

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

柏本 幸俊¹ 荒川 豊¹ 安本 慶一¹

概要: 近年、屋内でのユーザの生活支援に向けた屋内位置手法に関する研究が盛んに行われている。これらの屋内位置推定手法は健康支援システムや高齢者見守りシステムなど様々な応用が期待でき、多数の手法が提案されている。圧力センサ内蔵マットやマイクアレーを用いた屋内位置推定システムが提案されている。しかし、導入コストやプライバシーの問題が存在する。本稿では、これら2つの課題を解決するため、床に貼り付けた振動センサによる屋内位置推定システムを提案する。提案手法では、一般的な日本家屋の床などの振動を伝搬しやすい床を対象として、床に複数の振動センサを設置し、ユーザが移動した時に床に生じる振動よりユーザの位置を推定する。提案システムでは、振動フィンガプリント及び振動の強度の変化を用いてユーザの位置を推定する。床に伝搬する振動には、ユーザの位置を特定できる振動が含まれる。例えば、ユーザがドアを開閉した時の振動、椅子に着席・離席した時の振動などである。これらの振動とそれぞれの振動が発生する場所の組み合わせ（振動フィンガプリント）によってユーザの位置を推定する。しかし、振動フィンガプリントのみでは、振動フィンガプリントが存在しない場所にユーザが移動した場合や、移動中のユーザの位置推定が困難である。そこで、振動波の大きさ（振動強度）の変化よりユーザの移動方向・移動距離を推定し、この課題を解決する。ユーザの歩行による振動強度が時間経過とともに増加した場合、ユーザが振動センサに近づく方向に移動していることが分かる。従って、複数の振動センサの振動強度の時間的変化より、ユーザの移動方向を推定できる。それぞれの振動フィンガプリント・振動強度の時間的変化によるユーザの移動方向・距離の推定で推定したユーザの位置をパーティクルフィルタを用いて統合することで、ユーザの屋内での位置を推定する。提案システムの実現に向けて予備実験を行った。予備実験では、大学が所有するスマートハウスのフローリング床に複数の振動センサを設置し、振動強度とユーザー振動センサ間の距離に相関が存在するかを確認した。予備実験の結果、振動強度とユーザー振動センサ間距離との間に対数関数で近似できる相関が存在することが分かった。

キーワード: 屋内位置推定, 振動センサ

1. はじめに

近年、屋内でのユーザの生活支援に向けた屋内位置手法に関する研究が盛んに行われている。これらの屋内位置推定手法は健康支援システムや高齢者見守りシステムなど様々な応用が期待でき、多数の手法が提案されている。圧力センサ内蔵マットを用いた屋内位置推定システムが提案されている [1]。これらのシステムでは、建物の床に圧力センサ内蔵マットを敷き詰め、ユーザが踏んだ圧力センサの位置情報よりユーザの位置を推定する。しかし、部屋全体に圧力センサを敷設する必要があるため、導入コストが高い。次に、マイクアレーを用いた屋内位置推定システムが提案されている [2]。これらのシステムでは、部屋内でユーザが発する声や物音が各マイクに到来する時間差 (TDoA^{*1})・

角度 (AoA^{*2}) 等をもとにユーザの位置を推定する。しかし、高価なマイクアレー・処理デバイスが必要なため、導入コストが高いという課題が存在する。また、部屋内での話し声などを元に位置推定を行うため、プライバシーへの影響が課題として存在する。既存の屋内位置推定システムには (課題1) 導入コストが高い、(課題2) プライバシー問題が存在する。

本稿では、これら2つの課題を解決するため、床に貼り付けた振動センサによる屋内位置推定システムを提案する。提案手法では、一般的な日本家屋の床などの振動を伝搬しやすい床を対象として、床に複数の振動センサを設置し、ユーザが移動した時に床に生じる振動よりユーザの位置を推定する。提案手法を実現する上で、床に伝搬する振動を用いたユーザの位置推定手法の開発が課題であった。複数の振動センサを用いたユーザの位置推定には TDoA を用

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

^{*1} Time Differenc of Arrival

^{*2} Angle of Arrival

いると考えられる。TDoAでの位置推定には、正確な振動波の速度（波速と呼ぶ）が必要である。文献[3]によると床などの固体中を伝搬する波速は、個体の密度、弾性率（剛性率）によって決まる。しかし、密度、弾性率は床の材質や床材の配置によって異なるため、正確な波速の推定は困難である。そこで、振動フィンガプリント及び振動の強度の変化を用いてユーザの位置を推定する。床に伝搬する振動には、ユーザの位置を特定できる振動が含まれる。例えば、ユーザがドアを開閉した時の振動、椅子に着席・離席した時の振動などである。これらの振動とそれぞれの振動が発生する場所の組み合わせ（振動フィンガプリント）によってユーザの位置を推定できる。しかし、振動フィンガプリントのみでは、振動フィンガプリントが存在しない場所にユーザが移動した場合や、移動中のユーザの位置推定が困難である。そこで、振動波の大きさ（振動強度）の変化よりユーザの移動方向・移動距離を推定し、この課題を解決する。ユーザの歩行による振動強度が時間経過とともに増加した場合、ユーザが振動センサに近づく方向に移動していることが分かる。従って、複数の振動センサの振動強度の時間的変化より、ユーザの移動方向を推定できる。また、ユーザの歩行に伴う振動よりユーザの歩数も推定できるため、ユーザが移動した距離も推定できる。それぞれの振動フィンガプリント・振動強度の時間的変化によるユーザの移動方向・距離の推定で推定したユーザの位置をパーティクルフィルタを用いて統合することで、ユーザの屋内での位置を推定する。提案システムの実現に向けて予備実験を行った。予備実験では、大学が所有するスマートハウスのフローリング床に複数の振動センサを設置し、振動強度とユーザー振動センサ間の距離に相関が存在するかを確認した。フローリング床に直線を引き、直線上に3つの振動センサを1m間隔で設置した。原点横に被験者が立ち、足踏みをして一定の振動強度の振動を発生させ、各地点での振動強度を計測した。予備実験の結果、振動強度とユーザー振動センサ間距離との間に対数関数で近似できる相関が存在することが分かった。

2. 関連研究

2.1 圧力センサを用いた屋内位置推定手法

圧力センサ内蔵マットを用いた屋内位置推定システムが提案されている[1]。このシステムでは、建物内の床に圧力センサを内蔵したマットを敷き詰め、ユーザが踏んだ圧力センサの位置よりユーザの位置を推定する。しかし、部屋全体に圧力センサを敷設する必要があるため、導入コストが高い点が課題である。

2.2 マイクアレイを用いた屋内位置推定手法

マイクアレイを用いた屋内位置推定システムが提案されている[2]。これらのシステムでは、部屋内に複数のマイク

アレイを設置し、ユーザが発生する話し声等を録音する。部屋内でユーザが発する声や物音が各マイクに到来する時間差 $TDoA \cdot AoA$ をもとにユーザの位置を推定する。しかし、高価なマイクアレイ・処理デバイスが必要なため、導入コストが高いという課題が存在する。また、マイクを用いた屋内位置推定システムは部屋内でのユーザの様子や話し声などを元に位置推定を行うため、プライバシーへの影響が課題として存在する。

3. 床に貼り付けた振動センサによる屋内位置推定システム

本稿では複数の小型安価な振動センサを床に貼付け、ユーザが部屋内を移動した時に発生させる振動より、部屋内でのユーザの位置を推定するシステムを提案する。提案システムが想定するアプリケーションは、自宅での高齢者見守りや HEMS^{*3} などである。なお、提案システムでは、床はユーザが発生させる振動を十分に伝搬できる素材であると仮定する（コンクリート床などは想定しない）。

次節より、TDoAを用いたユーザの位置推定における課題、提案システムの詳細、提案システムを考案する上で行った予備実験について詳しく述べる。

3.1 TDoAを用いた位置推定の課題

複数の振動センサを用いた位置推定手法として、TDoAを用いてユーザの位置を推定することが考えられる。しかし、TDoAは時刻同期、波速の正確な推定が難しいという課題が存在する。TDoAは振動源から発せられた振動が、振動源と各振動センサとの距離に応じて異なる時刻に振動が到来することを利用した位置推定技術である。従って、正確な時刻同期が必要であるが、正確な時刻同期が可能な振動センサはデバイスコストが高いという課題が存在する。特に提案システムでは、固体中を伝搬する振動より位置推定を行う。固体中を伝搬する振動の波速は文献によると数 km/sec であるが、この波速を計測するには、誤差数 μsec 以下での時刻同期が必要となる。また、波速の推定が難しいという課題が存在する。TDoAで振動源の位置推定を行うときは、波速を用いる。固体中を伝搬する振動の波速は、固体の密度・弾性率による式で求まる。しかし、固体の密度や弾性率は、床の素材や床の配置、周辺の気温等によって決まるため、推定が難しい。以上より、TDoAを用いた位置推定は困難である。

3.2 システム構成

システム構成を図1に示す。提案システムは新規に開発した振動センサと家のフロアマップデータ、振動センサの

^{*3} Home Energy Management System

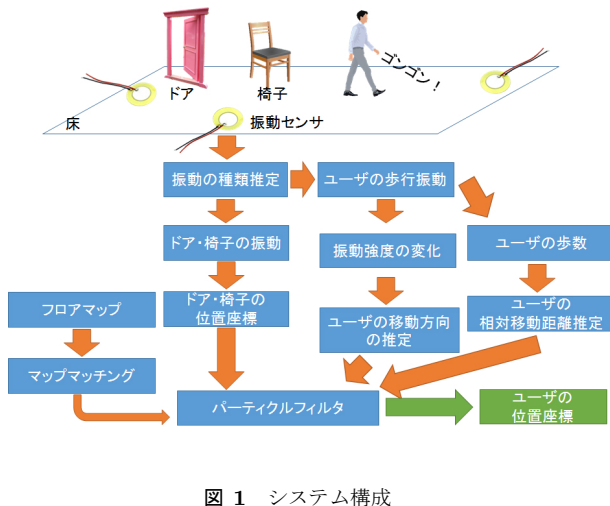


図 1 システム構成

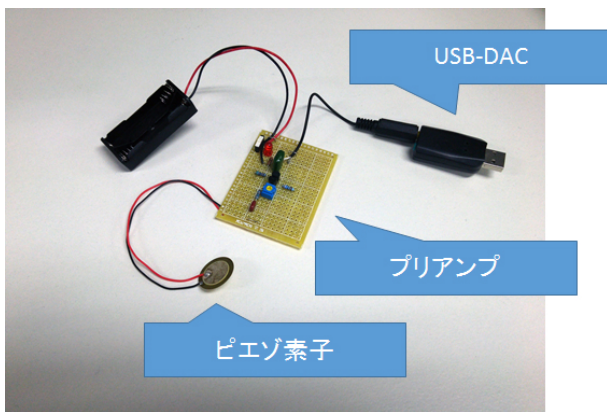


図 2 振動センサ

データ及び家のフロアマップデータよりユーザの位置を推定する PC から構成する。振動センサより、振動フィンガプリント、振動強度、振動より推定したユーザの歩数によるユーザの位置推定を行う。また家のフロアマップと振動センサより推定したユーザの位置をパーティクルフィルタで統合してユーザの部屋の中での位置を推定する。

3.3 振動センサおよびマイクアンプ

床に伝搬する振動を補足し PC に送信する安価な振動センサは市販されていないため、図 2 のように新たに振動センサを開発した。開発した振動センサはピエゾ素子、ピエゾ素子で計測した振動を増幅しオーディオ信号に変換するプリアンプおよび USB オーディオインタフェースから構成する。ピエゾ素子は素子に伝搬した振動を電気信号に変換する素子である。変換した電気信号は微弱であるため、

プリアンプで 100 倍程度に増幅し、オーディオ信号に変換する。変換したオーディオ信号を USB オーディオインタフェースを経由して PC に送信する。

3.4 振動フィンガプリントを用いた位置推定

TDoA を用いた振動源の位置推定は困難であるため、本システムでは振動フィンガプリントを用いた位置推定を行う。床に伝搬する振動には、ユーザの位置を正確に推定できる振動が含まれている。例えば、ドアの開閉や椅子の離着席に伴う振動である。つまり、振動センサでこれらの振動を検出した場合、ユーザがドアや椅子の周辺に存在することが推定できる。本システムではこれらの振動と位置情報の組み合わせ（振動フィンガプリントと呼ぶ）を事前に学習し、ユーザの位置を推定する。

3.5 振動強度の変化に基づいた位置推定

3.4 節で述べた振動フィンガプリントのみで位置推定を行う場合、ユーザが振動フィンガプリント以外の場所に移動した時や、移動中のユーザの位置を推定できないという課題が存在する。そこで、振動強度の変化よりユーザの位置を推定する。複数の振動センサが設置された部屋の中をユーザが移動すると、振動強度が変化する。ユーザが振動センサに近づく方向に歩いていた場合は振動強度が増加し、振動センサより離れる方向に移動した場合は振動強度が減少する。複数の振動センサの振動強度を組み合わせることでユーザの移動方向が推定できる。また、ユーザが歩いた時に発生させる振動よりユーザの歩数も推定できる。従って、事前に推定したユーザの歩幅と組み合わせることでユーザの移動距離を推定できる。

3.6 提案システムの実現に向けた予備実験

3.6.1 実験の目的と方法

提案した位置推定システムの実現に向けて予備実験を行った。この予備実験の目的は、ユーザが移動した時にユーザと振動センサとの距離と振動センサで計測した振動強度との間に相関が存在するかを確認することである。奈良先端大内のスマートハウスのフローリング床に直線を引き、直線上の原点と、原点から 1m 間隔で 4m の位置まで開発した振動センサを配置し、実験を行った。被験者が原点に立ち、その場で足踏みを行い、それぞれの地点での振動強度を記録した。

3.6.2 実験結果と考察

実験結果を図 3 に示す。図の横軸は原点からの距離 [m]、縦軸は計測した振動強度 [dB] である。実験結果より、ユーザと振動センサとの距離と振動強度との間には、対数関数で近似できる関係があることが分かった。

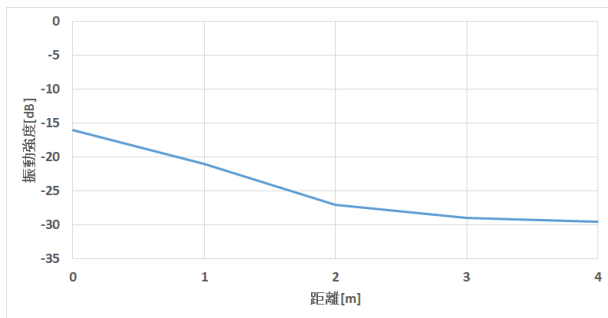


図 3 ユーザと振動センサとの距離と振動強度との相関

4. まとめ

本稿では、床に貼り付けた振動センサによる屋内位置推定システムを提案した。提案システムでは、ユーザが部屋内で移動した時に発生する振動より、ユーザの位置を推定する。提案システムの実現に向けて、予備実験を行った。予備実験の結果、ユーザと振動センサとの距離と振動センサで計測した振動強度との間には対数関数で近似できる相関があることが分かった。今後の予定として、提案システムの実装を進め、位置推定精度の評価を行う。また、本システムを使用するには、振動フィンガプリントの学習などの事前準備が必要であるが、これらの作業を一般的なユーザが容易にできるインタフェースの考案などを行う予定である。

参考文献

- [1] 池田徹志, 石黒浩, 西村拓一. 床センサと加速度センサの統計的統合による複数人間同定追跡. 計測自動制御学会論文集 = Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 45, No. 1, pp. 60–68, Jan 2009.
- [2] Xuehai Bian, Gregory D. Abowd, and James M. Rehg. Using sound source localization in a home environment. In Hans-W. Gellersen, Roy Want, and Albrecht Schmidt, editors, *Pervasive Computing*, Vol. 3468 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 19–36. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [3] 固体中での音の伝搬. <http://www.3bs.jp/pdf/UE107053j.pdf>.