

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

田中 風助¹ 杉本 一彦² 串田 高幸¹

概要: 近年、身体や衣類に装着できるウェアラブルデバイスや、動物やロボットに取り付ける小型の IoT デバイスが注目を集めている。これらのデバイスに取り付けられた GPS を利用して、歩行ルートの記録をや、動物やロボットの追跡から得られた実測値の分析に用いられる。しかし、GPS による長期的な通信は IoT デバイスのバッテリー消費が高くなるという課題がある。この課題を解決するために、デバイス上の加速度センサと地磁気センサからのデータを利用して位置測位を行う自律航法を用いて、位置情報の精度を維持しながら GPS の受信回数を減らし消費電力を削減する。GPS を接続するタイミングは、加速度センサによりユーザーの移動が検知できない場合とする。また、GPS のみの測位を行った場合と提案の手法を比較し、バッテリーの消費電力と位置の精度を比較する。その結果 GPS のみのバッテリーの消費電力に対し、提案手法は約 83 % の消費電力を削減できた。また、位置の精度は実際の位置から平均約 26.5 メートルの誤差であった。

1. はじめに

あらゆるものがインターネットとつながる IoT (Internet of Things) が日常に取り込まれてきている中、身体や衣類に装着する IoT デバイス (ウェアラブルデバイス) が注目を集めている [1]。IT 専門調査会社である IDC によると、2020 年のウェアラブルデバイス出荷台数は約 4 億 4,470 万台であり、昨年度に比べて 28.4 % 増加している [2]。ウェアラブル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。ウェアラブルデバイスは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 [3]。

ウェアラブルデバイスの機能の 1 つに位置情報の取得がある。現在の主要なウェアラブルデバイスの多くは GPS センサが組み込まれている。GPS とは、Global Positioning System の略称で、日本語では「全地球測位システム」とも訳される。アメリカが開発した衛星測位システムあり、人工衛星から発せられた電波を受信し、位置・距離・時刻を計算して、現在位置を測位する技術である。センサは GPS 位置データを継続的にサンプリングし、ユーザーのルートを正確にリアルタイムで特定できる [4]。GPS モジュールからは NMEA フォーマットの情報が送信される。

GPS による絶対位置での位置測位のほかに、ユーザーが所持したセンサから相対的に移動距離を算出する自律航法という測位手法がある [5]。図 1 は自律航法の概要である。この技術は加速度センサ・ジャイロセンサ・地磁気センサを搭載した 9 軸センサ付きのデバイスをユーザーが所持して移動することで、ユーザーの移動方向と移動距離を測り、現在地を求めることができる。また経路情報や電波の接続環境に依存しない点や、移動距離を求めるために必要なセンサはデバイスにすべて搭載されている点から、新たに測定機器を設置する必要がなく低コストで測位を行うことができる [6]。

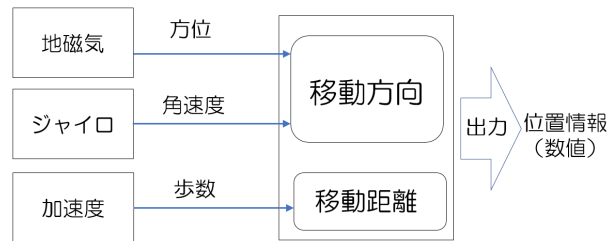


図 1 自律航法の測位方法

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

課題

GPS データを取得するためには衛星からの電波を受信する必要があるため、通信時間が長くなりウェアラブルデバイスのバッテリーに負担がかかる [7]。Kent W. Nixon

らの論文によると、そこで使用したウェアラブルデバイスでは、CPU は約 35mA、ディスプレイは約 20mA であるのに対し、GPS ユニットは約 130mA ある。本稿でマイクロコントローラーとして使用した ESP32 は 3.3V である。また、GPS モジュールの電流は約 50mA で、9 軸センサの電流は約 5mA である。ESP32 の電流は約 40mA であるため、GPS モジュールは出力電流が高いことが分かる。

GPS 通信の頻度を減らして消費電力を抑えようとした場合には、GPS データを取得する頻度も下がってしまうため、ユーザーの正確な位置情報の取得ができない。図 2 は GPS による位置取得を行ったときの位置情報のピンであり、図 3 は受信頻度を減らした場合の位置情報である。また図は、Google が提供する機能で表示したものである。これらを見ると、図 2 では歩行者がどのようなルートを進んでいったのかがはっきりとわかるが、図 3 では途中の位置情報の記録がないため、現在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、位置精度の低下を最小にしながらデバイスの消費電力を削減する手法が必要になる。



図 2 GPS による位置取得



図 3 GPS の受信回数を減らした場合

各章の概要

第 2 章では関連研究として GPS トラッキングに利用される技術や IoT デバイスの省電力手法について述べる。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や実験環境について述べる。第 5 章

では実験の評価と分析について述べ、第 6 章では提案したシステムの議論を述べる。第 7 章で研究のまとめを行う。

2. 関連研究

GPS により取得されるデータは位置情報データとして分析に用いられている。GPS ベースによる動物追跡システムの研究では、低コストで長期的に動物をトラッキングし、動物の生態についての分析を行っている。この研究では、GPS を動物の追跡技術に応用しているが、バッテリーの消費電力については考慮されていない [8]。

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。ここでは GPS のみの測位では無く、自律航法を用いた測位方法と組み合わせ、さらに Wi-Fi ネットワークを統合した車両追跡をしている。GPS のみに頼らない位置の測位が可能となっているが、ここでは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 通信の消費電力の高さについては課題が残っている [9]。

Fawaz Mohammed Jumaah らの研究では、GPS ベースバンド受信機の消費電力を削減するため、クロックゲーティング技術を利用した電力管理コントローラを提案している。これは、ロックされたチャンネルの数を最小限に抑えて位置を取得することで、約 45 % の省電力を実現できている。しかし、低電力で測定した場合の位置情報の精度についての考慮がされていない [10]。

Oscar C.Barawid Jr らの研究では、2 次元レーザースキャナーを用いた自律航法システムの開発を行っている。これは、リアルタイムアプリケーションで樹木列間を移動する自動運転車をナビゲートできる自動誘導システムを開発し、ナビゲーションセンサーとしてレーザースキャナーを使用した木の列の直線認識のみに焦点を当てている。結果は 0.11 メートルで 1.5 度の方位誤差の精度でナビゲートできている。しかし、これは自動運転車へのナビゲート手法であり歩行者への測位に対応できない [11]。

Pragun Goyal らの研究では、腰に IoT デバイスを装着し歩行者の自律航法システムについての実験を行っている。3 軸の加速度計、磁力計、ジャイロ스코プで構成される慣性測定ユニットに基づき推定している。ここでは、センサから与えられる値を拡張カンフィルタ (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 [12]。

3. 提案方式

本稿では、位置情報の精度を維持しながら GPS の使用率を削減するため、GPS の受信を行っていないときに自律航法測位を用いる手法を提案する。図 4 は提案の概要図で

ある。また、この提案を成立させるために自律航法による基礎実験を行った。

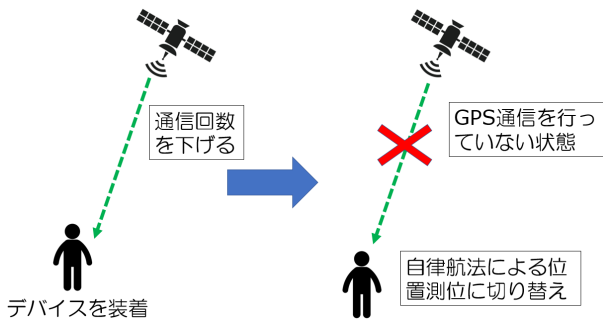


図 4 提案の概要

基礎実験

提案方式の確立のため、自律航法による測位の基礎実験を行う。本稿で行う自律航法では、加速度センサから移動距離を求め、地磁気センサから方位を求めることで、スタートの位置から移動した場所の位置情報を計測する。加速度による移動距離推定は、田中風助、杉本一彦らの「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」により推定している [13].

地磁気センサによる方位推定

移動方向を求めるために地磁気センサから方位データを取得する。地磁気センサからは地球によって生じる磁場を検知することができ、そこから方位を求めることができる。しかし、地磁気は非常に微弱であるため周りの磁場に大きく影響を受ける。図 5 は Z 軸を基準に地磁気センサを 360 度回転させたときの散布図になる。Z 軸は地球の表面に対して垂直な成分である。計測された値は、綺麗な円ができ正確な地磁気を取得できたが、中心座標が大きくずれている。この基準点がずれてしまうと方位を算出することができないため、地磁気データのキャリブレーションを行う必要がある。キャリブレーション方法は、X 軸 Y 軸それぞれの値の最大値と最小値を足して割ることで原点からのズレの値を求めることができる。そのズレの値の分それぞれの軸の方向に補正することでキャリブレーションができる。図 6 はキャリブレーションを行った後の散布図である。先ほどとは違い中心座標が原点に近づき補正がされている。

地磁気センサの方位測定には地球磁場の水平成分の決定が必要になる。この水平線分の決定により常に地球の表面に平行な、磁北を指す地磁気データを取得することができる。水平成分の決定は、式 (1), (2) により計算される [14]. X , Y , Z はそれぞれ地磁気データの X 軸, Y 軸, Z 軸を指し, M_x と M_y という水平成分に変換した値を計算して

いる。

$$M_x = X \cos \phi + Y \sin \theta \sin \phi - Z \cos \theta \sin \phi \quad (1)$$

$$M_y = Y \cos \theta + Z \sin \theta \quad (2)$$

次に、算出した水平成分の値から方位を算出する。式 (3) は三角関数より方位角 $\Delta \alpha$ を水平成分の値から求めている。

$$\Delta \alpha = \tan^{-1} \frac{M_x}{M_y} \quad (3)$$

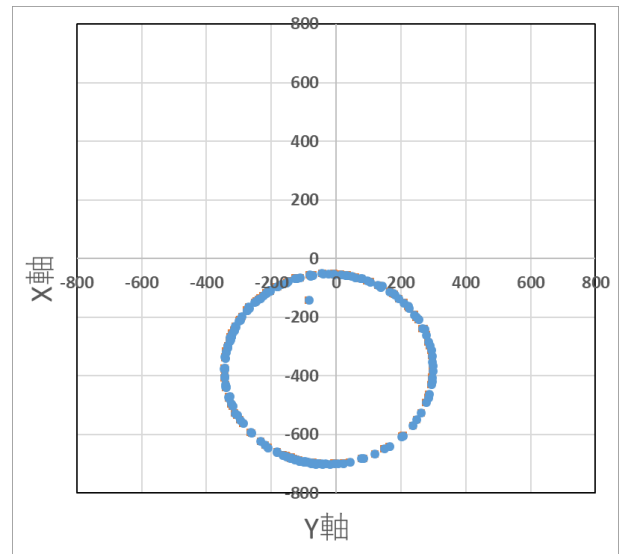


図 5 センサを回転させたときの X 軸と Y 軸の散布図

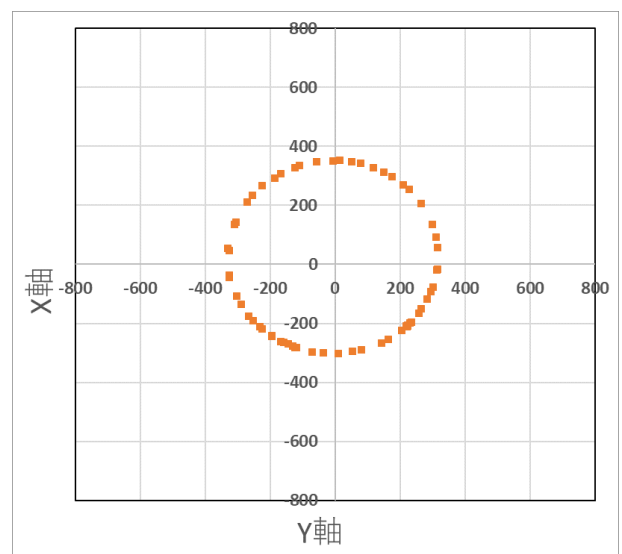


図 6 図 5 のキャリブレーション後

移動距離と方位による緯度経度の推定

これまでより加速度センサからは移動距離，地磁気センサからは方位角を算出した．この二つの値から移動した地点の緯度経度を推定する．本稿では，Vincenty 法の順解法を用いた．これは，始点の座標から方位角と移動距離が与えられた時の終点の座標を導く計算手法である．使用した GPS モジュールからは緯度経度が出力される．今回の提案では GPS と組み合わせた位置情報推定となっている．そのため緯度経度で位置情報を算出でき，互換性が生まれるため，本稿では位置情報の取得方法に順解法を使用した [15]．

基礎実験結果

自律航法を行った実験結果を示す．図は Google が提供する機能で表示したものをを使用した．歩行したルートは図 7 である．図 8 は GPS での測位結果である．GPS による測位は絶対位置での測位であるため，このような計測結果となった．それに対し，図 9 の自律航法による測位結果ではスタート地点からの相対位置で測位されているため，一度位置情報の誤差が出てしまうとそのまま誤差が広がり続けている．特に，実際に歩行したルートと比較して移動距離の算出に大きな誤差が生じている．これは歩行の検知が正確に行われていないことが原因であると考えられる．また図 10 は，実際の位置からの誤差である．GPS は誤差の値の変化が小さいが，自律航法は誤差が大きくなっている．



図 8 GPS での測位結果



図 9 自律航法での測位結果



図 7 実際に歩行したルートの座標

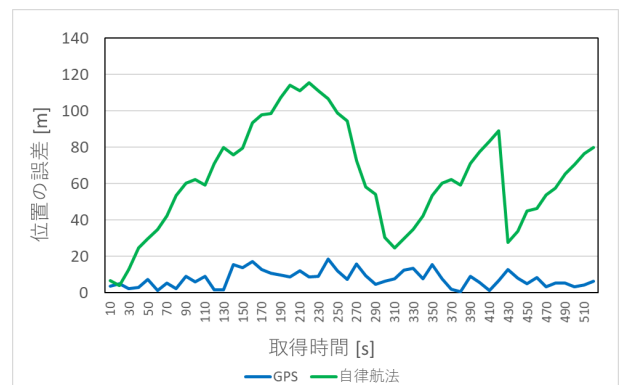


図 10 実際の位置からの誤差

提案方式

図 11 に位置情報取得の流れを示す．提案では，GPS の受信回数を最小で行い自律航法による位置取得を行う．基礎実験の結果のように，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，スタート位置からの移動距離と方位で相対的に位置を推定する．そのため，一度発生した誤差は補正を行うことができず，基礎実験結果のように移動距離が長いほど誤差の蓄積が大きくなる．誤差の蓄積を起こさないようにするには，絶対位置での位置補正が

必要となる。そこで、誤差が発生しやすいタイミングで再度 GPS を受信することにより、誤差が蓄積しないようにする。誤差が発生しやすいタイミングと GPS を再度受信させるタイミングは、田中風助、杉本一彦らの「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」の加速度センサによる移動距離推定を行った際のデータをもとに決定した [13]。加速度では規則的な歩行の検知がされるため、歩行が検知されない場合の複雑な動きによる移動を検知することができない。そのような場合に移動誤差が発生しやすい原因とし、歩行の検知がされないときに GPS を受信するタイミングとして提案している。

図 11 は位置情報取得の流れを示している。まず自律航法ではスタートの位置が必要となるため、スタートの位置情報の取得に GPS を用いる。その後、自律航法に切り替え低消費電力測位を行う。自律航法での測位の時、加速度センサによる歩行の検知がされず実際の位置との誤差が蓄積されるタイミングで再度絶対位置での位置取得を行う GPS を再度受信する。誤差が蓄積されると基礎実験結果のように GPS より誤差が広がるため、GPS により位置の補正が行われ、実際の位置からの誤差を小さくすることができる。

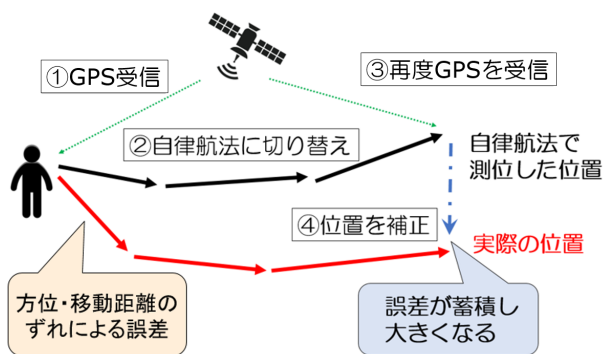


図 11 位置情報取得の流れ

ユースケース・シナリオ

図 12 は IoT デバイスの取り付け方を示した図である。ウェアラブルデバイスは、腕や衣類に取り付けることができる。本研究では図 9 のように、腕時計型のウェアラブルデバイスを想定し、計測を行った。使用するユーザーは運動中の移動データを取得し、運動分析やペース配分の分析をしたいアスリートや、老人ホームや自宅で認知症の高齢者の介護を行っている人向けに、徘徊をしてしまうお年寄りに取り付け、長期的に観察する場合を想定する。さらに、小学生の修学旅行などで迷子や誘拐が発生した際に位置情報が測定し、事件を防ぐために活用できるとも考える。

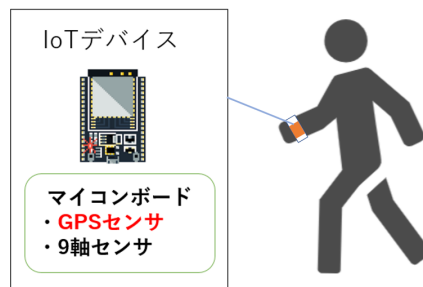


図 12 IoT デバイスの取り付け方

4. 実装と実験方法

実装

図 13 は本実験における実装図である。図に示されているように、位置情報を取得する流れは①～⑧の手順がある。

まず①では、ユーザーにセンサが搭載された IoT デバイスを装着している。②で装着されたセンサから各センサのセンサデータを取得している。取得されるデータは、BMX055 からは加速度データ、Hmc5883l からは地磁気データ、GPS モジュールからは GPS データ、INA219 からは消費電力をそれぞれ取得している。③④では、取得されたセンサデータはサーバ側にある MongoDB に送信され格納され、加速度データは移動距離計算ソフトウェア、地磁気データは方位計算のソフトウェア、GPS データは緯度経度の座標を計算するソフトウェアによって計算されている。次に⑤⑥のように移動距離と方位から自律航法測位を行い、座標計算から GPS 測位を行っている。⑦の提案手法では、自律航法測位と GPS 測位を切り替えを行っており、歩行の検知がされている場合には自律航法測位をし、歩行の検知がされていない場合には GPS 測位をしている。そこから取得される位置情報より⑧でマップに出力している。マップには Google Maps を利用している。マップの出力は位置情報計算ソフトウェアから算出された緯度経度の情報を Google Maps にインポートすることで、Google Maps に対応する緯度経度にピンを立てている。

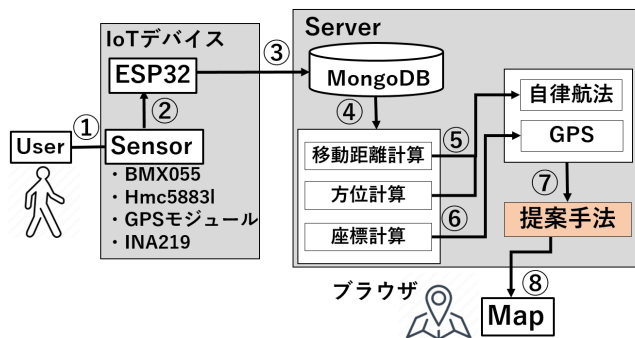


図 13 提案手法の実装図

実験環境

表 1 に本実験で使用したハードウェアと OS をまとめたものである。実装は Computer, Sensor, Module, Power supply, Server から構成されている。Computer としてはマイクロコントローラーである ESP32-WROOM-32 を使用し、MicroPython 1.14 でプログラムが書かれている。Server 側では Python 3.6.9 が使用されている。また、図 14 は実際に計測に使用した IoT デバイスである。IoT デバイスには各センサが取り付けられ、X 軸、Y 軸、Z 軸はそれぞれ図に示す方向である。

表 1 使用ハードウェア/OS

カテゴリ	ハードウェア/OS
Computer	ESP-WROOM-32
Sensor	BMX055 加速度センサモジュール
Sensor	Hmc5883l 地磁気センサモジュール
Sensor	INA219 電流/電圧/電力計モジュール
Module	GPS & GLONASS Receiver
Power supply	4000mAh リチウムイオン電池
Server	Ubuntu20.04

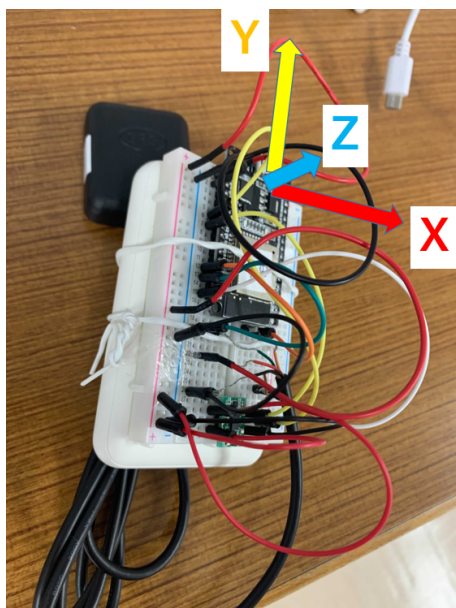


図 14 IoT デバイス

5. 評価と分析

GPS と提案手法の消費電力の比較

GPS のみの位置情報取得を行うときと提案手法での位置情報取得での消費電力を比較する。図 15, 図 16 は、それぞれ GPS の省電力と提案手法の消費電力を示している。提案手法では、自律航法に基づき GPS の受信回数を低減させている。縦軸は消費電力を示し、横軸は取得時間を示している。GPS のみの場合では常に高い消費電力であるのに対し、提案手法では GPS の受信が行われたときのみ

消費電力が高くなるのみで全体としては低い消費電力となっている。GPS では平均約 185.2mWh, 提案手法では約 32.1mWh であり、提案手法は GPS の消費電力より約 83 % の消費電力を削減できた。また GPS の受信回数は、図 15 では 200 回、図 16 では 11 回である。

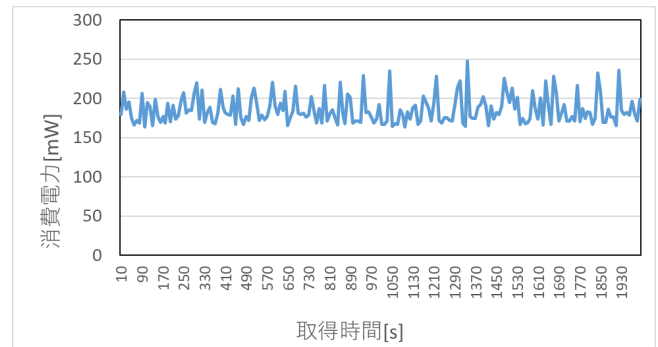


図 15 GPS の消費電力

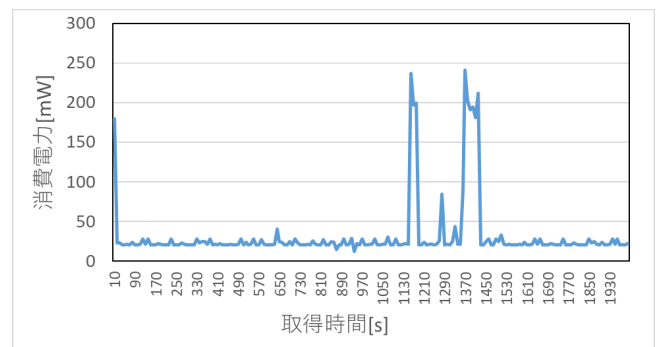


図 16 提案手法の消費電力

位置情報の精度の比較

次に位置情報の精度についての評価を行う。図 17, 18, 19 はそれぞれ GPS の測位結果、自律航法の測位結果、提案手法の測位結果を示している。図 20 は、実際の位置からの誤差である。歩行ルートは基礎実験で行った図 7 と同じルートを使用した。図を見ると、提案手法では自律航法のみでの測位と比較して歩行ルートに近いことが分かる。図 20 から、提案手法は自律航法より全体的な誤差が小さくなっている。これは GPS を歩行の検知ができないときに再度受信することで誤差の蓄積を抑えられていることである。また実際の位置とのズレを、Python の GeoPy というライブラリの機能を用いて算出し比較した。位置のズレは GPS が平均約 10.9 メートル、自律航法が平均約 55.6 メートル、提案手法が平均約 26.5 メートルであった。自律航法のみでの測位と比較すると約 29.1 メートル位置の精度が向上している。



図 17 GPS の測位結果



図 19 提案手法の測位結果



図 18 自律航法の測位結果

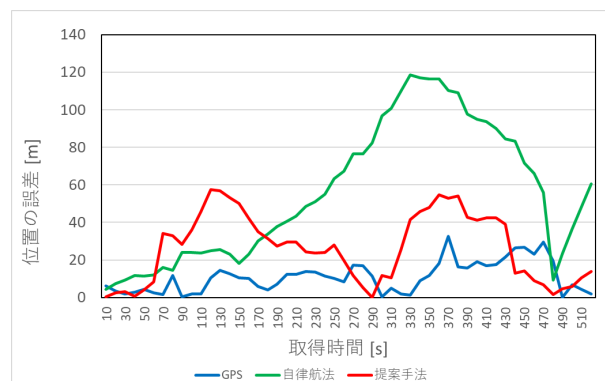


図 20 実際の位置からの誤差

6. 議論

本稿では、加速度センサによる歩行の検知ができない場合に GPS を再度受信させることで、GPS の受信回数を最小にし低消費電力で測位する方法を用いた。しかし、反対に長期的に歩行が検知される場合、再度 GPS を接続させるタイミングがないため、自律航法による誤差が蓄積され続ける。この問題を解決するには、GPS による誤差範囲を設定する。図 21 のように、GPS で位置測位をする場合にも実際の位置との誤差が発生する。GPS に発生する位置誤差を誤差範囲として設定し、自律航法による誤差がその範囲を超えた時に再度 GPS を接続させるのが良いと考える。Michael G. Wing らの研究によると、GPS による誤差範囲は周囲に建物がない環境下では約 5 メートル以内、森林の環境下では約 7 メートル以内、屋根のある環境下では約 10 メートル以内の位置精度を期待できると示してい



図 21 GPS の誤差

消費電力を本稿の実験結果の削減率で、位置の精度をより高くする手法も議論する。これは IoT デバイスを足に取り付ける事で、加速度センサによる移動距離の測定を、より高精度で行えると考えられる。本稿では IoT デバイスは腕時計型を想定しているため、腕に IoT デバイスを装着した。

しかし歩行者の腕の振りの検知が正確に行えない場合には移動距離の測定に誤差が生じることになる。歩行には足による動きが必要となる。足にIoTデバイスを装着することで、歩行を行っている状態と行っていない状態をより正確に検知し、位置の誤差を小さくする。

また、加速度センサによる歩行の検知のみを誤差が発生するタイミングとするのではなく、地磁気センサによる方位誤差も誤差が発生しやすいタイミングとして再度GPSを受信する対象にする手法も考える。地磁気センサによる方位誤差が発生すると、加速度センサによる移動距離が正確であったとしても位置の誤差が大きくなる。これは、ジャイロセンサとVincenty法の逆解法を用いる手法を提案する[15]。ジャイロセンサからは角速度を検出できる。このジャイロセンサによって角速度が検出された場合とは歩行者が歩行ルートを曲がったときである。ルートの方向転換する地点は地磁気センサによる方位が誤差を起こすと考え、GPSを2回取得する。Vincenty法の順解法では2点の座標が得られたときに、方位と移動距離を算出する計算手法である。この手法を用いることで正確な方位が取得できるのではないかと考える。

さらに、提案では加速度が検知されないときにGPSを受信しているが、これはユーザーが完全に動きを停止している場合でもGPSを受信することになる。消費電力をユーザーの動きが完全に停止されている場合に測位を行わなければ、消費電力をさらに削減できると考える。図22は加速度センサを全く動かしていない場合の加速度の値である。縦軸は加速度の値を示し、横軸は取得時間を示している。このようにユーザーが完全に停止している時の加速度の値の範囲を設定し、この値の加速度が検出されたときに測位を行わないようにする。

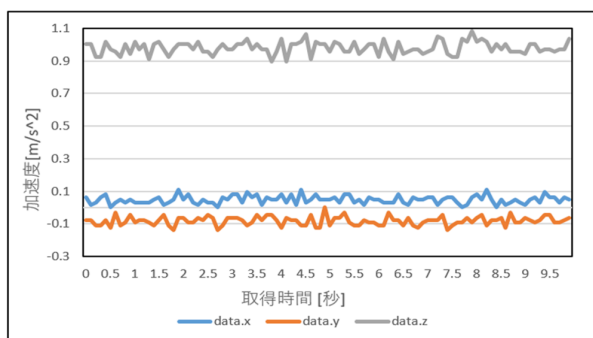


図 22 完全停止している時の加速度の値

7. おわりに

本稿では、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を、自律航法の測位情報に基づきGPSの受信回数を低減させることで、IoTデバイスのバッテリーの消費電力を低くする提

案をした。自律航法による測位の時に歩行が検知されない場合に再度GPSを受信することで誤差の蓄積をなくすことに成功した。その結果、提案の手法ではGPSでの測位のバッテリーの消費電力よりも、約83%の消費電力を削減させることができた。また、位置の精度は実際の位置より平均約26.5メートルの誤差が発生する結果となった。

参考文献

- [1] 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).
- [2] : Worldwide Wearables Market Forecast to Maintain Double-Digit Growth in 2020 and Through 2024, According to IDC (2020).
- [3] 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).
- [4] Kumar, S. and Moore, K. B.: The evolution of global positioning system (GPS) technology, *Journal of science Education and Technology*, Vol. 11, No. 1, pp. 59–80 (2002).
- [5] Jimenez, A. R., 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 (2009).
- [6] Pratama, A. R., Hidayat, R. et al.: Smartphone-based pedestrian dead reckoning as an indoor positioning system, *2012 International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, pp. 1–6 (2012).
- [7] 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).
- [8] Clark, P. E., Johnson, D. E., Kniep, M. A., Jermann, P., Huttash, B., Wood, A., Johnson, M., McGillivan, C. and Titus, K.: An advanced, low-cost, GPS-based animal tracking system, *Rangeland Ecology & Management*, Vol. 59, No. 3, pp. 334–340 (2006).
- [9] 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).
- [10] Jumaah, F. M., Hashim, S. J., Sidek, R. M. and Rokhani, F. Z.: Low power GPS baseband receiver design, *2013 4th Annual International Conference on Energy Aware Computing Systems and Applications (ICEAC)*, IEEE, pp. 65–68 (2013).
- [11] Barawid Jr, O. C., Mizushima, A., Ishii, K. and Noguchi, N.: Development of an autonomous navigation system using a two-dimensional laser scanner in an orchard application, *Biosystems Engineering*, Vol. 96, No. 2, pp. 139–149 (2007).
- [12] 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).
- [13] 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,

CDSL-TR-060, 東京工科大学 コンピュータサイエンス学部 クラウド・分散システム研究室 (2021).

- [14] Fang, L., Antsaklis, P. J., Montestruque, L. A., McMickell, M. B., Lemmon, M., Sun, Y., Fang, H., Koutroulis, I., Haenggi, M., Xie, M. et al.: Design of a wireless assisted pedestrian dead reckoning system-the NavMote experience, *IEEE transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 54, No. 6, pp. 2342–2358 (2005).
- [15] Helmert, F. R.: Mathematical and Physical Theories of Higher Geodesy, Part1, Preface and the Mathematical Theories, Technical report (1964).
- [16] Wing, M. G., Eklund, A. and Kellogg, L. D.: Consumer-grade global positioning system (GPS) accuracy and reliability, *Journal of forestry*, Vol. 103, No. 4, pp. 169–173 (2005).