

# ヒアラブル端末による PDR 測位での首振り動作推定手法

田村 洸樹<sup>1</sup> 浅井 宏斗<sup>1</sup> 西尾 信彦<sup>1</sup>

**概要:** 屋内における自己位置推定方法として Wi-Fi 測位や BLE 測位, PDR などがある. 特に PDR は加速度・ジャイロセンサのみを用いて初期位置からの相対位置を推定できる. また, 近年ではヒアラブル端末の普及が進み, 耳に装着した加速度・ジャイロセンサを用いた頭部姿勢推定の研究が盛んに行われている. そこで本研究では, ヒアラブル端末で得られるセンサデータのみを用いた頭部姿勢を考慮した PDR の実現を図る. センサを頭部に装着すると, センサデータに首振り動作が加わり, PDR の進行方向推定に影響が出る. 歩行時の両耳にかかる加速度の差を利用し, 首振り動作を推定する. ヘッドホンの左右のスピーカ一部に加速度・ジャイロセンサを装着した端末を作成し評価をした. 評価の結果, 首振り動作推定精度は 88.0%となり, 首振り動作の F 値が 0.87, 首振り以外の動作の F 値が 0.89 となった. 首振り動作の推定結果を PDR に反映し, ヒアラブル端末で得られるセンサデータを用いた PDR を実現した.

KOKI TAMURA<sup>1</sup> HIROTO ASAI<sup>1</sup> NOBUHIKO NISHIO<sup>1</sup>

## 1. はじめに

GPS(Global Positioning System) を搭載した携帯端末の普及により, 端末の位置情報を収集することが容易になった. Google Maps<sup>\*1</sup>や PokemonGO<sup>\*2</sup>など, GPS 測位を利用したサービスも数多く登場し, 発展を続けている. しかし, GPS 測位は衛星電波を利用するため, 屋内では電波が届きにくく, 測位誤差が大きくなってしまう. このような欠点を補うために, GPS を利用しない自己位置推定手法が提案されており, 例としてはアクセスポイントからの受信信号強度の違いを利用する Wi-Fi 測位や BLE 測位がある [1][2]. Wi-Fi 測位や BLE 測位には, 電波マップの作成やビーコンの設置といった整備コストがかかる一方, GPS の測位結果と同様に絶対位置を推定することができる. また, もう一つの例として, 端末に搭載された加速度, ジャイロセンサを利用する PDR(Pedestrian Dead Reckoning) がある [3][4][5]. PDR は端末を腰や胸ポケットに固定し, 加速度センサで歩数, ジャイロセンサで進行方向を推定し, それらを累積して現在位置を推定する手法である. GPS の測位結果と異なり, 初期位置からの相対的な位置しか推定でき

ないが, 端末に搭載されたセンサのみを用いるので, 整備コストがかからないメリットがある. また近年では, 端末を身につけて持ち歩くウェアラブル端末の普及が進み, 耳に装着するウェアラブル端末であるヒアラブル端末が多数商品化されている. さらに左右独立型のイヤホン端末が流行し, Apple 社のイヤホン端末である AirPods<sup>\*3</sup> には, 左右の端末それぞれに加速度センサや近接センサが搭載されるようになった. ウェアラブル端末に搭載されているセンサを利用することで身体情報の取得が容易になり, ユーザの身体情報を用いたサービスの研究が盛んに行われている. 商品化されているデバイスの一つに JINS MEME<sup>\*4</sup>がある. JINS MEME は 3 点式眼電位センサ, 3 軸加速度センサ, 3 軸ジャイロセンサが搭載された眼鏡型端末で, ユーザの視線や瞬き, 頭部姿勢が計測できる. 人は興味のある対象に顔を向ける性質があるため, この情報を用いるとユーザが興味を向けている方向, 対象が推定できる. 頭部に装着する端末は頭部の動作や顔の向きを推定できるが, 顔の向きと進行方向が異なる場合に進行方向を正しく推定することができない. そこで本研究では, 進行方向と顔の向きが変わる動作である首振りを推定することで進行方向推定を補正し, ヒアラブル端末で得られるセンサデータのみを用い

<sup>1</sup> 立命館大学 情報理工学部

<sup>\*1</sup> <https://www.google.co.jp/maps/>

<sup>\*2</sup> <https://www.pokemongo.jp/>

<sup>\*3</sup> <https://www.apple.com/jp/airpods/>

<sup>\*4</sup> <https://jins-meme.com/ja/>

た PDR の実現を図る。歩行時の両耳にかかる加速度の差を利用し、首振り動作を推定する。ヘッドホンの左右のスピーカー部に加速度・ジャイロセンサを装着した端末を作成した。両耳に設置した加速度、ジャイロセンサのデータを用いて首振り動作区間の抽出を行い、PDR 時の進行方向推定への反映を行う。

## 2. 関連研究

### 2.1 頭部装着型デバイスと胴体部装着型デバイスを用いた研究

Takahashi ら [6] は身体姿勢に対する相対的な頭部姿勢の推定をリアルタイムに行うウェアラブルセンサデバイスを提案した。デバイスは頭部装着型デバイスと胴体部装着型デバイスの二種類があり、頭部装着型デバイスにジャイロセンサと IR マーカー、胴体部装着型デバイスにジャイロセンサとマーカートラッカーが搭載されている。胴体部装着型デバイスのジャイロセンサで歩行時の進行方向推定を行い、頭部装着型デバイスのジャイロセンサで頭部姿勢推定を行う。IR マーカーとマーカートラッカーはジャイロセンサのドリフト誤差を補正するために用いられる。しかし、この手法では胴体部と頭部のそれぞれにデバイスを装着する必要があり、ユーザの負担が大きい。

### 2.2 頭部装着型デバイスのみを用いた研究

坂本ら [7] は頭部装着型デバイスのみを用いた PDR における進行方向推定手法を提案し、PDR の精度向上を図った。歩行中に端末の回転を検知した前後で端末にかかっている加速度の水平成分の変化量を比較し、変化量が大きい場合は首振り、小さい場合は方向転換として判別する。首振りと判別した場合は、進行方向を修正する。しかし、この手法では首振りと方向転換の判別精度が約 5 割と低く、頭部装着型デバイスによる PDR の測位精度の誤差低減に繋がらなかった。

## 3. 提案手法

### 3.1 検出原理

本システムは歩行時の両耳にかかる加速度の差を利用し、首振り動作の検出を行う。歩行動作における両耳の加速度の向きについて図 1 に示す。図 1 は歩行者を真上から俯瞰した略図である。直進および、曲進の際は加速度の向きが等しいが、首振り動作の際は両耳にかかる加速度の向きが反転する。この違いを両耳に装着した加速度センサを用いて推定を行う。

### 3.2 システム概要

本システムは加速度・ジャイロ複合センサ (InvenSense 社製 MPU-6050) 2 個、ヘッドホン 1 個、Arduino UNO、

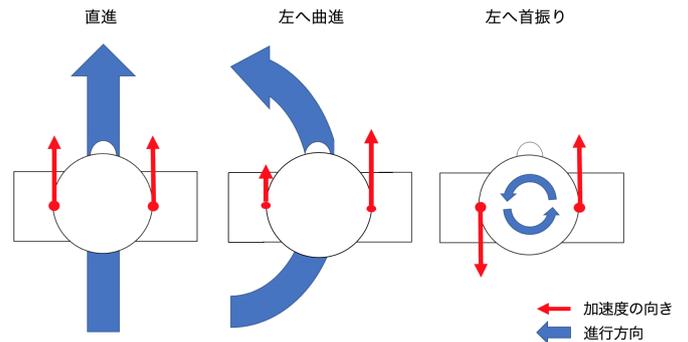


図 1 歩行動作における両耳の加速度の向き

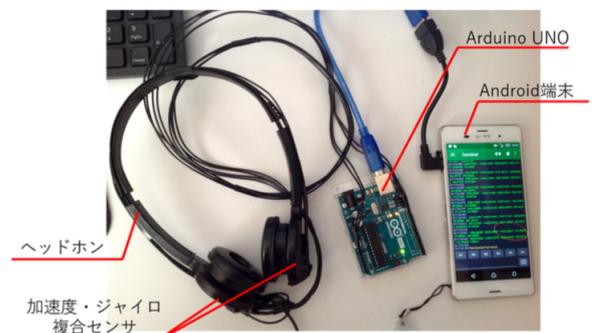


図 2 システムの構成

Android 端末 (ソニーモバイルコミュニケーションズ社製 Xperia Z3) で構成する。システムの構成を図 2 に示す。PDR に必要な加速度と角速度および、両耳にかかる加速度を取得するために、ヘッドホン型加速度・ジャイロセンサ端末を作成した。加速度・ジャイロ複合センサ 2 つをヘッドホンの左右のスピーカー部に装着し、Arduino UNO と I2C 通信で接続する。また、Arduino UNO は Android 端末と USB 接続し、センサの出力値をシリアル通信を介して、Android 端末で受信、保存する。保存したセンサデータを用いて、PC 上で推定を行う。センサデータのサンプリング周波数は 100Hz である。

### 3.3 軸の定義

右側センサ、左側センサにおいてユーザの水平かつ正面方向をそれぞれ  $Y_r, Y_l$  軸、水平かつ左側方向をそれぞれ  $X_r, X_l$  軸、垂直上向き方向をそれぞれ  $Z_r, Z_l$  軸と定義する。

### 3.4 推定手法

首振り動作の推定には、両耳に設置した加速度センサの差の変化を利用する。2 つの加速度センサから  $Y_r, Y_l$  軸のデータを取得し、その差を用いて首振りの推定を行う。データの処理の流れを図 3～図 5 に示す。

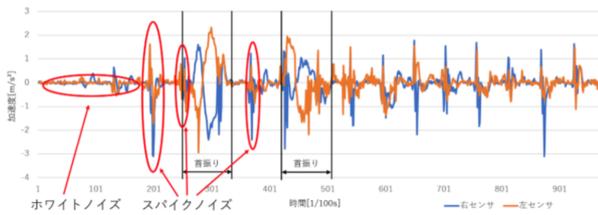


図 3 両センサの正面方向の加速度とノイズ

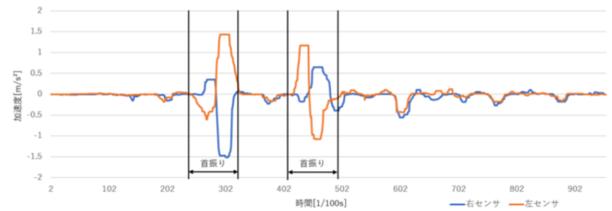


図 4 両センサの正面方向の加速度 (ノイズ除去後)

### 3.4.1 座標変換

提案手法では地面に対して水平面の加速度と角速度を使用するため、センサ端末の姿勢を推定する必要がある。静止時は 3 軸加速度計から得られたデータの合成を重力加速度と近似できるため、重力方向による姿勢推定が可能である。しかし、歩行時は歩行の振動による加速度が加わるため、重力加速度として近似ができず、重力方向による姿勢推定ができない。そのため水平面に対するデバイスの傾きをリアルタイムに求める必要がある。そこで加速度と角速度を組み合わせて、歩行時の姿勢制御を行う Madgwick[9]の手法を用いる。Madgwickらは加速度から重力方向を求められない場合に、角速度を用いて補完することにより、歩行動作による影響を最小限に抑えた姿勢推定を実現している。この姿勢推定法から加速度と角速度を水平面を基準として回転させることで、地面に対して水平な面の加速度と角速度を取得する。

### 3.4.2 ノイズ除去

ユーザの正面方向である  $Y_r, Y_l$  軸のデータには、首振りや方向転換時の加速度の他に、センサ自体の感度と誤差によるホワイトノイズと、歩行時の振動によるスパイクノイズが含まれる。この二つのノイズは首振り動作の推定に不要なため、ローパスフィルタとメディアンフィルタを用いて除去を行う。

### 3.4.3 首振り動作の推定

首振り動作の推定には 2 つのセンサの加速度の差を利用する。 $Y_r$  から  $Y_l$  を引いた波形を図 5 に示す。この波形から首振り動作区間の切り出しを行うために、首振り動作の開始と終了を検出する必要がある。首振り動作区間の切り出しの流れを図 6 に示す。本システムでは加速度の差の値が  $0.03\text{m/s}^2$  以上、または  $-0.03\text{m/s}^2$  以下になったタイミングを開始、 $-0.03\text{m/s}^2$  以上、 $0.03\text{m/s}^2$  以下になったタイミングを終了とし、区間を切り出す。そして区間に含まれる値が  $0.25\text{m/s}^2$  以上、または  $-0.25\text{m/s}^2$  以下になった場合、その区間を首振り動作区間と推定する。

## 3.5 PDR との統合

前節の手法で首振り動作と推定した時点のジャイロセンサの値を 0 で上書きすることにより回転を消去する。これにより首振りによる進行方向推定の誤りを補正する。

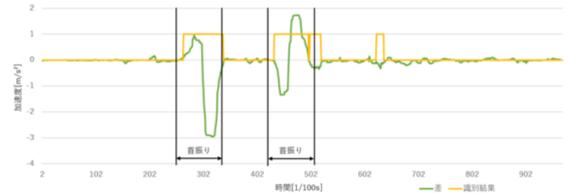


図 5 両センサの正面方向の加速度の差

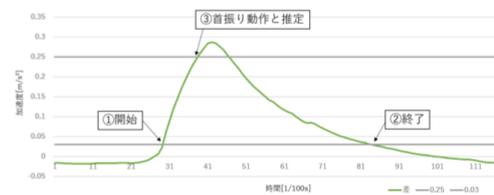


図 6 首振り動作区間の切り出しの流れ

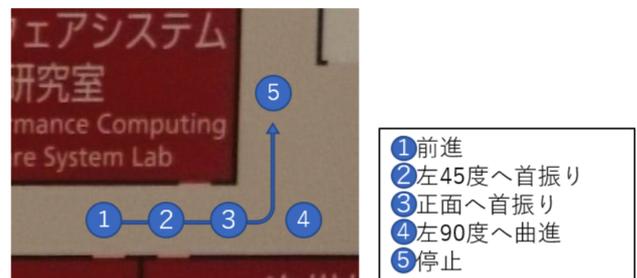


図 7 実験環境および歩行動作

## 4. 評価

### 4.1 実験

歩行時の首振り動作の加速度および角速度データを収集するため、作成した端末で実験を行った。実験環境は立命館大学びわこくさつキャンパス・クリエーションコア 5F の廊下であり、図 7 の番号 1 を開始点とし途中で首振り動作を行いながら歩行した。正解ルートは開始地点から直進した後、左方向に方向転換を伴う曲進を行い、その後直進するルートである。さらに開始地点から方向転換の間に首振り動作を 2 回行う。10 回歩行を行い、142 秒のデータ (14286 サンプル) を収集した。

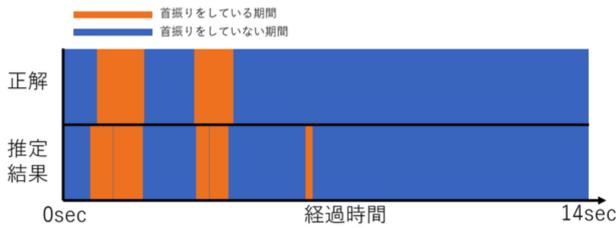


図 8 時系列順の推定結果 (回転速度高)

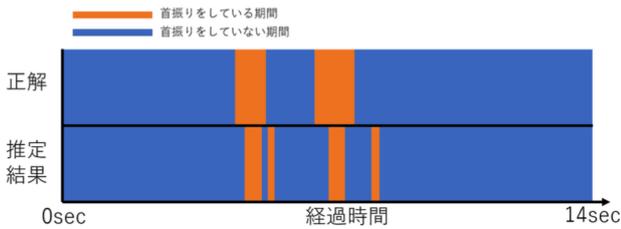


図 9 時系列順の推定結果 (回転速度低)

表 1 推定結果

	首振り (正解)	首振り以外 (正解)
首振り (推定)	1325	54
首振り以外 (推定)	344	1615

#### 4.2 首振り動作の推定精度

首振り動作の開始, 終了時の回転速度が早い場合と遅い場合における首振り動作の推定結果を時系列順に表したグラフを図 8, 図 9 に示す. 図に示すとおり早い場合に比べ低い場合のほうが推定精度が低くなっており, 図 9 では首振り動作の推定区間が正解ラベルに比べてかなり狭くなっている. これは回転速度が遅く, 左右のセンサの加速度に差が生まれなかったことが原因と考えられる. また, どちらの図においても, 正解から離れた区間で誤推定が起きている. これはノイズ修正時に除去しきれなかったノイズによって判定を誤ったことが原因と考えられる. 歩行時の着地による振動は踏み込みの強さや, 身体を經由し頭が揺れるまでの加速度の減衰などで変動するほか, 左右のセンサでも違う値を取るため, メディアンフィルタでの完全な除去はできなかった. 次に首振り動作の推定結果を表 1 に示す. サンプル数は 3338 データである. 推定精度は 88.0% となった. 首振り動作の推定は正解が 1325 に対し不正解が 54 であり, 概ね正解しているが, 少し誤推定も発生している. 首振り動作以外の推定は正解が 1615 に対し不正解が 344 であり, 推定ミスが目立つ. 誤推定の理由としては前述のとおり, ノイズ除去の失敗と首振り動作の開始, 終了時の回転速度が遅いことが原因と考えられる. それぞれのラベルごとの F 値を表 2 に示す. 首振り動作の推定の F 値は 0.87, 首振り以外の動作の F 値は 0.89 となり, どちらも高い推定率を得る結果となった.

表 2 推定結果の F 値

	F 値
首振り	0.87
首振り以外	0.89

表 3 推定結果 (128.6deg/s)

	首振り (正解)	首振り以外 (正解)
首振り (推定)	528	11
首振り以外 (推定)	163	639

表 4 推定結果の F 値 (128.6deg/s)

	F 値
首振り	0.85
首振り以外	0.88

#### 4.3 PDR 歩行軌跡

収集した歩行動作を既存の PDR と提案手法を適応した PDR の測位結果を図 10 に示す. 既存の PDR では首振り動作による角速度の変化が進行方向推定に反映されてしまうため, 首振り動作時に進行方向が変わってしまっている. 本手法を用いた PDR では首振り動作による角速度の変化を反映させないため, 首振り動作時に進行方向が変わらず, 正解ルートにより近い結果を出力した. しかし首振り推定精度が低いデータを用いた PDR の測位結果では, 曲進動作の一部を首振り動作と誤推定し, 回転が反映されなかったことが原因と考えられる. 本手法を用いることで, 既存の PDR に比べ概ね正解ルートに近い測位結果を得た.

#### 4.4 推定可能な首振り動作速度

本手法では両耳にかかる加速度の差を用いて首振り動作の推定を行うため, 首を振る速度が遅くなると加速度の差が小さくなり, 正しく推定できなくなる. よって本手法がどの速度まで対応できるか実験を行った. 首を 90 度回転する際にかかる時間を計測し, 回転速度ごとの推定結果の F 値を表 3~表 8 に示す. 128.6deg/s の場合は首振りの F 値が 0.85, 首振り以外の F 値が 0.88 となり, 推定可能な速度と言える. 次に 90deg/s の場合は首振りの F 値が 0.48, 首振り以外の F 値が 0.73 となり, 首振りの F 値が 0.5 を下回った. 最後に 69.2deg/s の場合は首振りの F 値が 0.30, 首振り以外の F 値が 0.70 となり, 最も低い推定率となった. 128.6deg/s 以上は十分な推定精度を保てるが, 128.6deg/s ~ 90deg/s の間で推定精度が徐々に落ち, 90deg/s 以下は首振りの推定精度が 0.5 を下回り, 信頼できない推定精度となる. 本手法で対応可能な限界速度は 90deg/s である.

表 5 推定結果 (90deg/s)

	首振り (正解)	首振り以外 (正解)
首振り (推定)	256	0
首振り以外 (推定)	536	759

表 6 推定結果の F 値 (90deg/s)

	F 値
首振り	0.48
首振り以外	0.73

表 7 推定結果 (69.2deg/s)

	首振り (正解)	首振り以外 (正解)
首振り (推定)	110	1
首振り以外 (推定)	472	581

表 8 推定結果の F 値 (69.2deg/s)

	F 値
首振り	0.30
首振り以外	0.70

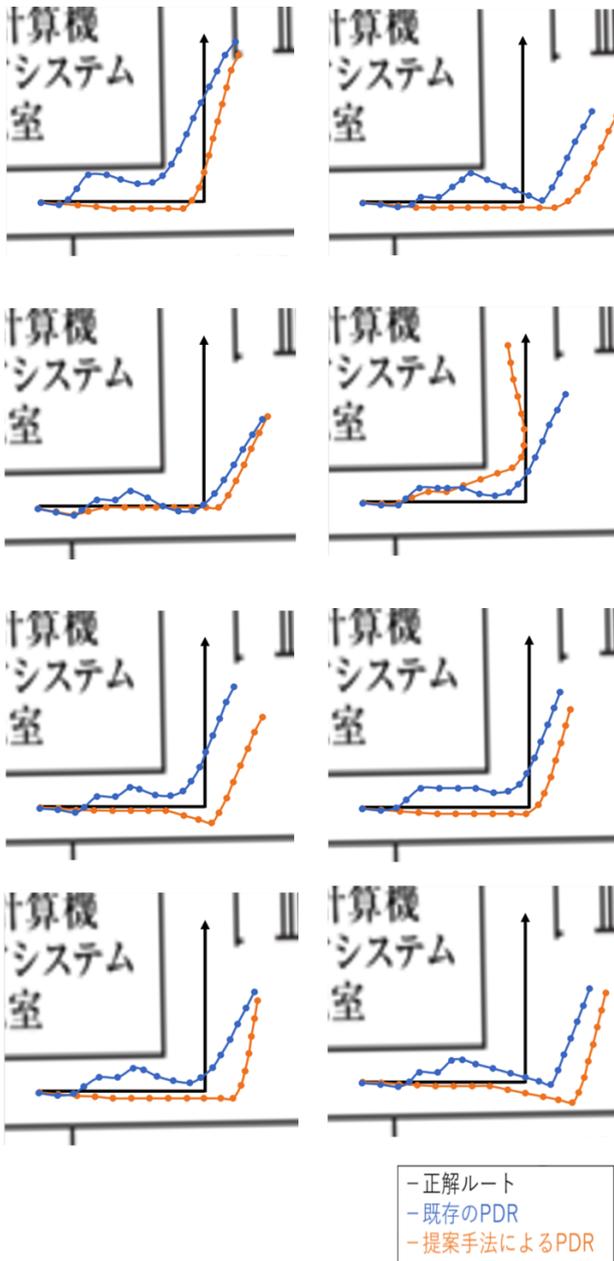


図 10 PDR 軌跡

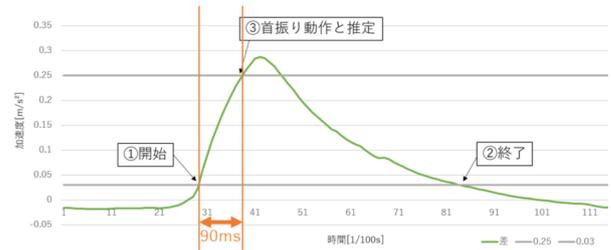


図 11 90deg/s で回転した際の首振り動作推定の遅延

#### 4.5 遅延

本手法では、加速度データのノイズ除去時や、首振り動作の推定時に遅延が生じる。ノイズ除去の際にメディアンフィルタを用いるが、フィルタ幅を 21 データとしているため、10 データ分未来の値が必要になり、遅延時間は 100ms となる。首振り動作は波形が  $0.03\text{m/s}^2$ 、 $-0.03\text{m/s}^2$  を跨ぐタイミングを開始、終了のトリガーとし、区間を切り出す。そして区間に含まれる値が閾値を越えた場合、首振り動作と推定する。つまり開始から閾値を越えるまでの時間が遅延時間となる。本手法で対応可能な限界速度は  $90\text{deg/s}$  のため、 $90\text{deg/s}$  で回転した際の首振り開始から閾値を超えるまでの時間が最大遅延時間となる。 $90\text{deg/s}$  で回転した際の加速度の差を図 11 に示す。 $90\text{deg/s}$  で回転した際の遅延は 9 データだったため、最大遅延時間は 90ms となる。以上より、本手法でデータを収集してから推定結果を出力するまでには 190ms の遅延時間が必要になる。

## 5. 結論

### 5.1 まとめ

本研究では、ヒアラブル端末を用いた首振り動作の推定手法を提案した。首振り動作を推定する既存研究には、頭部装着型デバイスと胴体部装着型デバイスを用いた研究や、頭部装着型デバイスのみを用いた研究があることを述べた。頭部姿勢推定にPDRを併用する場合、既存のPDR手法では首振り状態に対応していないため、適用できない。センサを頭部に装着すると、センサデータに首振り動作が含まれてしまうため、PDR時の進行方向推定に首振り動作を考慮する必要があることを述べた。そこで、両耳に加速度・ジャイロセンサを搭載した端末を作成し、首振り時の両耳にかかる加速度の差を利用することで首振り動作の推定を行い、PDR測位時の進行方向推定に対する補正を行った。評価の結果、首振り動作のF値が0.87、首振り以外の動作のF値が0.89、全体の推定精度は88.0%となった。これらのことから、ヒアラブル端末から得たデータを用いて首振り動作の識別が可能であることを確認した。それをもとに補正を行ったPDRの測位結果は既存の手法で行った場合よりも正解ルートに近いものとなった。

### 5.2 今後の課題

#### 5.2.1 ノイズ除去

本手法では、着足時の振動による加速度を除去するためにメディアンフィルタを用いた。メディアンフィルタは突発的なノイズの除去に適しているが、着足時の振動の一部は振動の区間が長く完全に除去できなかった。メディアンフィルタ以外の着足時の振動を除去できるフィルタリングアルゴリズムを再検討する必要がある。

#### 5.2.2 進行方向推定

本手法におけるPDRの進行方向推定は首振り動作推定時に回転を消去し、直前の進行方向を利用する補正を行っている。しかし、この手法では曲進時に首振り動作を推定すると進行方向推定に誤りが生まれ、測位精度が落ちてしまう。首振り動作推定時の角速度の値を無効化するのではなく、首振り動作推定時の直前の角速度を定数として代入することで、曲進時の進行方向推定を補正できる可能性がある。

## 参考文献

- [1] M. Alfakih, M. Keche, and H. Benoudnine. Gaussian mixture modeling for indoor positioning wi systems. In 2015 3rd International Conference on Control, Engineering Information Technology (CEIT), pp. 1 – 5, May 2015.
- [2] A. Ozer and E. John. improving the accuracy of blue-tooth low energy indoor positioning system using kalman filtering. In 2016 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), pp. 180 – 185, Dec 2016.
- [3] Koji Makita, Masakatsu Kourogi, Tomoya Ishikawa, Takashi Okuma, and Takeshi Kurata. Pdrplus: Human behaviour sensing method for service field analysis. pp. 25 – 30, Springer Japan, Tokyo, 2014.
- [4] M. Kourogi and T. Kurata. method of pedestrian dead reckoning for smart phones using frequency domain analysis on patterns of acceleration and angular velocity. In 2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium PLANS 2014, pp. 164 – 168, May 2014.
- [5] Shun Yoshimi, Kohei Kanagu, Masahiro Mochizuki, Kazuya Muraio, and Nobuhiko Nishio. Pdr trajectory estimation using pedestrian-space constraints: real world evaluation. nAdjunct Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers, UbiComp/ISWC'15 Adjunct, pp. 1499 – 1508, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [6] Keisuke Takahashi, Hideki Kadone, and Kenji Suzuki. Head orientation sensing by a wearable device for assisted locomotion. Proceedings of the 2nd Augmented Human International Conference. ACM, p. 16, 2011.
- [7] 坂本侑佑, 村尾和哉, 望月祐洋, 西尾信彦. 頭部装着型端末を用いた pdr における頭部回転を考慮した測位手法. マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2015) シンポジウム, 2C-2, pp. 319 – 325, 2015.
- [8] 根岸拓郎, 藤田悟. スマートフォン上の軽量 v-slam と pdr の連携. マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2016) シンポジウム, pp. 777 – 781, 2016.
- [9] S. O. H. Madgwick, A. J. L. Harrison, and R. Vaidyanathan. Estimation of imu and mag orientation using a gradient descent algorithm. In 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 1 – 7, June 2011.