は、高精度の絶対位置の継続的な更新に応じて、測位の可用性と精度の明らかな改善を示す。また通常、屋内測位に適用される BLE テクノロジーが屋外測位に大きな可能性があることを示した。GNSS と PDR を統合することにより、測位精度は GNSS 単独の 30.2 [m] から 24.8 [m] に改善した。さらに BLE ポジショニングの統合後、測位精度 8.1m に向上した。また BLE 方位による方位推定と位置補正の改善に基づき、改良された統合システムの測位精度は 2.7 [m] と 4.2 [m] を達成した [25]。しかし、Wu Chen らの研究では BLE センサの間隔を 5 [m] 未満にする必要があると共に、測位精度の向上を成しているが、GNSS 信号の継続的な受信を行っていることから消費電力については考慮されていない。

Liqliang Xu らの研究では、GPS / DR (自律航法) システムと Wi-Fi ネットワークを使用した車両の測位に関する実験を行っている [26]。ここでは GPS のみの測位ではなく、自律航法を用いた測位方法と統合、また Wi-Fi ネットワークを統合した車両追跡を行っている。GPS のみに頼らない位置の測位が可能となっているが、車両の測位を想定しているため、バッテリーの大きさにとらわれることがない。そのため、小型のバッテリーを搭載する場合に応用できず、GPS 通信の電力の高さについて課題が残っている。

Sherif A. S. Mohamed によると、慣性オドメトリ (Inertial Odometry : IO, 以下 IO と記述)、または慣性航法システム (Inertial navigation system : INS) は、IMU センサからの測定値を使用して、特定の開始点に対する車両/ロボットの位置、向き、高度、および線速度を決定する位置測位方法は小型で低消費電力であるため、ドローンやマイクロロボット、小型ロボットシステムに理想的なソリューションとなっていることを示す [27]。しかし、IMU センサ

からの測定値は推定された速度と位置の誤差は誤差の蓄積に繋がる。したがって、IO システムは位置推定は不正確であり、長期間の位置測位を必要とするアプリケーションには適さないことを示す [23]。

Pragun Goyal らの研究では、腰に IoT デバイスを装着し PDR システムについての実験をおこなっている。3 軸の加速度計、磁力計、ジャイロ스코ープで構成される IMU に基づき推定している [24]。ここでは、センサから与えられる値を拡張カンマフィルターフレームワーク (Extended Kalman filter framework : EKF) を使用し補正を行い、誤差を最小にしている。しかし、長期的な位置測位を行うと誤差が蓄積する課題がある。

3. 提案方式

提案方式

本研究では、位置情報の精度を維持しながら GPS の使用率を削減することが目的である。そのため本研究の提案では、GPS の取得回数および歩行距離の算出、GPS データの受信タイミングに関し提案する。

先行研究より、歩行が検出されない場合、誤差が発生しやすい原因とされている [22]。これより提案では歩行停止時に GPS データの受信を行う。また、先行研究では歩行停止時において GPS データの受信を継続的に行っていたものの、本研究では歩行停止時における GPS の受信回数を 1 回にすることを提案する。

また先行研究では、加速度センサよりステップ検出を行い移動距離の算出を行っていたが歩幅に個人差が生じてしまう [22]。そのことから、本研究では加速度、速度、変位が微分、積分の関係にあることから加速度センサから得られた値から積分を行い、移動距離の算出を行なう。

さらに加速度センサから得られた変位から移動距離、移動時間に対する蓄積誤差の関係性の実験から GPS の受信タイミングの検討を行う。また、結果を受け今後の考察の提案を行う。

これらの提案を成立させるために基礎実験を行った。



図 3 提案の概要

図 3 に提案の概要、図 4 に GPS による測位補正の流れ

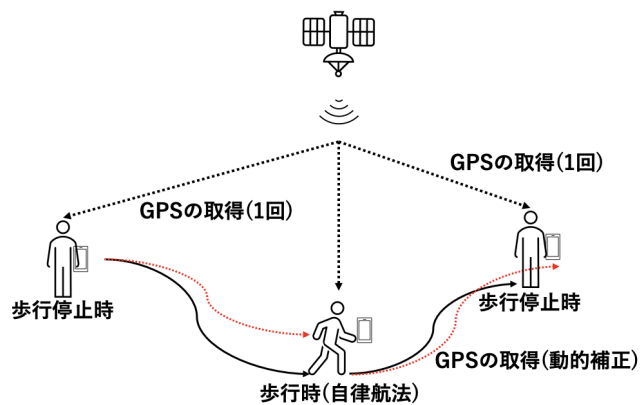


図 4 測位補正の流れ

を示し、本研究の提案である歩行停止時および歩行時における GPS データ受信頻度、受信タイミングを示したものである。図 4 における赤点線は本来存在すべき実際の測位場所を示し、黒点線は自律航法により測位した測位場所を示す。

基礎実験

歩行停止時における GPS データの取得回数

歩行停止時 GPS データの受信が継続的でなく、1 回だけの受信であることが測位誤差を生まず測位可能であるか基礎実験を行う。



図 5 GPS による定点測位

図 5 は歩行停止を行い定点測位を行ったデータ数 100 個の図である。

| 緯度 | 経度 |
|----------|----------|
| 35.62717 | 139.3404 |
| 35.6272 | 139.3404 |

100 個の GPS データを取得したところ図 5 また表 1 の 2 点であり、距離にして誤差 3 [m] であった。GPS による測位精度については水平誤差 13 [m] (95%, 全世界平均) 以下と規定されており、定点における誤差 3 [m] は測位需要を満たされていると判断できる [28]。よって提案方式における歩行停止時の GPS データ取得回数を 1 回に定めることができる。

移動距離の算出

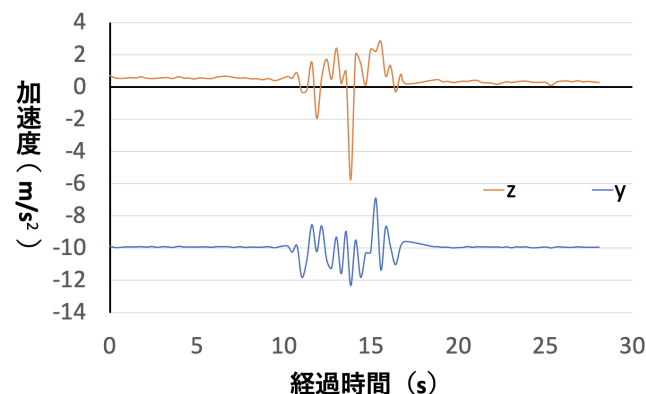


図 6 重力加速度除去前

図 6 は歩行停止を終始 10 [s] 行い 5 [m] の歩行を行った加速度センサによって出力された重力加速度を除去する前の y 軸および z 軸の値である。

本研究での基礎実験では歩行停止を終始行い IoT デバイスが受ける重力加速度および歩行停止また、歩行開始を判断する閾値を定めた。

重力加速度の除去においては (1) より、歩行停止時における初項を重力加速度と定め、n 項に対し初項で引き算を行う。

$$N_n = N_n - N_1 \quad (1)$$

N: 要素

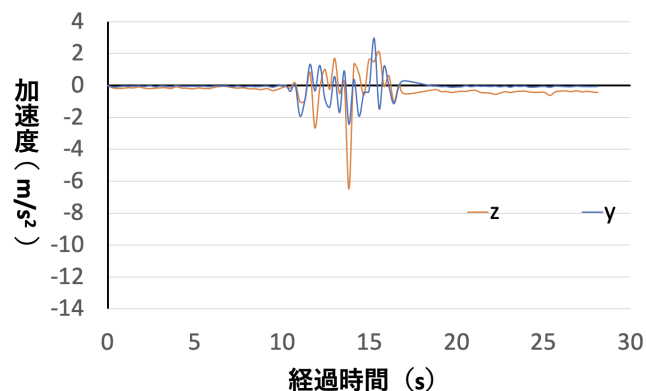


図 7 重力加速度除去後

図 7 は図 6 に対し (1) の演算を行った図である。重力

加速度の除去後，加速度から得られたデータを絶対値とし(2)を用い移動距離の算出を行う。

$$\frac{(N_{n+1} + N_n)(T_{n+1} - T_n)}{2} \quad (2)$$

T：時間（単位：s）

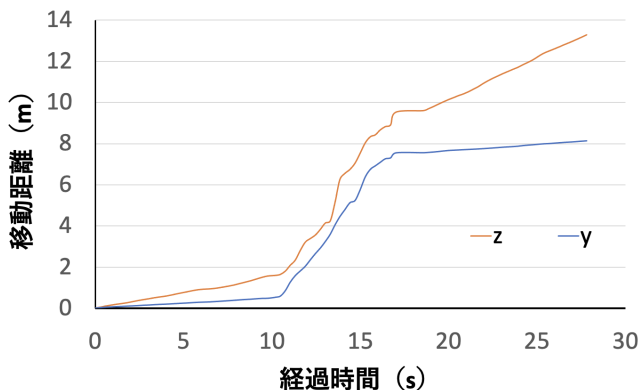


図 8 補正前の移動距離の算出

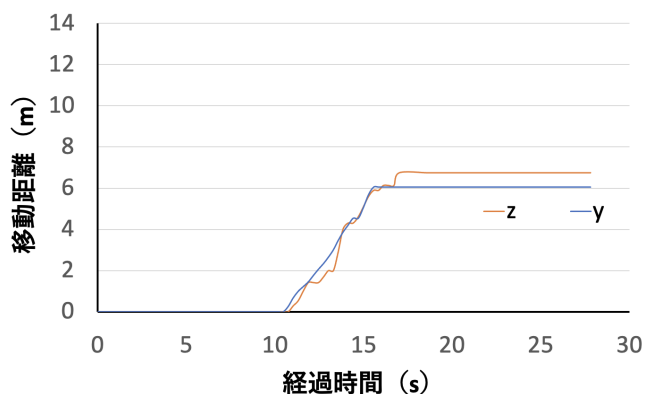


図 9 補正後の移動距離の算出

図 8 では図 9 と違い，歩行停止をしている 0 [s] から 10 [s]，歩行終了後の 10 [s] の間にも歩行の検知がされ，距離とし算出されている．そのから歩行停止および歩行における閾値を設ける必要がある．歩行停止をしているはずである 0 [s] から 10 [s]，歩行終了後の 10 [s] の間のデータを参照すると 0.00 [m] 以上 - 0.20 [m] 以下であった．これより 0.00 [m] 以上 - 0.20 [m] 以下を歩行停止状態と定め，0.20 [m] 以上を歩行とする．また，閾値より補正を行った y 軸，z 軸それぞれによる移動距離を図 9 に示す．さらに y 軸を用い z 軸（進行方向）に対し歩行停止状態を確立させ移動距離の算出を行う．

表 2 より y 軸，z 軸を合成させたものを最終的な移動距離として扱い図 10 に示す．また 5 [m] の歩行に対し結果 5.58 [m]，誤差 0.58 [m] となり提案，歩行距離の算出に関し成立である．

表 2 y 軸，z 軸合成補正

| y 軸 | z 軸 | 状態 |
|-------------------|-------------------|------|
| 0.00 以上 - 0.20 以下 | 0.00 以上 - 0.20 以下 | 歩行停止 |
| 0.00 以上 - 0.20 以下 | 0.20 以上 | 歩行停止 |
| 0.20 以上 | 0.00 以上 - 0.20 以下 | 歩行停止 |
| 0.20 以上 | 0.20 以上 | 歩行 |

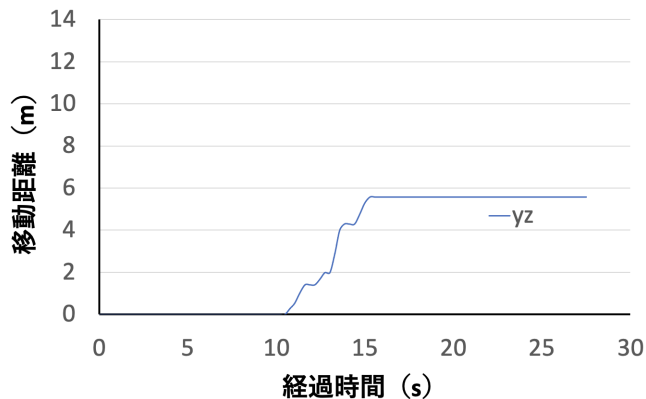


図 10 移動距離の算出 (1)

GPS データの動的なタイミング

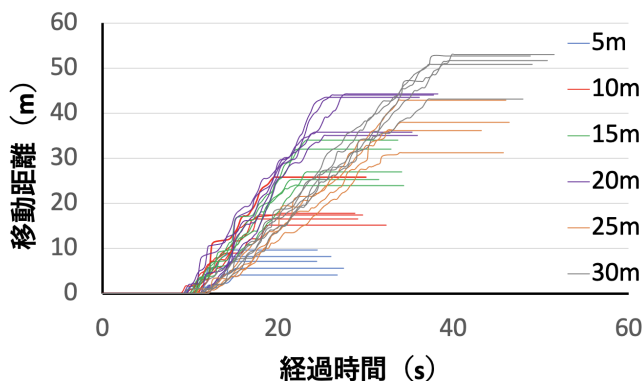


図 11 移動距離の算出 (2)

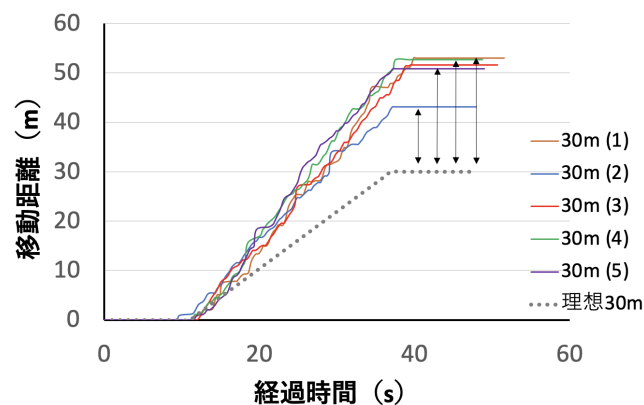


図 12 移動距離の蓄積誤差

本研究における加速度センサを用いた基礎実験では図 11 に示すように 5 [m] から 30 [m] までを 5 [m] 間隔で歩行を行い加速度センサにおける蓄積誤差に関し基礎実験を

行った。

図 12 に示した 30 [m] の歩行を行い加速度センサから得た値と理想の値から歩行を行うにつれ、蓄積誤差を確認することができた。しかし、同様に 30 [m] の歩行を行った場合でも蓄積誤差の範囲は試行回数分異なる結果となった。また、他の 5 [m] から 25 [m] も同様であった。図 9 を参照するに 5 [m] から 30 [m] の歩行を行い加速度センサから得られた値の推移から似た動きとなることが予想されるが蓄積誤差範囲は一定でなく距離からの一定な蓄積誤差、歩行時間における蓄積誤差を予測することが困難であった。

そのため、サンプルデータの増量による確率的予測が可能であると考察する。また、基礎実験で得られた 5 [m] データを用いるに確率的予測を用いると平均誤差 1.93 [m] であり平均誤差に対し 70%増加させると、80%のデータが存在することとなった。そのことから歩行距離に対し 3.28 [m] の誤差が出ると予測できる。

ユースケース・シナリオ

ユースケース・シナリオとして正確な位置情報を常に把握し行動することができない状況を想定する。ジョギングを想定する場合、慣れた道を走り位置情報を見ずに行動する。しかし、走行距離や走ったルート of 記録は残したい。

また、位置情報機能を活用するアプリケーションに活用できると考察する。位置情報を活用したアプリの中でも社会現象となった「ポケモン GO」。私たちの住む世界にポケットモンスターが現れ、探して獲得するという設定のゲームである。ポケモン GO の人気により、一部で「歩きスマホ」が問題となっていたが消費電力が大きいためモバイルバッテリーと共に使用する姿を見かける。スマホと BLE の送受信で繋げる事により、画面を見続けなくてもポケモン GO を遊ぶ事ができる IoT デバイスの登場した。このことから正確な位置情報を常に把握し遊ぶ必要がないと考えられるまた、ポケモン GO での検知範囲 40 [m] を許容範囲とされている。さらに消費電力の削減を考慮される PDR を用いられると考察する。

4. 実装と実験方法

実装

本研究における実験ではマイクロコントローラである ESP32 (ESP-WROOM-32, 以下 ESP32 と記述), GPS モジュール, 9 軸センサを使用し, MicroPython にて実装した。

GPS モジュールにおいて測位精度の向上を図るため、日本の準天頂衛星システム (QZSS : Quasi-Zenith Satellite System) 「みちびき」による測位座標を用いるため、衛星番号 (194, 195) の指定を行い測位座標の表示をさせるよう MicroPython にて実装した。

実験環境

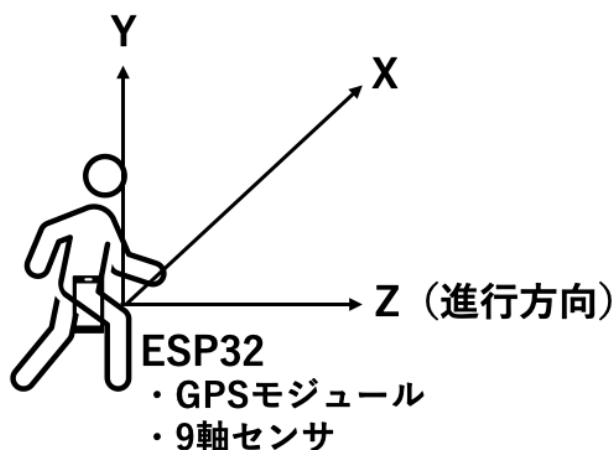


図 13 歩行実験における実験環境

図 13 は、デバイスを装着した実験環境である。

デバイスは腰に装着し、左右運動による加速度を x 軸、上下運動による加速度を y 軸、前後運動による加速度を z 軸にて検出される。

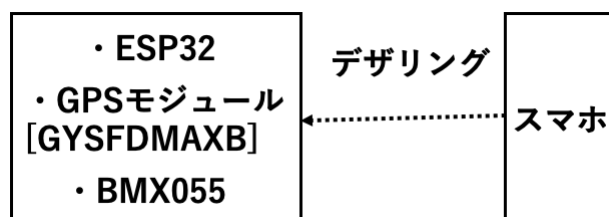


図 14 ESP32 とスマホの関係

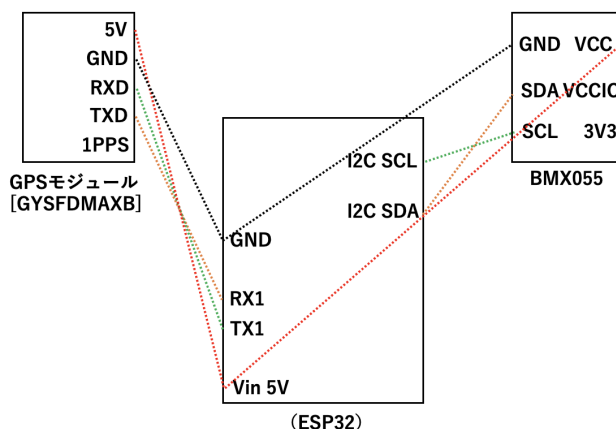


図 15 IoT デバイス接続環境

ESP32 を動作させるためにはインターネット環境が必要である。そのため、スマートフォンのインターネット共有機能を用い動作させたことを図 14 に示した。また図 15 では、実験において腰に装着した IoT デバイスの接続環境を

示した。

- ESP32
位置情報受信機の IoT デバイスとして使用する。

- GPS モジュール
太陽誘電製の小型高感度 GPS モジュール [GYSFD-MAXB] を使用した GPS 受信機であり、NMEA0183 に準拠した緯度、経度、高度、時刻の各種ナビゲーション情報を C-MOS ロジック (3.3V) レベルのシリアル通信 (9600bps) で出力する。

- BMX055
9 軸 (加速度 3 軸, ジャイロ 3 軸, 地磁気 3 軸) センサであり、DIP6 ピンパッケージにまとめたセンサモジュールである。また、PDR を行うにあたり使用する。

- スマートフォン
ESP32 に対しデザリングを行うために使用する。

5. 評価手法と分析手法

GPS のみを用いた測位を行った場合と提案方式を用いた測位を行った場合を比較し、バッテリーの消費電力と測位精度を評価とする。

また位置精度に関し GPS, PDR のみを用いた場合と提案方式を用いた場合で測位誤差率と移動距離の関係性を表やグラフを用い示し、分析を行う。

実験では評価対象による歩行を大学施設内で行う。

INA219 モジュール, 電流/電圧/電流計モジュールを用い消費電力を毎秒取得する。また, Google Maps を用い GPS, PDR による測位, 提案方式による測位のマッピングを行い測位精度を評価する。

6. 議論

歩行時における動的なタイミングによる, GPS データの受信, 測位補正を行うことを提案したものの, 基礎実験から補正タイミングを予測することができず, 移動距離の誤差予測方法を決定させることができなかった。そのことから移動距離の誤差予測方法を決定する必要がある。

加速度センサから取得される値を用いた移動距離の算出は, 移動距離, 歩行時間に対し一定な誤差を示さないが, サンプルデータの増量による確率的予測が図れると考察する。

また, 本研究では歩行停止時における GPS データの取得回数決定, 移動距離の算出に関し提案方式を成立させることができたが, 本研究は GPS, PDR のみを用いた場合, 提案手法を用いた場合での消費電力に関し実験する必要がある。

さらに, GPS による測位と自律航法による測位を提案方式に基づいた動的な切り替えを行った実装および実験を行う必要がある。

7. おわりに

本研究で提案された歩行時における GPS データによる補正タイミングを確立させる必要がある。

提案方式は先行研究に対し消費電力の削減が見込まれないが, GPS による測位に対し省電力な位置測位を実現できる。さらに先行研究に対し, 測位精度の向上が見込まれる。

参考文献

- [1] Awad, A., Frunzke, T. and Dressler, F.: Adaptive Distance Estimation and Localization in WSN using RSSI Measures, *10th Euromicro Conference on Digital System Design Architectures, Methods and Tools (DSD 2007)*, pp. 471–478 (online), DOI: 10.1109/DSD.2007.4341511 (2007).
- [2] Wu, J., Li, H., Lin, Z. and Zheng, H.: Competition in wearable device market: the effect of network externality and product compatibility, *Electronic Commerce Research*, Vol. 17, No. 3, pp. 335–359 (2017).
- [3] : Wearables Deliver Double-Digit Growth for Both Q4 and the Full Year 2021, According to IDC, <https://www.idc.com/promo/wearablevendor>.
- [4] Seneviratne, S., Hu, Y., Nguyen, T., Lan, G., Khalifa, S., Thilakarathna, K., Hassan, M. and Seneviratne, A.: A survey of wearable devices and challenges, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 19, No. 4, pp. 2573–2620 (2017).
- [5] Lechner, W. and Baumann, S.: Global navigation satellite systems, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 25, No. 1-2, pp. 67–85 (2000).
- [6] Dow, J. M., Neilan, R. E. and Rizos, C.: The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems, *Journal of geodesy*, Vol. 83, No. 3, pp. 191–198 (2009).
- [7] Johnston, G., Riddell, A. and Hausler, G.: The international GNSS service, *Springer handbook of global navigation satellite systems*, Springer, pp. 967–982 (2017).
- [8] Wang, J. J. H.: Antennas for Global Navigation Satellite System (GNSS), *Proceedings of the IEEE*, Vol. 100, No. 7, pp. 2349–2355 (online), DOI: 10.1109/JPROC.2011.2179630 (2012).
- [9] : Cabinet Office, Government of Japan, Quasi-zenith satellite system, <http://qzss.go.jp>.
- [10] Shoab, M., Jain, K., Anulhaq, M. and Shashi, M.: Development and implementation of NMEA interpreter for real time GPS data logging, *2013 3rd IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*, IEEE, pp. 143–146 (2013).
- [11] Ozsoy, K., Bozkurt, A. and Tekin, I.: Indoor positioning based on global positioning system signals, *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 55, No. 5, pp. 1091–1097 (2013).
- [12] Werb, J. and Lanzl, C.: Designing a positioning system for finding things and people indoors, *IEEE spectrum*, Vol. 35, No. 9, pp. 71–78 (1998).
- [13] Chen, P., Shang, J. and Gu, F.: Learning RSSI Feature via Ranking Model for Wi-Fi Fingerprinting Localization, *IEEE Transactions on Vehicular Technol-*

- ogy, Vol. 69, No. 2, pp. 1695–1705 (online), DOI: 10.1109/TVT.2019.2959308 (2020).
- [14] Orujov, F., Maskeliūnas, R., Damaševičius, R., Wei, W. and Li, Y.: Smartphone based intelligent indoor positioning using fuzzy logic, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 89, pp. 335–348 (2018).
- [15] Godha, S., Lachapelle, G. and Cannon, M. E.: Integrated GPS/INS system for pedestrian navigation in a signal degraded environment, *Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006)*, pp. 2151–2164 (2006).
- [16] Kouroggi, M. and Kurata, T.: Personal positioning based on walking locomotion analysis with self-contained sensors and a wearable camera., *ISMAR*, Vol. 3, Citeseer, p. 103 (2003).
- [17] Harle, R.: A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 15, No. 3, pp. 1281–1293 (2013).
- [18] Folta, D., Gramling, C., Leung, D., Belur, S. and Long, A.: Autonomous navigation using celestial objects, *1999 Astrodynamics Specialists* (1999).
- [19] Lu, W., Wu, F., Zhu, H. and Zhang, Y.: A step length estimation model of coefficient self-determined based on peak-valley detection, *Journal of Sensors*, Vol. 2020 (2020).
- [20] Nixon, K. W., Chen, X. and Chen, Y.: Footfall-GPS polling scheduler for power saving on wearable devices, *2016 21st Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, IEEE, pp. 563–568 (2016).
- [21] 田中 風助, 杉本一彦, 串田高幸: 自律航法に基づく GPS 通信回数の低減による IoT デバイスの省電力な測位の実測結果, クラウド・分散システム研究室, CDSL-TR-069 (2021).
- [22] 田中 風助, 杉本一彦, 串田高幸: 自律航法に基づく GPS 通信回数の低減による IoT デバイスの省電力な測位, クラウド・分散システム研究室, CDSL-TR-053 (2021).
- [23] Mohamed, S. A. S., Haghbayan, M.-H., Westerlund, T., Heikkonen, J., Tenhunen, H. and Plosila, J.: A Survey on Odometry for Autonomous Navigation Systems, *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 97466–97486 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2929133 (2019).
- [24] Goyal, P., Ribeiro, V. J., Saran, H. and Kumar, A.: Strap-down pedestrian dead-reckoning system, *2011 international conference on indoor positioning and indoor navigation*, IEEE, pp. 1–7 (2011).
- [25] Luo, H., Li, Y., Wang, J., Weng, D., Ye, J., Hsu, L.-T. and Chen, W.: Integration of GNSS and BLE Technology With Inertial Sensors for Real-Time Positioning in Urban Environments, *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 15744–15763 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3052733 (2021).
- [26] Xu, L., Zhang, S., Quan, J. and Lin, X.: Vehicle positioning using Wi-Fi networks and GPS/DR system, *2009 fifth international conference on mobile ad-hoc and sensor networks*, IEEE, pp. 287–293 (2009).
- [27] Du, S., Sun, W. and Gao, Y.: MEMS IMU error mitigation using rotation modulation technique, *Sensors*, Vol. 16, No. 12, p. 2017 (2016).
- [28] 坂井丈泰 GPS/GNSS の基礎知識 *TEXT for GPS/GNSS SYMPOSIUM*, pp. 229–230 (2007).