

加速度センサとジャイロセンサを利用した 掃除機の弧をえがく動きにもとづく移動経路の測定

奥田 滉大¹ 中里 聖¹ 串田 高幸¹

概要: 掃除機の利用は、日常的に行われる。しかし、掃除機だけでは移動経路を知ることができないため、掃除のし忘れが発生する可能性がある。そのため、移動経路を知ることによって、掃除のし忘れを防止することができる。課題は、加速度センサのみでは掃除機の回転しながらの移動により、座標軸がずれてしまう。本提案では、加速度センサに加え、ジャイロセンサを利用し、その値を積分し角度を求め、回転を検出することを提案する。実際にセンサを掃除機に装着し、4.5[m] × 2[m]の四角形を一周し、最初の直線の3[m]地点で前後への移動を被験者2人で行った。結果として、回転を検出することは可能であったが、加速度センサから得られたデータを2階積分し、回転方向を訂正した値の平均誤差が、1.99[m], 1.65[m]となった。停止時の加速度センサの値の平均をすべての加速度から減算する訂正方法を行った結果、平均誤差が2.04[m], 2.74[m]となり、移動距離の誤差を増加させた。また、座標のデータから往復での前後移動を確認することができず、課題が残った。

1. はじめに

背景

ロボット掃除機が一般的になっている [1]。これまでに、いくつものロボット掃除機の販売が行われており、iRobot社の「Roomba」は商業的な大成功を収めている [2][3]。

また、ロボット掃除機は、地図と位置情報を利用することによって、ランダムな移動経路で掃除するよりも効率的に経路を決定することができる [4]。実際に、ロボット掃除機にはマッピング機能が搭載されているものがあり、独自のiAdaptという技術を利用したものがある*1。他の方法として、レーザー光の反射を利用したマッピングを利用したもの、超音波を利用したものがある*2*3[5]。

しかし、ロボット掃除機が一般的に販売されているとはいえ、ロボット掃除機の所有率は約10%である*4。人間が掃除機掛けを行っている割合の方が高いが、掃除機にマッピング機能は搭載されていない。そのため、掃除のし忘れ

が発生しても確認することができない。

加速度センサは、携帯電話、家庭用ゲーム機に用いられており、ニュートン第2法則(1)と、フックの法則(2)を用いて加速度を測定しており、以下のように求めている*5。

$$F = ma \quad (1)$$

$$F = kx \quad (2)$$

$$a = \frac{k}{m}x \quad (3)$$

ジャイロセンサは、ビデオカメラ、モーションセンシングに用いられており、回転の中心へ向かう場合と外側へ向かう場合で起動が変化するという、コリオリの力を用いて角速度を測定している*6*7。

課題

掃除機掛けを行う際は、掃除機のヘッドを回転しながらの移動することがある。そのため、回転運動を検出する必要がある。しかし、3軸加速度センサのみを用いた場合に回転運動を行うと、センサ自体の向きが変わり座標軸がずれてしまうため、正しい方向への加速度データを取得することができない。図1は回転運動を行っているときの加速

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

*1 アイロボットジャパン合同会社, <https://www.irobot-jp.com/press/pdf/20190219.pdf>, (閲覧日 2023/12/14)

*2 NeatoRobotics, <https://shopeu.neatorobotics.com/ja>, (閲覧日 2023/12/14)

*3 国立研究開発法人産業技術総合研究所, https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20220928.html, (閲覧日 2023/12/14)

*4 マイボイスコム株式会社, https://myel.myvoice.jp/products/detail.php?product_id=30106, (閲覧日 2023/11/20)

*5 TakayukiHoshi, <https://hoshistar81.jp/pdf/070619short.pdf>, (閲覧日 2023/12/30)

*6 SeikoEpsonCorp., https://www5.epsondevice.com/ja/information/technical_info/gyro/, (閲覧日 2023/12/30)

*7 株式会社オーバル, <https://www.oval.co.jp/techinfo/principle/coriolis/>, (閲覧日 2023/12/30)

度センサについて示す。

黒：実際の動き
青：加速度センサ [m/s²]

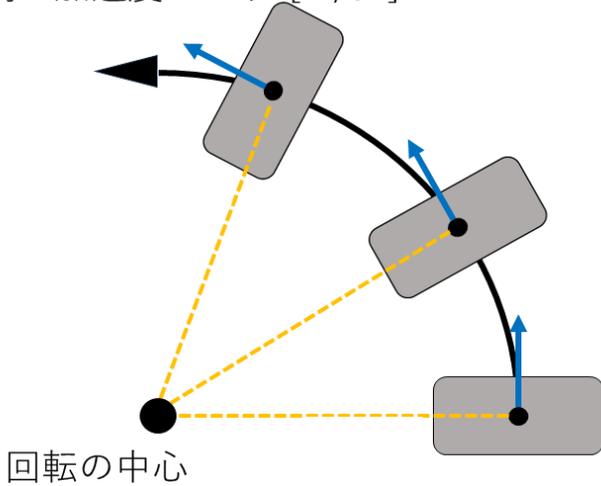


図 1 課題の概要

各章の概要

本稿は以下のように構成される。2章では、既存の提案方法を確認していく。3章では、どのようなセンサ、アルゴリズムを利用するのかを提示し、これを利用した際に生じる利点を示す。4章では、実際にどのようなセンサ、アプリケーションを利用したのかを示す。5章では、どのような条件で実験を行ったのかを示す。6章では、改善点、問題点について示す。7章では、本稿のまとめについて記述する。

2. 関連研究

加速度センサ、ジャイロセンサを用いた移動経路測定について、人間が1歩進むときに発生する周期的な特徴を利用して、移動経路を測定している [6]。人間が地面を踏み上げる運動、踏み下ろす運動がそれぞれ正の加速度、負の加速度となっている。また、角速度は、右回転、左回転で、それぞれ正負が逆転した値になっている。そのため、右回転、左回転を連続で行った際に、正弦波の形状になるという特性を利用している。しかし、掃除機掛けを行う際、その場にとどまり掃除機のみを動かす動作があるため、人間の歩調の周期性を利用することができない。また、加速度センサのみを用いた方法もある [7]。

他のセンサを用いた移動経路測定について、赤外線センサを利用した方法がある [8]。ビーコンから発される赤外線がレーザーに入る角度を利用し、到来角推定によって位置測位を行っている。事前にレーザーを最適な位置に設置する必要があり、賃貸の場合において適切な場所に設置で

きないことがある。

また、加速度センサ、ジャイロセンサ、地磁気センサを利用し、地磁気をベースとして測位を行う方法がある [9]。加速度センサ、ジャイロセンサを利用して、歩調を調べ、事前に作成した磁気のマップを利用している。しかし、掃除機を行う際は家具、家電を動かす場合があり磁界が変化し、マップに対応させることができなくなるのに加え、掃除機も磁界を発生させているため、正しく磁気を調べることができない*8。

3. 提案

提案方式

掃除機のヘッドを回転させる移動に対応した移動経路測定を行うための提案を行う。ジャイロセンサ、加速度センサを組み合わせ、移動経路を測定する。ジャイロセンサを利用して、どれだけ掃除機のヘッドが回転したのかを検出するための角速度を取得する。また、加速度センサではどれだけ直線移動したのかを検出するための加速度を取得する。これらのセンサから得たデータをもとに2階積分および補正をして、移動経路を調べる。その値を利用してグラフを描く。グラフを利用することにより、どのように移動してきたかを、数字よりも視覚的に認識することができるようにする。図2は提案の概要について示す。

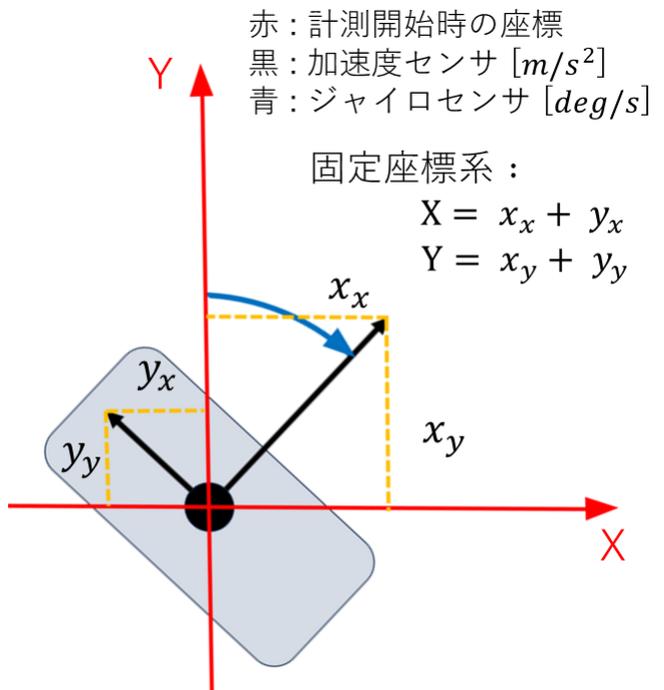


図 2 提案の概要

座標の導出手順は以下の通りである。

*8 東北電力ネットワーク株式会社, https://nw.tohoku-epco.co.jp/electromagnetic/pamphlet/pdf/denjikai_A3_200129.pdf, (閲覧日 2024/01/09)

- (1) 加速度センサから得られたデータから、センサ自体の誤差、重力加速度の値を補正する。
- (2) 補正後の加速度センサの値を2階積分し、座標へ変換を行う。
- (3) ジャイロセンサの値を積分し、その値を基に加速度センサから得た座標を回転させ、座標軸を計測開始時の座標に変換する。

ジャイロセンサで取得した角速度を積分し、初期位置からの角度の変化を求める。図3は、回転した際の軸を示す。それを利用して、掃除機のヘッドが回転した際に変化した加速度の座標を計測開始時の座標に変更する。式(4)、式(5)は加速度センサのX方向の値を計測開始時の座標に合わせて分解した値である。式(6)、式(7)は加速度センサのY軸方向の値を計測開始時の座標に合わせて分解した値である。

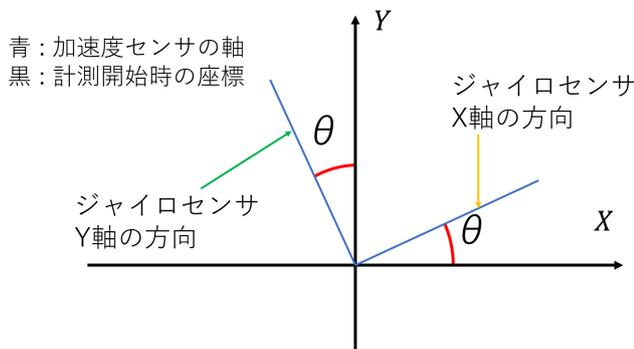


図3 回転した際の軸

$$x_x = x_{coord} \times \cos \theta \quad (4)$$

$$x_y = x_{coord} \times \sin \theta \quad (5)$$

$$y_x = -1 \times y_{coord} \times \sin \theta \quad (6)$$

$$y_y = y_{coord} \times \cos \theta \quad (7)$$

x_{coord} , y_{coord} は、加速度センサの軸でのそれぞれの座標であり、 θ は初期位置から変化した角度である。そのため、計測開始時の座標でのX軸、Y軸の座標はそれぞれ式(8)、式(9)のようになる。

$$X = x_x + y_x \quad (8)$$

$$Y = x_y + y_y \quad (9)$$

式(8)、式(9)の値を基に座標のグラフを作成することで、視覚的に移動経路を認識できるようにする。

基礎実験

加速度センサの補正方法は、事前に測定したX、Y軸方向に約1.76[m](江戸間の大きさ)移動させた結果をもとに、実際に移動させた距離と、センサから取得されたデータを

2階積分し得られた距離の差を利用して、値の修正を行う。

図3は掃除機を0.5[m]前後に移動させた時に修正を行わなかった場合の誤差について示す。センサ自体の誤差、センサの傾きによる重力加速度の影響を受け、2階積分を行った際に図4のような負の移動をし続けるグラフになる。加えて、1つの波が約0.2[m]の振幅になっており、実際よりも移動距離が小さい値になっている。

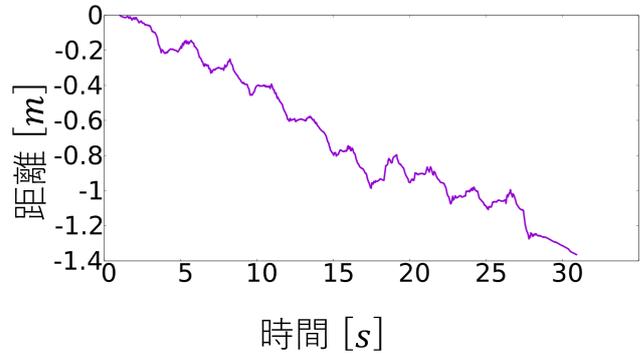


図4 前後移動時の加速度を2階積分した場合の移動距離

また、停止状態の誤差計算する必要がある。図4は停止時に加速度を計測した際の0~1.5秒の値を示す。図5で示されている通り、センサから得られる加速度データが停止状態においても大きく変化している。そのため、加速度の取得頻度に大きな間があり、値が大きく変化している0から0.8秒を除いた最初の0.8秒から1.5秒を、掃除機が停止しているときの加速度の誤差とし、その間の平均をとり、すべての実測値からその値を減少させる。

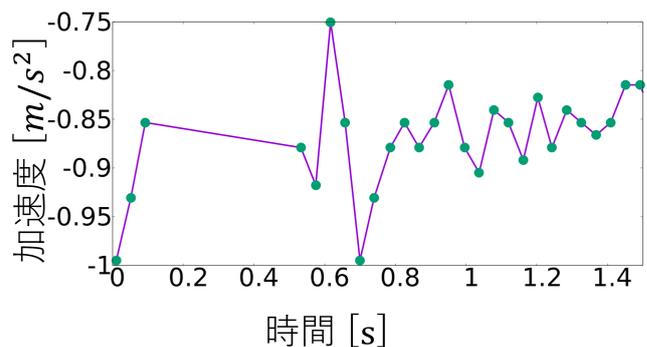


図5 停止時の加速度

図6は前後移動のデータから、停止時の加速度の平均を減少させて訂正したグラフを示す。

1.76[m]の移動の結果として、加速度の2階積分、値の訂正を行った際、加速度センサから得られる値は実際の移動距離よりも小さい値になった。図7,8はそれぞれX、Y軸方向のグラフであり、加速度センサの値を2階積分し、値の訂正を行ったグラフを示す。

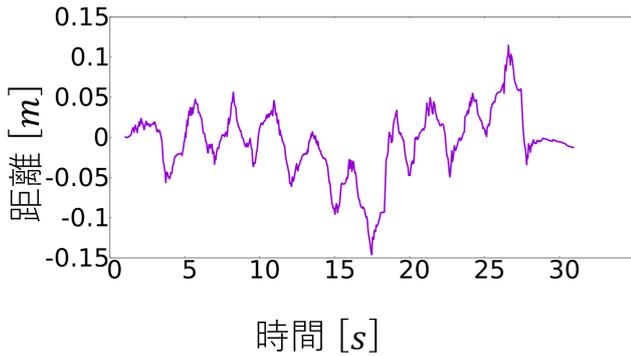


図 6 訂正後の前後移動のグラフ

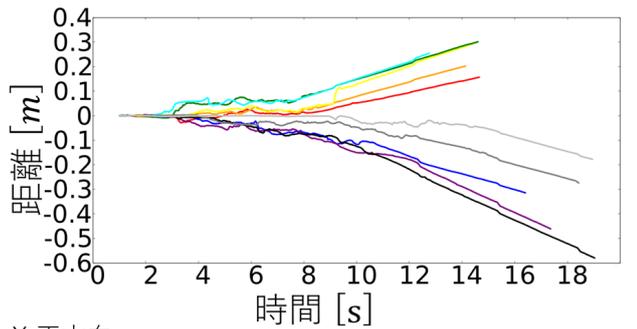


図 7 X 軸の座標

X 軸座標において、移動終了時の座標の平均は、正方向 0.06[m]、負方向 0.11[m]であった。ともに実際の移動距離よりも小さいのは同じであるが、それぞれ距離の値が約 2 倍異なっている。

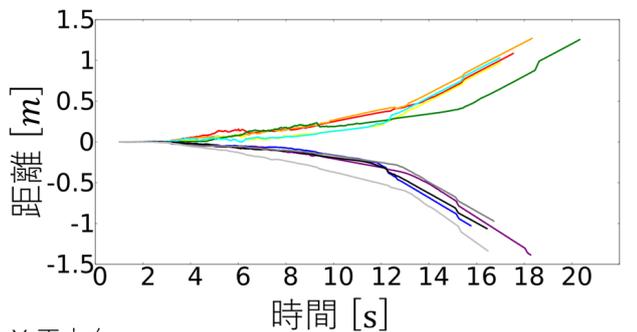


図 8 Y 軸の座標

Y 座標においては、正方向 0.16[m]、負方向 0.16[m]であった。これは四捨五入を行った結果であり、厳密には異

なっているが、X 軸のような約 2 倍の差はみられない。

また、基礎実験の結果から、加速度センサから得られたデータを大きくする必要があることが分かる。

ユースケース・シナリオ

掃除機をかける際に利用する。掃除機は移動経路を知ることができないため、掃除のし忘れが発生する可能性がある。また、ごみが多い場所は、何度も掃除機を往復させる必要がある。そのような場所は意識して覚えるか、その都度中断してその場を掃除しなければならない。そのため、意識が他の部分に向いてしまうことになるが、人間は 2 つのタスクを同時に行うことはできないとされている [10]。しかし、本提案を利用することで移動経路を知ることができる。マッピング時に引かれる線の密度が明らかに低い場所は、掃除機の移動経路に含まれていないことが分かる。そのため、掃除機がかけられていない場所に気づくことができ、掃除のし忘れを防止することができる。また、意識することなく掃除機を往復させている場所を知ることができ、掃除機を往復させている場所のものを移動、減らすことができる。図 9 にユースケースの概要を示す。

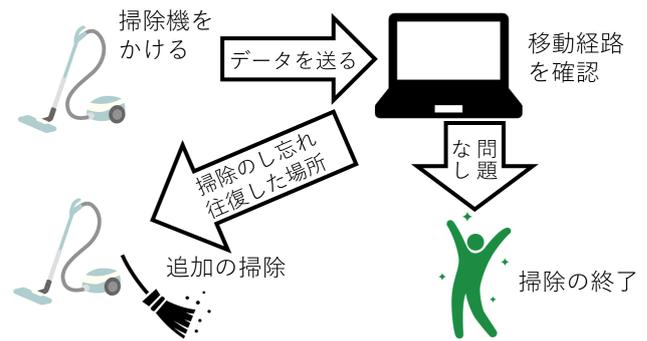


図 9 ユースケースの概要

4. 実装

加速度センサ、ジャイロセンサでのデータを取得する。

センサが得た 3 軸加速度データ、3 軸角速度データおよび、ESP32 で測定した時刻をテキストデータとして保存する。センサデータの取得、時刻の測定、テキストデータへの出力は、MicroPython を用いた。

テキストデータの値を 2 階積分し、座標データへの変換する。変換した座標データを線でつなぐグラフを作成する。テキストデータを座標データへ変換する際は C 言語を用い、座標データを確認するため、グラフにする際は gnuplot を用いた。図 10 は実装の概要を示す。

ESP32 の処理

加速度センサ、ジャイロセンサからのデータ取得は while 文で行っており、1 回の取得の後に `time.sleep(0.03)` を用い

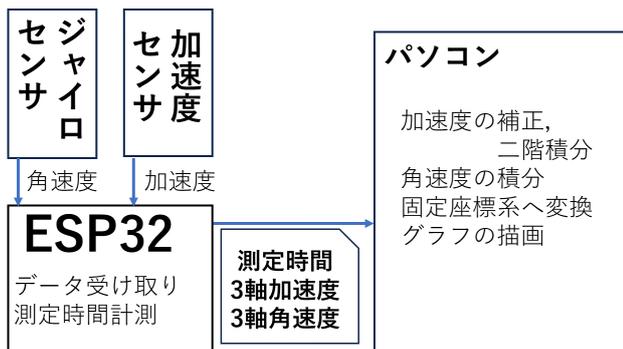


図 10 実装の概要

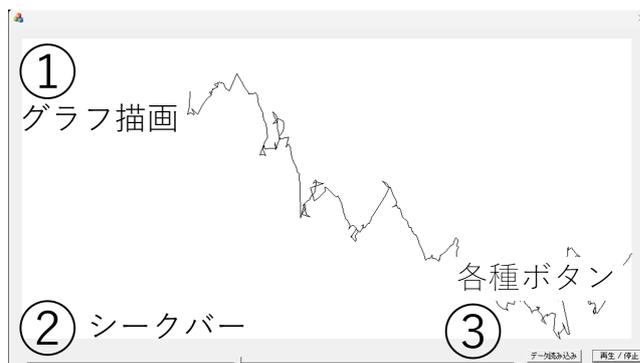


図 12 アプリケーション

て 0.03 秒の間隔を持たせている。測定時間の計測は、データの取得を開始した時間と、それぞれのデータを取得した時間の差をとり、経過時間として測定を行っている。また、これらのデータをテキストデータとして出力を行っている。

パソコンの処理

Y, X 軸の加速度を補正, 2 階積分を行い, Z 軸角速度を積分し, 加速度を計測開始時の座標に合わせる。積分の際に用いる時間変化量は, 1 つ前のデータとの時間の間隔を利用して積分を行う。図 11 は加速度センサのそれぞれの軸について示す。

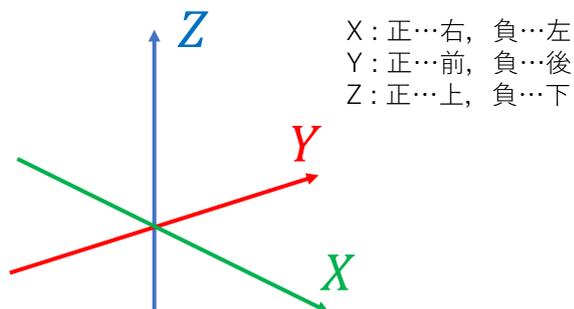


図 11 加速度センサの軸および対応する方向

アプリケーション

アプリケーションは, Microsoft Foundation Class を利用して作成を行った。

ESP32 から取得したデータを処理したテキストデータを読み込み, そのデータを基にしてグラフを描画する。グラフの軸は縦軸が計測開始時の座標の Y 軸, 横軸が計測開始時の座標の X 軸となっている。これにより, 前後左右の移動を視覚的に伝える。図 12 はアプリケーションの画面を示す。

①…グラフ描画

白色の範囲がグラフの描画範囲となっている。読み込んだテキストデータの最大値, 最小値が描画範囲の端になっている。

描画を開始すると, 最初の座標データから線が引かれて

いき, 最後のデータを描画し終わった後に, 画面がリセットされ, 白色に戻り, 最初から描画が開始される。

描画の更新頻度は 0.01 秒となっており, 測定した際の時間約 3 秒間のデータを 1 秒間で描画することになっている。

②…シークバー

描画が全体のどこまで行われたかを示すものとなっている。左端が開始地点で, 右端が終了地点となっている。

シークバーを動かすことによって, どこから再生するかを選択することも可能となっているが, 描画を停止しないと動かすことができない。また, 停止している間に動かして, 特定の時間までの描画を確認することができる。

③…データ読み込み, 再生/停止

左側のボタンでテキストデータの読み込みを行う。ボタンを押した際に出現するウィンドウから描画を行いたいテキストデータを選択することで, データの読み込みおよび, 描画範囲の設定が行われる。この操作は, 描画を停止していないと行うことができない。

右側のボタンで描画の開始, 停止を行うことができる。テキストデータが読み込まれていない場合, データが存在していない場合は再生を行うことができない。

5. 評価実験

実験環境

IoT デバイスとして Espressif Systems 社の ESP32 を使用した。ESP32 に 2 つのセンサ, KXM52-1050(加速度センサ), L3GD20H(ジャイロセンサ) を接続し加速度および角速度を取得する。

掃除機のヘッドに ESP32, 加速度センサ, ジャイロセンサを設置する。

4.5[m] × 2[m] の四角形を移動し, 最初の直線の 3[m] 地点で立ち止まり, 掃除機のヘッドを前後させる。また, 計測開始地, 終了地点を同じ場所に設定する。図 13 は移動経路を示す。

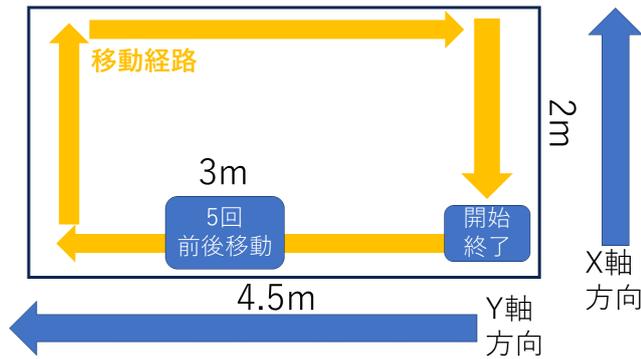


図 13 移動経路

スマートフォンで撮影した実際の動きの映像と、グラフでの位置情報が一致しているのかを確認する。

移動の際は、常に掃除機のヘッドが地面についた状態で行う。また、測定開始最初の2秒は、停止状態の誤差を測定するために停止した状態を保つ。

取得した加速度センサのデータを2階積分、ジャイロセンサのデータを積分し、gnuplotでグラフ化して位置の変化をそれぞれ確認する。

2人の被験者のデータを比較して、個人差を調べる。

実験結果と分析

加速度センサを2階積分したのみのグラフと、ジャイロセンサの値を積分した角度を利用し、加速度センサの値を計測開始時の座標に合わせて2階積分を行った際のグラフを以下に示す。図14は加速度センサのみのグラフを示し、図15は加速度センサ、ジャイロセンサを利用したグラフを示す。

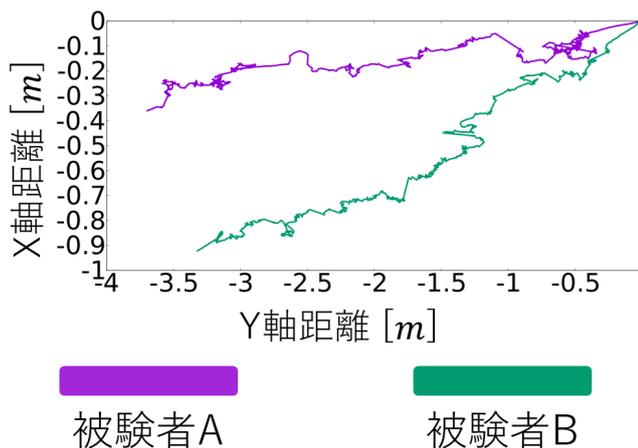


図 14 加速度センサ

加速度センサのみを用いて測定を行った場合は、移動経路のような回転している部分を確認することができないのに対し、加速度センサに加え、ジャイロセンサを利用して測定を行った場合は、線で囲われた空間ができており、回転した運動に対応していることが分かる。

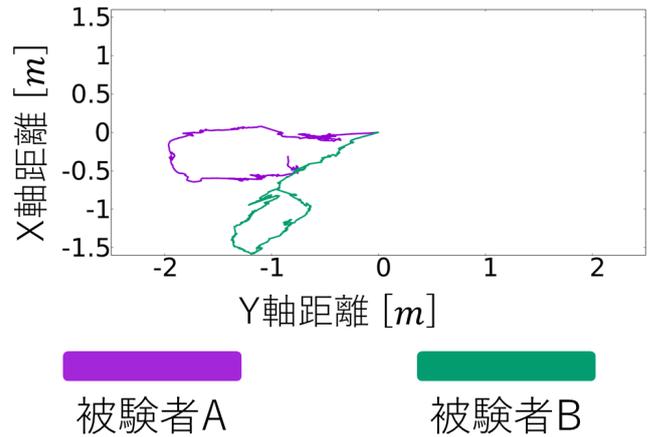


図 15 加速度センサ+ジャイロセンサ

しかし、掃除機を前後に往復させている場所の判断は、どちらのグラフからも確認することができない。また、基礎実験で取得したデータよりも、実際の移動距離との違いの割合が小さく、基礎実験で得たデータから移動距離の訂正ができないのに加え、進行方向とは逆の向きにデータが進んでいることが分かる。

座標の正負を反転させ平均誤差を求めた結果、被験者Aは1.99[m]となり、被験者Bのグラフは測定開始時の座標を回転させた後に求めた結果、1.65[m]となった。

図16は計測開始時の掃除機の向きを示す。図15において、被験者Bのグラフが斜めになっているのは、計測開始時の掃除機のヘッドの向きが影響している。測定開始時の加速度センサのX、Y軸が、計測開始時の座標に設定されるため、図16からわかるように被験者Bの方は掃除機の向きと進行方向が一致しておらず、斜めのグラフが表示される。



図 16 計測開始時点の掃除機の向き

図17は、加速度センサの値を訂正として最初の0.8~1.5秒をすべての加速度から引いたグラフを示す。

2つのグラフにおいて共通性が見られず、被験者Aのグラフにおいてはセンサの進行方向の向きが訂正されているが、移動経路とも関係性が見られない。

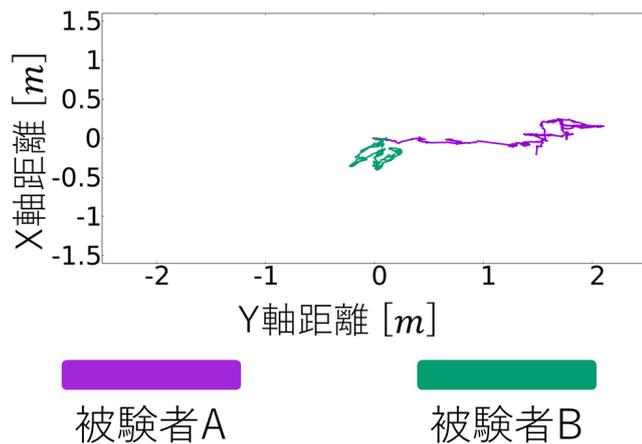


図 17 加速度センサ訂正後

平均誤差を求めた結果、被験者 A は 2.04[m] となり、被験者 B のグラフは訂正前と同様の処理を行い求めた結果、2.74[m] となり、訂正前の値より誤差が大きくなっているためこの方法は適切ではないことが分かる。

6. 議論

本提案では掃除機が地面についている移動にしか着目しておらず、実際の掃除機掛けの際に行うヘッドを空中に向けての移動に対応していない。センサが地面から離れた場合、Z 軸以外にも回転運動がかかり、X、Y 軸の加速度だけでは移動経路を調べることができない。また、地面と平行にセンサを設置する必要があり、平行に設置できなかった時に、掃除機のヘッドが回転を伴う運動を行った場合、Z 軸以外の回転運動も含めて回転を検出して計測開始時の座標に加速度センサの値を訂正する必要があり、本提案では正しく軸を合わせることができない。そのため、計測開始時から 3 軸の角速度を利用してヘッドがどのような方向へ回転したかを求め、それを基に計測開始時の座標軸へ 3 軸の加速度を変換する必要がある。

実験結果から、本提案の訂正方法では加速度センサの値を適切な結果にすることができず、方向転換が行われたこと以外の移動経路を調べることができず、掃除のし忘れの判断、掃除機を往復させた場所を知ることができないことが示された。そのため、加速度センサの値のみを使用して移動距離を求めるのではなく、他のセンサを利用して、移動距離の訂正を行う必要がある。

7. おわりに

加速度センサのみでは、掃除機のヘッドの回転を伴う動きを検出することができないという課題のため、加速度センサに加え、ジャイロセンサを利用して回転運動を検出することを提案した。移動距離は加速度センサの値を 2 階積分した値を利用する。その値をジャイロセンサの値を積分して求めた角度と組み合わせて計測開始時の座標を算出す

る。計測開始時の座標に合わせる際には、計測開始時の座標から見た加速度センサの軸の角度を基に、加速度センサの X、Y 軸加速度を計測開始時の座標の X、Y 軸に分解し、それを対応した軸に合わせて足し合わせた。結果として、平均誤差が 1.99[m]、1.65[m] となった。また、停止時の加速度の平均をすべてのデータから引いて結果を訂正した場合の平均誤差が 2.04[m]、2.74[m] となり、訂正方法が適切ではないことが示された。計測開始時の座標によって座標をグラフとして表示することにより、回転した場所を視覚的に認識できるようにした。

参考文献

- [1] Murdan, A. P. and Ramkissoon, P. K.: A smart autonomous floor cleaner with an Android-based controller, *2020 3rd International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering (ELECOM)*, IEEE, pp. 235–239 (2020).
- [2] Hasan, K. M., Reza, K. J. et al.: Path planning algorithm development for autonomous vacuum cleaner robots, *2014 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, IEEE, pp. 1–6 (2014).
- [3] Jones, J. L.: Robots at the tipping point: the road to iRobot Roomba, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 13, No. 1, pp. 76–78 (2006).
- [4] Kuo, B.-W., Chang, H.-H., Chen, Y.-C., Huang, S.-Y. et al.: A light-and-fast slam algorithm for robots in indoor environments using line segment map, *Journal of Robotics*, Vol. 2011 (2011).
- [5] Ong, R. and Azir, K. K.: Low cost autonomous robot cleaner using mapping algorithm based on internet of things (IoT), *IOP conference series: materials science and engineering*, Vol. 767, No. 1, IOP Publishing, p. 012071 (2020).
- [6] Kouroggi, M. and Kurata, T.: A method of pedestrian dead reckoning for smartphones using frequency domain analysis on patterns of acceleration and angular velocity, *2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium-PLANS 2014*, IEEE, pp. 164–168 (2014).
- [7] 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)*, IEEE, pp. 1–6 (2012).
- [8] Arai, T., Yoshizawa, T., Aoki, T., Zempo, K. and Okada, Y.: Evaluation of indoor positioning system based on attachable infrared beacons in metal shelf environment, *2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, IEEE, pp. 1–4 (2019).
- [9] Kim, S.-E., Kim, Y., Yoon, J. and Kim, E. S.: Indoor positioning system using geomagnetic anomalies for smartphones, *2012 International conference on indoor positioning and indoor navigation (IPIN)*, IEEE, pp. 1–5 (2012).
- [10] Pashler, H.: Dual-task interference in simple tasks: data and theory., *Psychological bulletin*, Vol. 116, No. 2, p. 220 (1994).