

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の実測結果

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。田中風助らの研究では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の向上と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、ジャイロセンサを用いた腕の振りを検知することによる歩数の検出、また最近傍探索を用いた歩行ルートの補正を提案した。本研究結果を田中風助らの研究による測位とGPSのみの測位を行った場合とで消費電力、また測位精度を比較する。その結果GPSの取得回数を最低1回とし、消費電力の削減を可能にした。また測位精度では、GPSの平均誤差4.7[m]、田中風助らの研究の提案手法の平均誤差26.5[m]の測位精度に対し、本研究における提案手法の平均誤差3.75[m]であり、それぞれ25.3%、606.7%の精度の向上を示す結果となった。

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5億3550万台であり、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]。

GPSによる絶対位置での位置測位の他にユーザが所持したセンサから相対的に移動距離を算出する方法も存在する[11]。さらに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方法も存在する[12]。通常IMUベースの歩行者自律航法（Pedestrian Dead Reckoning：自律航法、以下自律航法と記述）システムは、加速度センサやジャイロスコープ、磁気センサを組み合わせることで歩行者の位置を推定する技術である[13][14]。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[15]。歩行者用自律航法であ

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

る自律航法は一般的に安価なセンサで実現されている [16]. 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よう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. したがって自律航法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, 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 [17].

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 365 [m] の歩行を行い, 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



図 2 GPS の通信を減らした場合

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 [18].

田中風助らの研究において, 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 [19]. 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.

また自律航法は 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 センサによる自律航法では, 長期的な位置測位を行うほど, 誤差の蓄積が大きくなる [20][21].

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測位誤差の低減を図る手法が必要である. そのため自律航法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 と自律航法技術の統合は、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 [22]。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。

Liqiang 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 [23]。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適用できず、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 [24]。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 [20]。

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プで構成される IMU に基づき推定している [21]。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

提案方式

本研究では位置情報の精度を維持しながら GPS の使用量を削減し、低消費電力となる位置測位の実現が目的である。

そのため本研究の提案では、歩行停止における GPS の取得回数および歩行距離の算出、自律航法における歩行経路の誤差の補正に関し提案する。

田中風助らの研究より歩行が検知されない場合、停止状態にて誤差の発生が多くなるとされている [19]。これより田中風助らの研究の提案では、歩行停止時に GPS データの受信を行っている。また自身の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るが、本研究では (i) 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。歩行停止時における GPS の受信回数を 1 回にすることが可能であることは自身の先行研究より示した [25]。

また自身の先行研究では加速度、速度、距離が微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、移動距離を算出した [25]。しかし移動距離を求めることは可能であるが、実際の移動距離との誤差が大きく、ジャイロセンサを用い歩行距離を導き出すのと比較すると、ジャイロセンサより得られた値と歩幅を用いた移動距離の算出を行う場合の方が精度が良かった。

そのことから本研究では、(ii) ジャイロセンサを用い腕を振る動作を検知することによる歩数の計測を行い、移動距離の算出を提案する。

さらに加速度センサから得られた移動距離が移動時間に対してどの様に誤差が蓄積していくかを検討し、蓄積誤差の関係性から GPS の受信タイミングの検討を行うことを考察した [25]。しかし本研究では (iii) 歩行時の補正に地理情報システムを使用して、記録された道路の地理座標と取得した地理座標とを比較し、最も近い道路上に現在地を補正することを提案し、GPS を使用せず補正することを提案する。

歩行が停止状態であるか判定するため、また (ii) を確立するため、基礎実験を行った。

基礎実験

歩行停止の判定では加速度センサによる得られた値の変

化の大きさを用いてユーザの行動が停止状態であるか判定する。

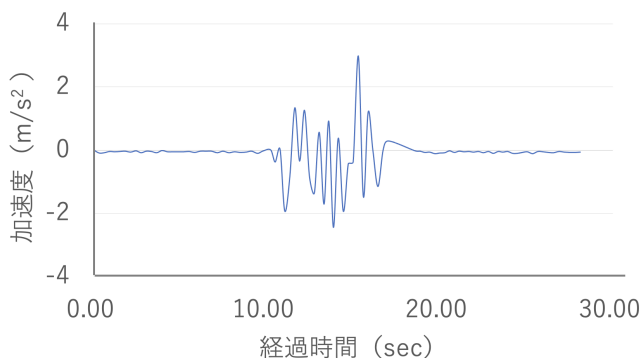


図 3 加速度センサにより得られた値の変化

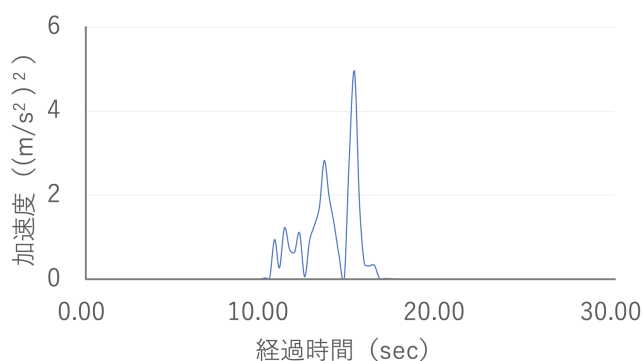


図 4 加速度センサにより得られた値の分散の変化

図 3 より歩行停止をしている状態から得られる加速度センサの値は動きが小さく、ユーザが移動したときには加速度データに大きな変化が発生するため、加速度の変化の大きさを用いることでユーザの行動が停止状態かどうか判定することが可能となる。具体的に歩行停止を判断するため、図 4 で示すように一定時間における加速度の分散値を加速度データの変化の大きさと表し、ユーザの歩行状態を判断する。

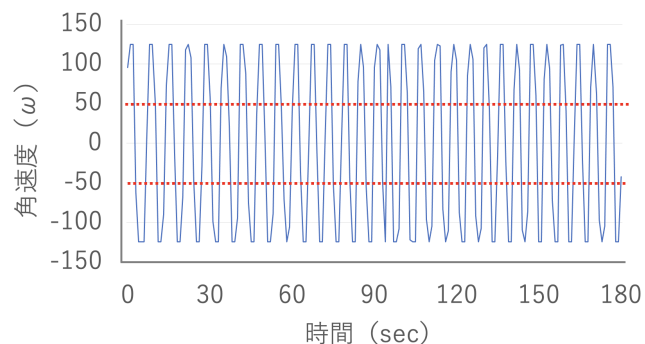


図 5 ジャイロセンサの値の推移

我々が一般的に歩行を行う場合、足の動作に伴い腕の動作も連動し行っている。そのことからユーザの歩行におけ

る歩数は、腕を振る動作の数と同数であることが分かる。

歩行を行った際、腕の振りによりジャイロセンサから得られた値を図 5 に示す。一定間隔でジャイロセンサの値にピークが現れることが分かる。例えば左足を前方そして右腕を振り上げ、右足を前方ならびに左腕を振り下げる直前に取得される値がピークとなり、角速度 0 [ω] である時は、足、腕共に胴体と直線上にある時である。ジャイロセンサから得られる値として 0~50 [ω] または 0~-50 [ω] で 1 歩と設定し、判定した。変位が 100 [ω] でなく、50 [ω] としたのは腕の振りが小さい場合、100 [ω] であるとは歩数の判定ができない可能性があると考え、50 [ω] とした。また、ジャイロセンサによる歩数の計測実験では試験者 5 名に協力していただき歩数計測率 100% であった。

ユースケース・シナリオ

ユースケース・シナリオとしてヘルスケアアプリケーションやポケモン GO といったゲームのような運動中の移動データの取得や位置情報を用いたゲームの場合を想定することが可能である。

9 軸センサのデータと地理データを組み合わせた手法を用いることは、ヘルスケアアプリケーションにおいて GPS の使用を行わず歩数や移動距離および移動経路など活動記録の取得を可能にすると考察する。

さらに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。そのことから消費電力の削減を考慮される自律航法を用いられると考察する。

また屋内であることを想定すれば、屋内の地図情報の保持および屋内に入室する直前の位置データを所持することにより衛星から送られる信号が十分に届かない屋内においても測位が可能であると考察する [26][27][28]。

4. 実装

自律航法における方位推定に用いる地磁気センサは、田中風助らの研究と同様の手法によりキャリブレーションを行い使用している [18]。

以下、図 6 をもとに実装に関し説明を行う。

①実験のファーストフェーズとして自律航法による測位座標の取得前に際し、自律航法における起点となる座標を提案手法に従い、GPS による測位座標を 1 回取得した。ま

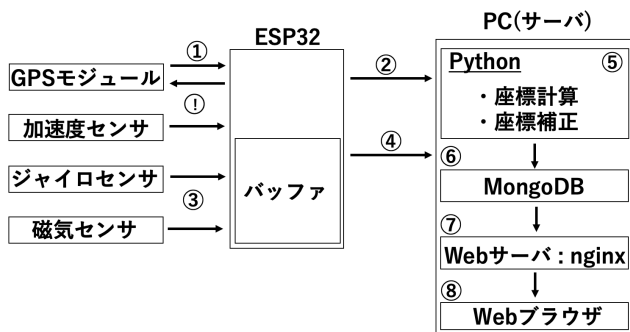


図 6 提案手法の実装図

た①加速度センサよりユーザの歩行が停止状態であると判断した場合、GPS による測位座標を 1 回取得した。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実装を行った。②では、①で取得した測位座標を ESP32 を介しサーバに対しデータの移行を行い、自律航法における起点を設定した。

③ジャイロセンサより腕を振る動作を検知することにより歩数の計測を行い、さらに地磁気センサより歩行時の方位データを取得し④ESP32 を介しサーバに対し歩数および方位データの移行を行った。

⑤では GPS モジュール、ジャイロセンサおよび地磁気センサから得られたデータを用い Python の pyproj ライブラリを活用し、緯度経度の算出を逐次的に行った。pyproj ライブラリは地球が楕円体であることを考慮して、地理的な緯度経度を使った計算ができるライブラリであり、本研究では測地系として GRS80 を指定し、fwd メソッドを使用した。引数として出発点の緯度経度 (GPS により取得した測位座標)、地磁気センサから取得した方位角を逆方位角に変換した値および距離 (歩幅) を与えた。また戻り値として緯度経度、方位角 (到着点から出発点を見た時の方位角) を得ることができる。また上記から取得した緯度経度と地理情報システムを使用し、記録された道路の地理情報を用い、最近傍探索にて距離空間における最も近い緯度経度を探索し補正を行い、⑥MongoDB にてデータを格納した。⑦では⑥のデータを用い、⑧にてマップを表示させた。③～⑧は③が行われる限り繰り返し行われる。

5. 実験と分析

実験環境

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。

・ 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
mm9 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、自律航法を行うにあたり使用する。

・ GY-271 QMC5883L
3 軸 QMC5883L コンパスモジュールは、I2C に基づき高分解能の地磁気抵抗センサと 16 ビット ADC が装備されており 1° ~2° までのコンパス方位精度が得られる。

・ 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。

実験結果と分析

田中風助らの研究では、加速度センサより歩行者の腕の振りを検知していたが、正確に検知を行えない場合があり、移動距離の測定に誤差が生じることが示されていた [18]。しかし本研究では、ジャイロセンサを用いることにより歩行者の腕の振りを正確に検知を可能にした。また、消費電力および測位精度の向上を図った。

以下、実験結果と分析では、消費電力および位置情報の精度に関し、田中風助らの研究との比較を行いながら述べる。

消費電力の比較

GPS のみおよび田中風助らの研究の提案手法、本研究における提案手法を用いた位置情報の取得と消費電力を比較する。本研究の提案手法では、自律航法に基づき位置情報の取得を行い、GPS による位置情報の取得回数を田中風助らの研究の提案手法より低減している [18]。GPS のみの場合において受信回数 200 回で平均約 185.2[mWh]、田中風助らの提案手法の場合では受信回数 11 回で約 32.1[mWh] である。また本研究における提案では、GPS の取得回数は自律航法の起点となる測位座標を得る 1 回、あるいは自律航法中における各停止状態に受信する 1 回であることから本研究における提案手法の消費電力は GPS による測位回数が最低 1 回であることから消費電力が削減されている。

位置情報の精度の比較

図 7, 8, 9, 10 はそれぞれ東京工科大学構内において約 390 [m] の歩行を行い、GPS、提案手法を用いた自律航法および提案手法を用い補正を行った GPS による測位、提案手法による補正を行った測位結果を示している。また図 11 は、Python ライブラリ Geopy を用い路上からの誤差を算出し比較したものである。

図 7 の GPS による測位結果では図 11 より最大、最小、平均誤差それぞれ約 11.9 [m]、約 0.1 [m]、約 4.6 [m] であった。また GPS による測位に対して図 8 の自律航法による測位結果では約 7.7 [m]、約 0.0 [m]、約 3.5 [m] であり、GPS より提案手法を用いた自律航法の測位精度が高い結果となった。図 9 では図 10 と比較するため、提案手法による補正を行ったものであり、本実験における GPS モジュールが緯度に依存し、経度の変位が大きくない場合には緯度上に連続して座標を示してしまうことが考えられ、GPS の精度が低く、図 10 に対し歩行を行っていない座標にマッピングされてしまっている。また、図 9, 10 共にセンサーから得られた測位座標から最も近い路上の緯度経度を取得することから、測位誤差により歩行を行っていない路上の緯度経度を示してしまうことがある。



図 7 GPS の測位結果
東京工科大学構内 約 390 [m]

自律航法は GPS による絶対位置での測位と違い、相対位置での測位となる。そのため、センサーから得られた値の誤差の蓄積により、測位座標の誤差が増加することは課題であり、関連研究にも示されている [20][21]。以上より、東京工科大学構内の約 390 [m] の歩行より歩行距離を延ばした 600 [m] にすることで、本提案による自律航法の誤差が約 390 [m] に対して約 600 [m] の歩行でどの程度誤差



図 8 自律航法の測位結果
東京工科大学構内 約 390 [m]



図 9 補正された GPS の測位結果
東京工科大学構内 約 390 [m]

が増加したか、また GPS の測位誤差および自律航法の測位誤差と共に評価を行う。図 12 の東京工科大学構内、約 600 [m] の歩行を行った GPS の測位結果では図 15 より最大、最小、平均誤差それぞれ約 28.0 [m]、約 0.0 [m]、約 4.8 [m] であった。また図 13 の自律航法の測位では、約 11.4 [m]、約 0.0 [m]、約 4.0 [m] であり、390 [m] の歩行同様 GPS による測位より自律航法による測位精度の方が高かった。390 [m] 同様、600 [m] の GPS による測位を提案手法を用い補正した測位を図 14 に示す。390 [m] の際にも歩行を行っていない歩行経路にマッピングされる



図 10 補正された自律航法の測位結果
東京工科大学構内 約 390 [m]

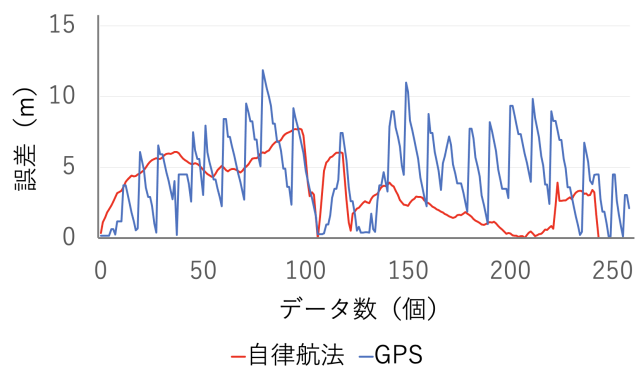


図 11 路上からの測位誤差
東京工科大学構内 約 390 [m]

ことがあるが図 15 と比した図 14 は歩行を行った経路に対しマッピングされていない現象が起きておらず、歩行経路がわかる。それに対し図 15 では補正され、路上の緯度経度を取得することができているが、自律航法の誤差により歩行を行っていない路上の緯度経度を示してしまうことがある。さらに歩行を行っていない路上の緯度経度を取得したことから本来は歩行を行っている経路をマッピングできていないことが起きた。歩行距離 390 [m] に対する 600 [m] に伸ばした自律航法の誤差の増加は、平均 15.3% の増加であった。

本研究における自律航法では平均誤差約 3.7 [m]、提案手法では約 3.7 [m] 以下であり、GPS の約 25.3% の精度の向上、田中風助らの研究における自律航法のみ 55.6 [m]、提案手法 26.5 [m] の誤差に対し約 1366.7%、約 606.7% の精度の改善を可能にした。



図 12 GPS の測位結果
東京工科大学構内 約 600 [m]



図 13 自律航法の測位結果
東京工科大学構内 約 600 [m]

6. 議論

本実験に用いた GPS モジュールでは緯度に依存し、経度の変位が大きくない場合には緯度に連続して座標を示してしまった。そのことから GPS による誤差が大きく示されてしまったと考える。プログラムの見直し、および他のモジュールの使用を検討する必要があると考える。

我々一人ひとり歩幅が異なり、かつ同一人物ですら歩幅は一定でない。しかし本研究の提案および実験では歩幅は一定であり、歩幅の補正に関し提案がされていない。そのことから本研究では、歩行における補正しているものの、歩行を行ったルートを正確に示すことができないことがあった。自律航法を行うにあたり、歩幅が一定でないこと



図 14 補正された GPS の測位結果
東京工科大学構内 約 600 [m]



図 15 補正された自律航法の測位結果
東京工科大学構内 約 600 [m]

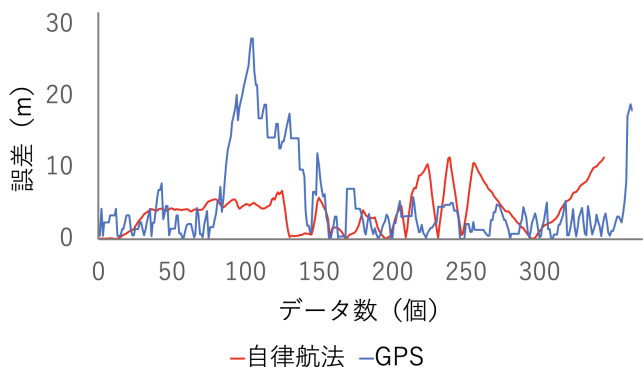


図 16 路上からの測位誤差
東京工科大学構内 約 600 [m]

から歩幅を用いた距離推定には誤差が生じると考え、議論では歩幅の補正に関し示す。

本提案による最近傍探索による補正方法を用いることで、路上の緯度経度を取得することができ、地磁気センサの変位の変化から行き止まりの検出や曲がり角の検出が可能であると考えられる。またジャイロセンサにより歩数を検知できることから、2点の座標から移動距離を算出し、歩数で除算することにより行き止まりや曲がり角までの歩幅を算出することができる。以上より、算出した歩幅を用いることで動的に歩幅を補正できると考える。

図 13 を参照するに直線的に歩行を行っているはずである場所において斜めに歩行しているように示されている箇所が存在する。これは地磁気センサによる誤差が存在すると思われる。そのことから地磁気センサの誤差およびキャリブレーション方法に関し調査する必要がある。

7. おわりに

ウェアラブルデバイスにおける位置測位として、GPS による測位の消費電力が高いという課題、および自律航法による精度が低いことを課題とし、自律航法における GPS の受信回数の低減ならびにジャイロセンサによる歩数検知、歩行ルート of 補正を提案した。本提案により、継続的な GPS 測位また、田中風助らの研究の消費電力より削減することができた。田中風助らの研究では 11 回の GPS の測位を行っていたものの本研究では最低 1 回、停止状態に限り各 1 回であった。また GPS の平均誤差 4.7 [m]、田中風助らの研究の提案手法の平均誤差 26.5 [m] の測位精度に対し、本研究における提案手法の平均誤差 3.75 [m] であり、それぞれ 25.3%、606.7%の精度の向上を示す結果となった。

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] Jimenez, A., Seco, F., Prieto, C. and Guevara, J.: A comparison of Pedestrian Dead-Reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU, *2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing*, pp. 37–42 (online), DOI: 10.1109/WISP.2009.5286542 (2009).
- [12] 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).
- [13] Kourogi, 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).
- [14] Harle, R.: A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 15, No. 3, pp. 1281–1293 (2013).
- [15] Folta, D., Gramling, C., Leung, D., Belur, S. and Long, A.: Autonomous navigation using celestial objects, *1999 Astrodynamics Specialists* (1999).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] 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).
- [21] 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).
- [22] 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).
- [23] 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).
- [24] Du, S., Sun, W. and Gao, Y.: MEMS IMU error mitigation using rotation modulation technique, *Sensors*, Vol. 16, No. 12, p. 2017 (2016).
- [25] 小林 竣, 杉本 一彦, 串田 高幸: 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, CDSL-TR-095 (2022).
- [26] 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).
- [27] 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).
- [28] Chen, P., Shang, J. and Gu, F.: Learning RSSI Feature via Ranking Model for Wi-Fi Fingerprinting Localization, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 69, No. 2, pp. 1695–1705 (online), DOI: 10.1109/TVT.2019.2959308 (2020).