

# 複数のピエゾ素子を用いた振動による人の室内動線検出の検討

秋山 真哉<sup>1</sup> 吉田 誠<sup>1</sup> 森山 由美子<sup>1</sup> 近藤 裕介<sup>1</sup> 諏訪 博彦<sup>2</sup> 安本 慶一<sup>2</sup>

概要：振動センサを床面に取り付け、振動の強弱や振動フィンガプリントを測定・解析することで振動源の位置を特定する研究がなされている。振動センサに着目すると、出力される情報は振動の強弱のみであり、振動源が振動センサに近いか、遠いかを表す情報しか得られなかった。よって振動センサに対して、人がどの方向から来てどの方向へ通り過ぎたかという歩行方向や、複数人が振動センサの前で交差するように通り過ぎるといった行動を推定することは困難であった。そこで、本稿ではピエゾ素子を一定間隔に2つ配置した振動センサ対を用いて床面の振動をとらえ、得られた信号を短時間フーリエ変換する前処理によって特徴量を算出し、機械学習によって歩行方向や複数人の交差を推定するという手法を提案する。実験では床にピエゾ振動センサ対を設置し、その前を人が通り過ぎるといった試行を行った。さらに、異なる歩行方向の信号データを合成することで、疑似的に複数人の交差の信号データを生成し、分析した。その結果、歩行方向や複数人の交差を高い精度（83%）で推定できた。

キーワード：歩行方向推定 振動センサ

## 1. はじめに

近年、見守りサービスや防犯上の異常検知への応用へ向け、家屋や店舗内での人の行動を特定する研究が様々な方法でなされている。しかしながら必要以上に情報量を得ることが可能なカメラを用いた行動の特定はプライバシーの問題があり、先行する柏本らの研究<sup>1,2)</sup>では、この問題を解決するため床面にピエゾ振動センサを取り付け、場所や行動によるユニークな振動パターンである振動フィンガプリントと、振動の強度の変化を用いてユーザーの位置を特定している。

ここで、ピエゾ振動センサから出力される情報は振動の大きさの強弱のみで、人がセンサに近づく、あるいは遠ざかる移動については検出可能であったが、振動センサ周辺を人が通り過ぎた場合については、振動センサに対して人がどの方向から来てどの方向へ通り過ぎたかという歩行方向の情報を得ることは困難であった。また、複数人が振動センサの前で交差するように通り過ぎるといった行動（以下、複数人の交差とする）の判別も難しい。

一般に、移動方向の情報を得るには、複数のセンサを用いて到来時間差（TDoA：Time Difference of Arrival）や到来角度（AoA：Angle of Arrival）から位置を推定し、その連続的な時間変化によって移動方向の推定を行う等の手法<sup>3)</sup>が考えられる。

そこで、床面にピエゾ振動センサを2つ取り付けてTDoAによる歩行者の位置推定を試みたが、歩行による振動波が歩行者から近い振動センサに到達するまでの時間に比べ、遠い振動センサに到達するまでの時間の方が短いという予想に反する結果が得られた。これは振動センサを取り付けた床が様々な材料を組み合わせで出来ているため、振動媒体の密度や弾性率が様々でなく、振動の伝搬速度も様々ではないためであると考えられる。

そこで、様々ではない振動の伝搬速度の情報を含む振動

信号から特徴量を抽出することで歩行方向を推定する検討を行った。

以下、本稿では、2章で振動センサシステム構成と歩行方向推定の提案手法、またそれらの効果を示す実験結果と考察、3章で全体的なまとめについて論じる。

## 2. 歩行方向の推定

### 2.1 床面の振動波の伝達速度

実際の床面に伝わる振動波の速度は音の速さ<sup>4)</sup>によると、音速を  $c$  [m/s]、体積弾性係数  $\kappa$  [Pa]、密度  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] とすると

$$c = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}}$$

で表される。材質により体積弾性係数や密度が異なることが分かる。

家屋の床面の構造は、異なる材質のはりや、板、接着剤などを組み合わせて作られている。そのため床面の振動は複数の構造材料を介して伝わり、構造材の構成も場所により様々で、振動波が床面を伝わる速度は場所により様々ではない。よって複数のセンサに振動源から振動波が到達する時刻を用いて振動源の位置を推定することは困難である。

### 2.2 振動センサシステム構成

図1は床面の振動をとらえる振動センサのシステム構成である。2つのピエゾ振動センサを任意の間隔に配置し、それをセンサ対とする。各センサから出力される電圧信号をアンプで増幅してUSBインターフェイスにて音声信号としてサンプリングする。このとき2つのセンサ信号のクロストークを低減するため、振動センサ用それぞれにアンプを設けたバイアンプ構成とし、電源も2つのセンサにつ

1 オンキヨー株式会社 開発部

2 奈良先端科学技術大学院大学

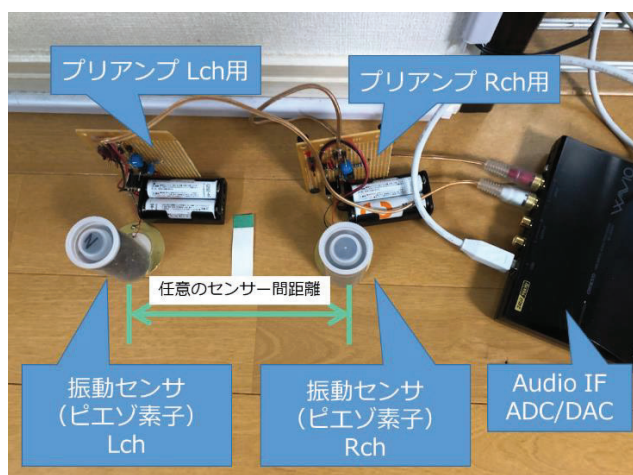


図1 振動センサシステムの構成

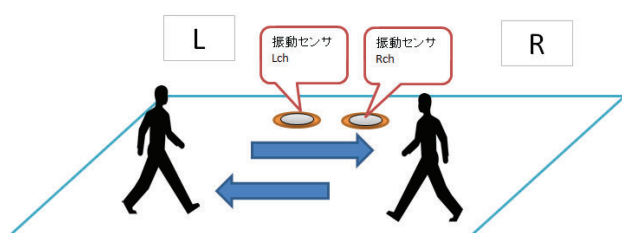


図2 振動センサ対設置状態と歩行方向

いてそれぞれセパレートして設けるように工夫した。

アンプは低ノイズ化を図るため FET を並列接続して電流増幅率を高め、定数には金属皮膜抵抗を使用している。

### 2.3 スマートハウスでの歩行振動の確認

図2は大学が所有するスマートハウスのフローリング床にピエゾ振動センサを任意の間隔にならべて、直線歩行する実験の模式図である。本論での事前検討として、2つの振動センサを、それぞれのセンサが重ならず、かつなるべく最小の間隔になるよう設置し、歩行者は2つの振動センサを並べた線と平行方向に、図中R側からL側へ向かって歩く動作と、L側からR側へ向かって歩く動作を行った。

図3は床面のR側からL側へ歩行したときの振動波形の代表例である。図3中の区間(a)を拡大した波形は、歩行者が図2のセンサ対R側にいる時の歩行1歩の振動である。この拡大波形を確認するとLchの振動波形にくらべて67サンプル、Rchの振動センサの振動波形の位相が先行していることが分かる。

次に、図3区間(b)を拡大した波形は、歩行者がL側にいる時の歩行1歩の振動である。波形の位相を見ると、振動源である歩行者と振動センサとの距離は、センサRchよりもLchの方が近いにも関わらず、Rchの方が14サンプル分先行している。

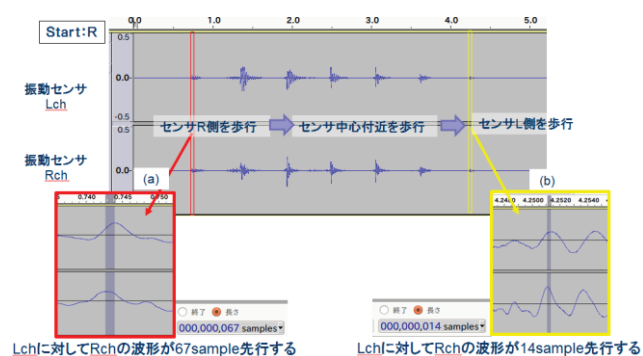


図3 床面R側からL側への人の歩行による振動波形

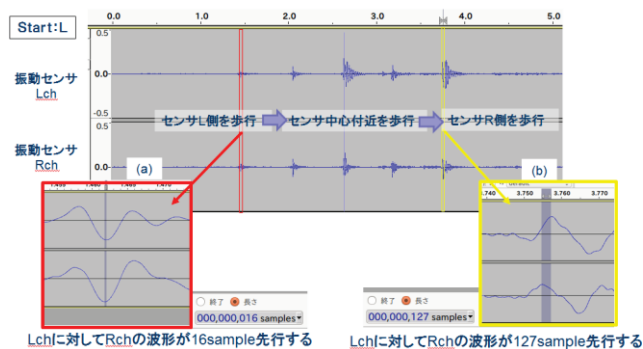


図4 床面L側からR側への人の歩行による振動波形

信号の記録サンプリングレートは48kHzであるため、歩行者から遠いはずのRchの振動センサが、約292[μs]早く振動をとらえている。これは2.1節で述べた通り、床の構造により振動波の伝達経路による速度差が生じているためと推測される。L側を歩行している時と、R側を歩行している時を比べると、Lchの信号波形よりもRchの信号波形がより先行しているため、歩行者がR側に近くなったという相対的な情報は含まれていると考えられる。

図4は図3とは反対に歩行者がL側からR側へ向かって歩行した場合の信号波形である。この場合も歩行者がL側を歩行している時(図4(a)の拡大波形)において16サンプル、R側を歩行している時(図4(b)の拡大波形)において127サンプル、Rchの信号波形がLchの信号波形に比べ先行している。

このように、振動センサに届いた信号は床面の状態の情報を含んでおり、単純な振動波伝達の時間差の情報だけで振動源の位置を特定することが難しいことが確認できた。

### 2.4 歩行方向推定の手法

まず、図5(a)に示すように2つのセンサから得られた信号のうち一通りの歩行行動が収まる1試行5.5秒間の波形に対し、分割数n=8192としてSTFT(短時間フーリエ変換)を行うことで、同図(b)に示すような振動センサごとのスペクトログラムを作成する。

次に、同図(c)のように同時間軸上の全周波数のパワースペクトルを総和して、信号のエネルギーの時間的変化であ

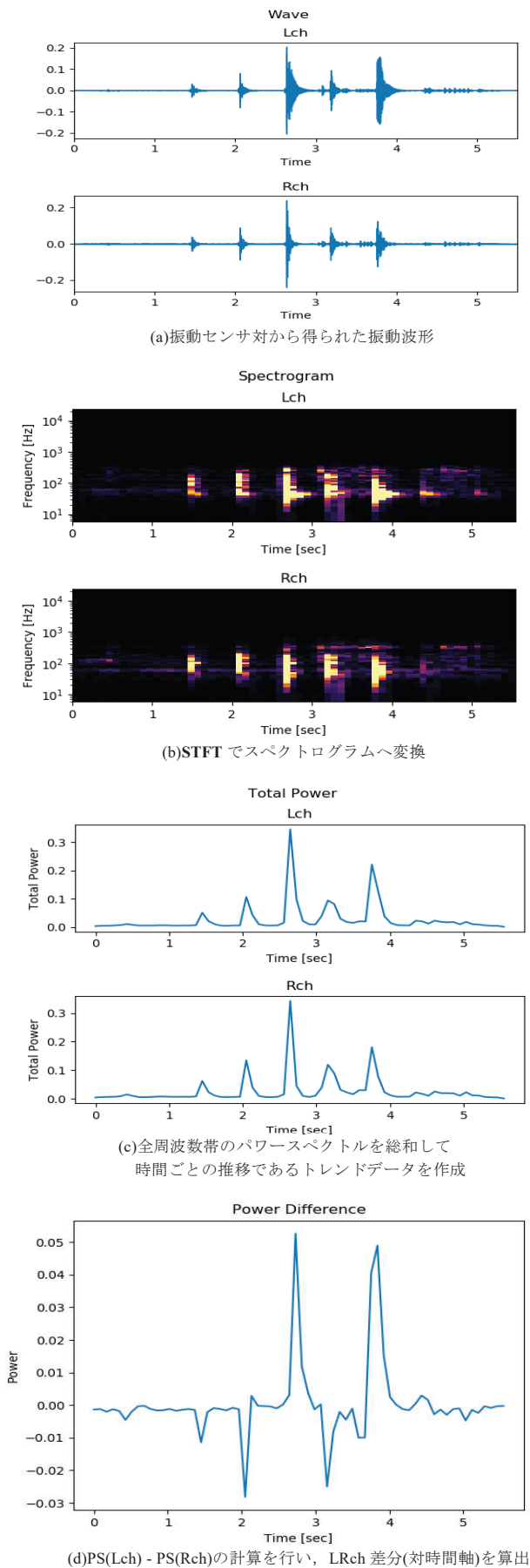


図5 センサ信号を用いた特徴量抽出の前処理

るトレンドデータを作成する。

最後に、作成したトレンドデータを同図(d)に示すように(センサ Lch のトレンドデータ)-(センサ Rch のトレンドデータ)の演算を行うことで 2 つのセンサから得られた信号の差分データを作成する。この差分データに対して線形判別分析 (LDA : Linear Discriminant Analysis) を行い、特徴量の抽出と分類を行う。ここまでの処理を用意した教師データ群とテストデータ群に行った後、k 近傍法を用いて各テストデータが、教師データ群のどのクラスに分類されるかを予測する。

## 2.5 実験とデータの作成

2 つの振動センサを、それぞれのセンサが重ならず、かつなるべく最小の間隔になるよう設置し、歩行者は 2 つの振動センサを並べた線と平行方向に、図中 R 側から L 側へ向かって歩く動作と、L 側から R 側へ向かって歩く動作をそれぞれ 20 回行い、収録データに 1 から 20 のナンバリングを行った。また、L 側から R 側への歩行 (図 6) と R 側から L 側への歩行 (図 7) の収録データに加えて、それぞれの信号を合成することで疑似的にセンサの前を 2 人の歩行者が交差する波形データを作成した。(図 8)

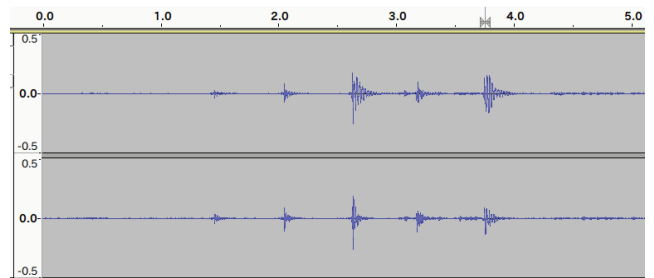


図6 床面 L 側から R 側への人の歩行による振動波形

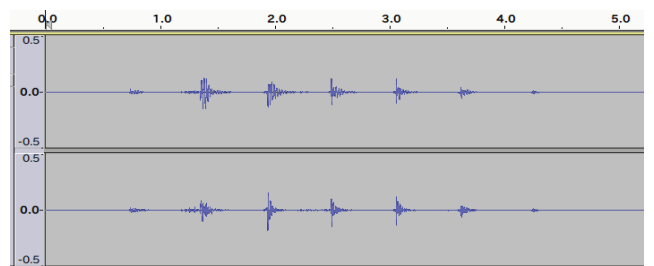


図7 床面 R 側から L 側への人の歩行による振動波形

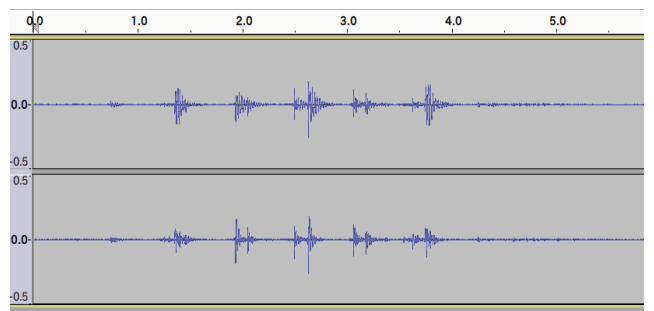


図8 図6,7の合成波形

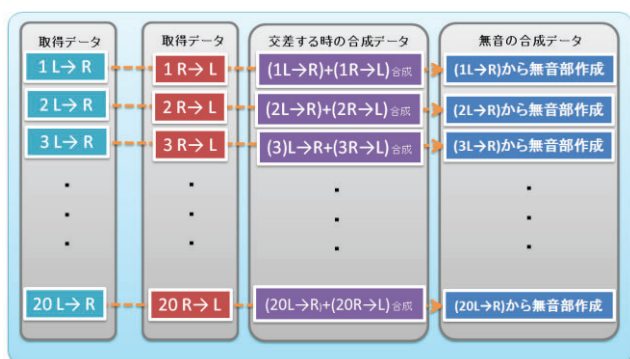


図9 取得データと合成データ

歩行者が交差する波形データは、R側からL側へ向かって歩く動作と、L側からR側へ向かって歩く動作の1から20の同じナンバーのデータ同士を合成し20通り作成した。

また、収録波形の暗騒音部分だけを集めた無音の波形データをナンバー1から20のL側からR側へ向かって歩く動作の録音データから、環境ノイズを含む無音部分を抽出し20通りのデータを作成した。

結果、図9のように計4種類各20個の波形データを用意し、教師データ：テストデータ = 7:3の割合で無作為に分け、提案手法によって、歩行方向と複数人の交差の推定を行った。

## 2.6 実験の結果と考察

LDAの結果、図10に示すようにL側からR側へ歩行した場合、R側からL側へ歩行した場合、歩行者が交差した場合、そして無音について、4種類のパターンを明確に分類することができた。また、k近傍法による推定精度は83%であった。

この結果より、センサ対から得られる信号データには振動の大小の情報だけではなく、床材の振動波伝達速度などの固有の振動データが含まれると考えられる。また、データのパワースペクトルの時間的推移を用いて特徴量の抽出を行うことで、L側からR側へ歩行した場合と、R側からL側へ歩行した場合の分類がより容易になった。

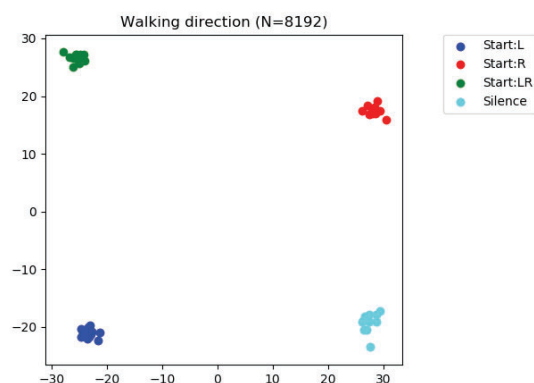


図10 解析結果

## 3. まとめ

本稿では、家屋内の人の歩行方向の特定に絞って検討を行った。また、実験によって2つのセンサを一定間隔の対として配置することで、センサ信号に振幅の大小以外の情報を持たせ、その信号に含まれる特徴量を活用することで歩行方向や複数人の交差を高い精度で推定できることを示した。これにより動線の推定精度の向上や、センサの設置箇所を削減するなどのメリットが期待できる。

今後の課題として、本実験における歩行方向の検出は、床の材質による振動伝達情報を含んだ学習によるもののため、振動センサの設置位置を変更する場合には再度、学習が必要になることが挙げられる。さらに、歩行方向はセンサ対の配置方向に対して平行に行ったが、さらにもう1対のセンサを垂直に配置することで垂直や斜め方向の歩行方向の検出の可能性についても検討していきたい。

## 参考文献

- 1) 柏本幸俊, 荒川豊, 安本慶一: 床に貼り付けた振動センサによる屋内位置推定手法の検討, 情報処理学会研究報告 (IPSI SIG Technical Report) Vol.2015-UBI-45, No.31 (2015).
- 2) Yukitoshi Kashimoto, Manato Fujimoto, Hirohiko Suwa, Yutaka Arakawa, Keiichi Yasumoto: Floor vibration type estimation with piezo sensor toward indoor positioning system, Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2016), pp. 1-6 (2016).
- 3) 石田繁巳, 梶村順平, 内野雅人, 田頭茂明, 福田晃: 路側設置マイクロフォンを用いた逐次検出方車両検出システム, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.1, pp. 76-86 (2019).
- 4) 小野測器 音の速さ  
[https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/nakaniwa/keisoku/otonoha\\_yasa.htm](https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/nakaniwa/keisoku/otonoha_yasa.htm)