

アウェアネスを提供するための位置計測による足音表現手法

越後 宏紀^{1,a)} 小林 稔^{1,b)}

受付日 2020年4月8日, 採録日 2020年10月6日

概要: 高齢者の独り身世帯や単身赴任, 一人暮らしの学生など家族が離れ離れに暮らすことが増えている。日々の生活が家族内で共有できないことで, 生活のずれによる孤独感や不安, 心配をかかえてしまう。この問題を解決するために, 我々は, 足音を用いて離れて生活する家族があたかも近くで生活しているような感覚を得られるシステムの実現を目指している。本論文では, マイクロホンで録音した足音を単純に再生する方法ではアウェアネスを適切に伝達できない場合があるという問題を解決するために, 足踏みの音源を位置計測で得られたユーザの位置情報によって変換して再生することで足音の移動を表現する手法を提案した。比較実験を行い, 提案手法が適切な足音の移動を伝達することに対して有効であることを確認したとともに, 位置計測のデータから自動で表現できることを確認した。

キーワード: アウェアネス, 足音

A Footstep Expression Method by Position Measurement for Awareness

HIROKI ECHIGO^{1,a)} MINORU KOBAYASHI^{1,b)}

Received: April 8, 2020, Accepted: October 6, 2020

Abstract: The number of people living in single-person households has increased. If daily life cannot be shared within the family, you will have loneliness, anxiety, and worry due to the gap of life. In order to solve this problem, we aim at the realization of the system which shares the sound of footsteps from the household of a distant family to create the impression that the family is nearby. In this paper, we aim to represent the movement of footsteps from the information obtained by position measurement in order to solve the problem that occurred the footsteps were recorded with a microphone. Comparison experiments were performed with the proposed method. It was confirmed that the proposed method was effective for transmitting appropriate footstep movements, and that it could be automatically expressed from position measurement data.

Keywords: awareness, footsteps

1. はじめに

学生の一人暮らしや単身赴任, 高齢者の独り身世帯など家族が離れ離れに暮らすことが近年増加している。日本の国勢調査では 2015 年の時点で全世帯の約 34.5% が 1 人世帯となっている [1]。日々の生活を家族の間で共有できないことで, 一緒に暮らしていたら感じるものの少ない孤独感や生活のズレによる不安感などをいってしまうことがある。崔は, 一人暮らしをしていない学生よりも一人暮らし

しをしている学生の方が抑うつや不安を感じる傾向があることを報告している [2]。

近年はスマートフォンやパソコンの普及, および通信のインフラにより, FaceTime [3] や Skype [4] のようなテレビ通話アプリケーションでいつでもどこでも簡単に会話することができる。しかしながら, 通話をかけるタイミングで遠隔地に住む家族がスマートフォンやパソコンを見ていなかったり, 外出していたり, 料理をしていたりといった, 遠隔地に住む家族の様子が分からず, 通話するタイミングを判断しにくいこともある。これは, 階段を昇降する足音や料理をしている音, リビングで子供たちが走り回っている音といった, 一緒に暮らしている際に話すタイミングの指標として用いている情報, すなわちアウェアネスの情報

¹ 明治大学
Meiji University, Nakano, Tokyo 164-8525, Japan
a) hiroki.echigo@koblab.org
b) minoru@acm.org



図 1 足音伝達システムのイメージ図. 離れている家族の足音が天井から聞こえてくることで, 離れている家族があたかも近くにいるように感じるシステムを目指している

Fig. 1 Image of the proposed system. Our goal is to realize a system that shares the sound of footsteps from the household of a distant family to create the impression that the family is nearby.

が, 離れて暮らしていることで欠如していることが要因の 1 つであると考えられる. 我々はこの問題を解決するために, 離れている人の存在感および足音の移動を把握することができる足音伝達システムを開発している [5], [6] (図 1). しかしながら, これまでの検討では, 足音を録音する際にマイクロホンを利用していため, 話し声やテレビから出力される音, 掃除機の音, 冷暖房の音や換気扇の音など足音以外の様々な音も同時に録音されてしまい, プライバシへの配慮が低いという問題があった. また, 開発したシステムを用いた実験で, マイクロホンで記録した移動する 1 人の足音を聞いた聴取者は, 複数人が歩いているように聞こえてしまったり, 足音がワープしているように聞こえてしまったりといった問題があった [7].

これらの経験をもとに, 本論文ではマイクロホンを使用せず, ほぼ一定の音量である足踏みの音源を人の位置情報に基づき音量調整しながら再生することで, 足音の移動を表現する手法を考案し, 実験を行った. 本論文の貢献は, マイクロホンを使用せず, 遠隔地にいる人の位置を計測することで足音の移動を表現する手法を提案し, その具体的な実現方法を実験を通じて明らかにしたことである.

2. 関連研究

2.1 遠隔コミュニケーション支援とアウェアネスの提供

遠隔地とのコミュニケーション支援やアウェアネスの提供についての研究は, 様々な方向から研究がなされている. Portholes [8] や Video Window System [9] は, カメラを用いて部屋全体を撮影し, その画像や映像を遠隔地に伝達することで遠隔地の情報を把握できるシステムとなっている. これらのシステムは, 多くの情報を伝達することができるが, 一目で何をしているのか把握することができなくなるため, プライバシへの配慮は高くない.

みまもりポット [10] や Digital Family Portrait [11], Peek-

A-Drawer [12], SyncDecor [13] などは, 日常生活でよく利用する電化製品や家具を利用したアウェアネスの提供を行っており, 遠隔コミュニケーションの支援になっている. これらのシステムは生活に溶け込みながら遠隔地と生活を共有しており, プライバシへの配慮も考慮されているが, 使用/不使用, 撮影された引き出しの中身の画像, システムの ON/OFF といった限定的な情報のみが伝達される.

これらの関連研究 [8], [9], [10], [11], [12], [13] から, 多くの情報を一目で把握できるシステムはプライバシーへの配慮が高くなく, 限定的な情報のみが伝達されるシステムはプライバシーへの配慮が高いと考える. すなわち, 得られる情報量の多さとプライバシーへの配慮の高さは, トレードオフの関係にあると考える. 本研究では, このトレードオフの関係に着目し, 以下の条件を満たすアウェアネスの提供を目的としたシステムの開発を目指している.

条件 1: 離れている人の存在感および移動を感じることができる.

条件 2: 離れている人のプライバシーを守りながら遠隔地の状況を把握することができる (これは条件 1 とトレードオフの関係にある).

条件 1 で述べた「存在感」とは, Dennet が提唱した意図スタンス [14] という認知バイアスにより得られる感覚のことを指しており, 身の回りの物体や音, 光などが動いた際に, あたかもその場所に誰かが存在していると解釈してしまう感覚である. 本論文では, このような感覚を「存在感」と定義する.

2.2 聴覚を用いた存在感の伝達

人間が五感の中で知覚する割合は約 80% が視覚といわれており, 聴覚は約 10% といわれている [15]. 聴覚による伝達手法は, 視覚ほど正確に位置や様子を把握することはできないが, 目にうつっていない全方位に対して感覚があり, 存在感を把握することができる. 田村らの立体音響バーチャルリアリティシステム [16] は, 5 台の音源モジュール, 16 台の立体音響生成装置, 4 台のサウンドミキサ, 8 台のスピーカで構成されており, 数値シミュレーションにおける全体的および局所的な物理現象を視覚情報と同時に音情報を付与することを可能にしている. しかし, 一般家庭で立体音響の空間を構築することは, 設置の複雑さの点やシステム構成にかかる費用などの点から難しい. 本研究では, 家庭内で利用できることを想定しているため, 容易な設置で存在感および移動を伝達するシステムを目指している.

Kanai らの施設の入居者の状況を音で把握するシステム [17] では, 認知症対応型共同生活介護施設において, タイピング音やドアの開閉音など状況に応じた音を伝達することで, 視覚情報を用いずに入居者の状況を把握できることを報告している. 本研究では, 足音という 1 つの音に限定しつつも, その足音の移動を伝達することで存在感を提

供することを目指している。天井通知システム [18] では、視覚による情報伝達を天井に行っており、読書中や計算中といった天井を直接見ていない場合、通知音がないと天井の通知に気づいた割合が50%以下であり、通知音があった場合100%の割合で通知に気づいたことを報告している。AR型仮想TAエージェント [19] は、指向性スピーカを利用して足音の音場を移動させることで、あたかもTAが歩き回っているように表現し、聴取者に存在感を与えることができる。しかしながら、指向性スピーカの方向をモータで制御しているため、同じ台数で複数人のTAの足音を表現することは難しい。本研究では、視覚ほど正確な位置や様子を把握することはできないものの、AR型仮想TAエージェントのように目視していなくても足音の移動によって存在感を与えることを目指している。

3. 足音伝達システム

3.1 足音の伝達によるアウェアネスの提供

家族と一緒に暮らしていると、同居人が階段を昇降する足音や台所で料理をしている音など様々な音が聞こえてくる。本論文では、このような生活の中から聞こえる音を「生活音」と定義する。生活音を聞くことで、同居人を目視していなくても、同居人がどのような行動をしているのか想像することができる。

本研究では、生活音の中でも人間のいろいろな動作に付随する生活音を利用することで、存在感や移動を感じることができると考えた。そのため、1つの音でできる限り広い範囲を表現できることと、プライバシーを配慮することを目指しているという観点から、人間が移動する際に生じる足音を用いることとした。

我々は足音の印象について調査を行い、家族や親戚の足音を聞いた場合は不快と感じないことが示唆された [5]。また、自分の足音が家族や親戚に聞かれている場合も不快と感じないことが示唆された [5]。

3.2 システム設計指針

足音伝達システムでは、離れている家族があたかも上の階に住んでいる、すなわち近くにいるように感じるようなシステムを目指し、遠隔地に住む家族の足音が天井から聞こえるような設計になっている。システムの概略図を図2に示す。足音を再生する端末が床や壁といった自分の生活空間と同じ場所にある場合、こっくりさんシステム [20] や SyncDecor [13] のように、あたかも幽霊やお化けがいるように感じ、不気味に感じてしまう可能性がある。そのため、上の階から足音が聞こえるように天井付近に足音を再生する端末を配置することで、歩行者が見えなくても不気味に感じることなく足音の移動を感じることができると考える。

足音伝達システムは、足音を記録する装置（以降、足音記録装置とする）と、足音を再生する装置（以降、足音再

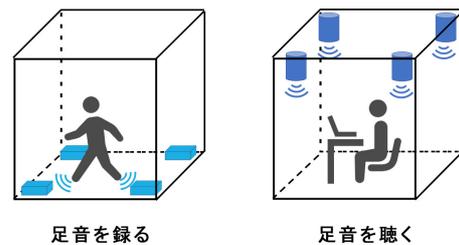


図2 システムの概略図

Fig. 2 System schematic.

生装置とする) から成り立っている。足音記録装置と足音再生装置は対の構造になっており、これらの装置を4組利用している。本システムにおいて、これら4組はほぼ同程度の遅延で再生するが厳密な同期のための連携は行わないこととする。このシステム設計指針は、足音記録装置どうしや足音再生装置どうしで同期する必要をなくすことで、組数を容易に増減することが可能であるためである。

3.3 研究課題

これまでの足音伝達システムの構成 [6] では、足音記録装置としてマイクロホンを利用して記録した音声を変換処理して再生する方法をとっているが、目的とする条件1, 2を実現するシステムの構築において、マイクロホンを利用していることで生じる問題が大きく2つある。

1つ目として、離れている人の存在感を適切に伝達できないという問題である。マイクロホンで録音した場合、1人の足音の移動が聴取者には複数人の足音の移動に聞こえてしまうことが先行研究の調査により分かった [7]。先行研究の調査では、1人が歩いている足音を実験参加者に聞かせた際、実験参加者からは「遠隔地に複数人いるように聞こえる」「遠隔地の人が（足音再生装置の間を）ワープしているように感じた」「（足音再生装置の間を）ジャンプしているように感じた」という意見があった。「足音を聞いて遠隔地に何人いると感じましたか」という質問に対する回答は、「1人」と回答した実験参加者は全体の44%であり、半数以上の実験参加者が複数人いるように聞こえると回答していた。1人の足音の移動が聴取者に複数人の足音の移動と認識されてしまうと、遠隔地から複数人の足音の移動を伝達しようとした場合、聴取者は聞いた足音の移動から遠隔地にいる複数人の存在感および移動を感じにくくなってしまふ。そのため、1人の足音の移動は1人の足音の移動として聴取者に伝達する必要がある。また、実際には足音記録装置の間を連続して歩行しているにもかかわらず、ワープしているように感じたり、ジャンプしているように感じたりしてしまうというのは、2.1節の条件1で述べた「離れている人の移動を感じる」ことができていないと考える。

2つ目として、プライバシーの保護の問題である。マイク

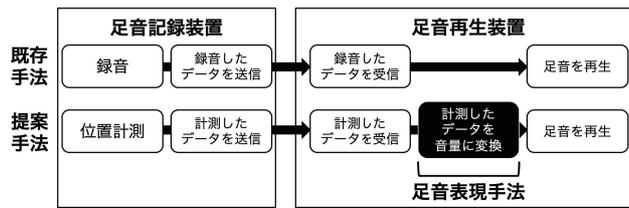


図 3 先行研究 [6], [7] の既存手法と提案手法の違い

Fig. 3 Differences between the method proposed in this study and the method proposed in previous studies [6], [7].

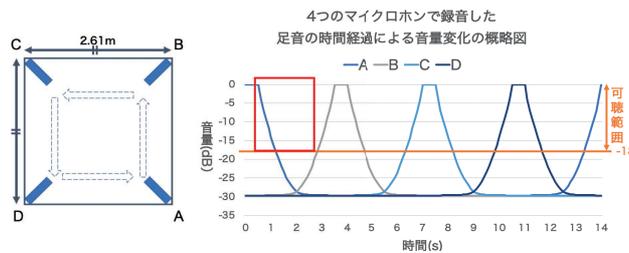


図 4 先行研究 [6], [7] で足音を録音したときの歩行軌跡 (左図) と、4つのマイクロホンで録音した足音の時間経過による音量変化の概略図 (右図)。音量が小さくなる部分を右図中の赤い四角で囲っている

Fig. 4 Walking locus during recording and schematic of volume change over time of footsteps recorded with four microphones.

ロホンで録音した場合、話し声やテレビから出力される音など足音以外の生活音も同時に録音され、伝達されてしまう。これは条件 2 に述べたプライバシーへの配慮が十分でないと考え、Low-pass filter を用いて高音の情報をカットすることはできるが、冷蔵庫のファンおよびコンプレッサの音や換気扇のモータ音など低音の生活音を排除することは難しく、足音のみを抽出することは困難である。

これらの問題から、マイクロホンで足音を録音することには限界があり、我々の目指すシステムの条件を満たすことは難しい。そのため、足音の移動のみを伝達でき、かつ 1 人の足音の移動が 1 人の足音の移動であると適切に伝達できる手法を実現する、すなわち条件 1, 2 を満たす手法を実現することが本論文の研究課題である。

3.4 提案手法

先行研究 [6], [7] で用いていた足音記録装置から足音再生装置までの既存手法を図 3 上に示す。マイクロホンで足音を録音する手法を用いていたことが、3.3 節の 2 つ目の問題はもとより、1 つ目の問題の原因となっていると考える。マイクロホンの指向性による急激な音量の変化が、1 人の足音の移動が聴取者に複数人の足音の移動と認識されてしまう原因ではないかと考えた。そのため、図 4 の赤い四角で囲われた部分に着目し、足音の音量の変化の仕方を変えることで、1 人の足音の移動が聴取者にも 1 人の足音の移動として伝達できるのではないかと考えた。

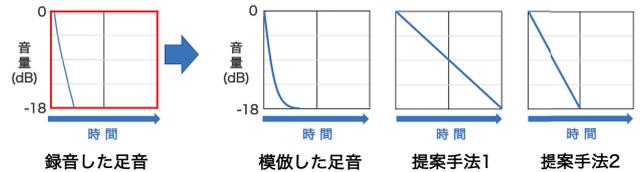


図 5 足音の変化の仕方についての概略図

Fig. 5 Schematic about how footsteps sound change.

本論文では、3.3 節に述べた課題を解決するために、ほぼ一定の音量である足踏みの音量を変化させることで足音の移動を表現する手法 (以降、足音表現手法とする) を提案する。目的を達成する表現手法を実現するために、複数の表現手法を用意し比較実験を行い、実験の結果から最適な足音表現手法を選択する。そして、選択した足音表現手法をもとに、計測された歩行者の位置データによって足踏みの音源の音量をすることで、歩行者の移動を伝達する方法の実現に取り組んだ。提案する足音記録装置から足音再生装置までの提案手法を図 3 下に示す。

4. 足音表現手法

聴覚による空間知覚は、両耳間レベル差と両耳間時間差の 2 つを制御することによって作り出すことが可能である [21]。2 チャンネルのステレオで聴く楽曲を作成する際、音が聞こえる位置を調整することで、より空間的な表現を行う手法がよく用いられている。そのため本論文では、あらかじめ録音されたほぼ一定の音量の足踏みの音源を利用して、その足踏みの音量を人工的に変化させる足音表現手法を提案する。本論文で足音を表現する際に想定した歩行軌跡は図 4 で示した先行研究 [6], [7] と同様である。変化の仕方についての概略図を図 5 に示す。この図 5 をもとに、それぞれの変化の仕方について説明する。比較実験では、大きい音量から小さい音量に変化するだけでなく、小さい音量から大きい音量にも同じように変化させているが、表現手法は正負が変化するのみで音量変化の傾きは変わらないため、本章では大きい音量から小さい音量に変化する手法のみに着目して説明する。本章で使用した足踏みの音源は、効果音ラボ [22] で公開されている“フローリングの上を歩く 2”を用いた。音源の音量制御は、音楽作成ソフト Cubase [23] を用いて行った。

4.1 録音した足音

足音記録装置で録音した足音の波形を図 6 に示す。収録したものは、足とマイクロホンの距離が最短であったところから、2.61 m 移動したときの足音である。縦軸は音の信号の振幅を正規化したもので、横軸は時間を表している。録音した 7 つの足音のデータを使用して分析した。

録音した 7 つの足音のデータの振幅から平均的な音の強さを調べるために、それぞれの録音データの 2 乗平均平方

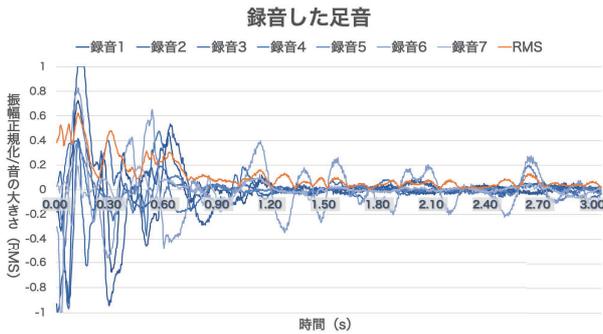


図 6 録音した足音の振幅と平均的な RMS 値

Fig. 6 Recorded footstep amplitude and average RMS value.

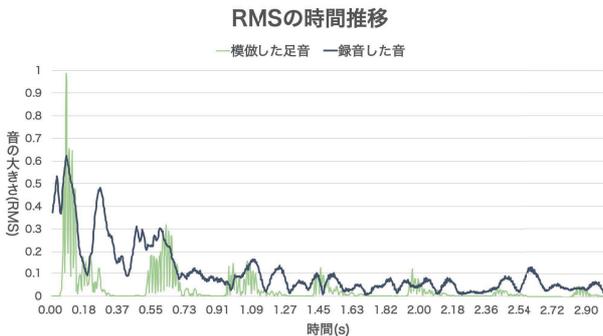


図 7 模倣した足音と録音した足音の平均的な RMS 値

Fig. 7 Average RMS value of imitated footsteps and recorded footsteps.

根 (RMS) を求めた。7つの足音のデータを平均した RMS の推移は図 6 のオレンジ色の線で表している。平均的な RMS の推移に着目すると、約 0.1 秒のところで RMS の値は最大となっていて、その 0.8 秒後には約 0.13 になっていることが分かる。このとき、1 歩歩くのに要した時間は約 0.6 秒であったため、最大の振幅を観測してから 2 歩移動する間に約 0.13 まで音の大きさは小さくなっていることが分かる。

4.2 録音した足音を模倣した足音

4.1 節の平均的な RMS の推移をもとに推移に合わせて音量を制御した足踏みの音源を用いて制作した足音音声ファイルの RMS 値と 4.1 節で求めた RMS 値の時間推移を図 7 に示す。足踏みの音源は、足と地面が接したときの音のみが録られているため、録音した足音に比べてノイズも少なく、断続的に RMS 値が上がっていることが分かる。2 歩目の RMS の値が 0.3 程度、それ以降の足音の RMS の値は約 0.13 以下になっており、録音した足音と同じような RMS の値の推移になっていることが分かる。

4.3 提案手法 1：足音の音量を徐々に変化させた音 1

足踏みの音源の音量を徐々に変化させて制作した音声ファイルの波形を生成する。図 7 の 0.91–1.09 秒では RMS

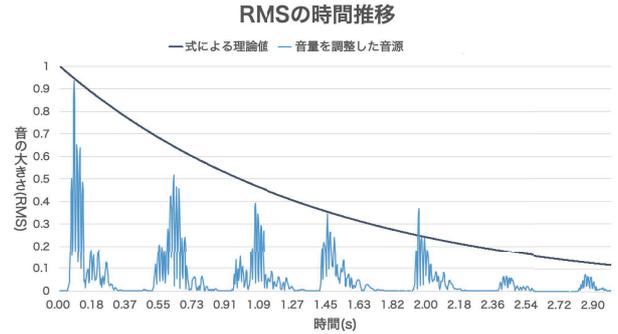


図 8 足音の音量を徐々に変化させた足音 1 の実測値 (調整した足踏みの音源の音量の時間推移) と理論値 (式による音量の時間推移)

Fig. 8 Actual and theoretical values of footsteps No.1 with gradually changing volume.

値が 0.13 程度まで小さくなっており、足音伝達システムの足音再生装置から聞いた場合、ほとんど聞こえない状況であった。RMS 値が 0.13 というのは、デシベルで表すと、約 -18 dB となる。そのため、最大音量の足音が聞こえたときを 0 dB としたとき、2.61 m 進む 2.91 秒間で -18 dB まで線形的に音量が小さくなるように足音の音量を制御する。このときの音量を G (dB)、時間を t (s) とした数式で表すと、以下ようになる。

$$G = -\frac{18}{2.91}t \quad (1)$$

デシベルは対数尺度であるため、RMS 値と比較するには音の強さの倍率 Power で表す必要がある。このときの計算式は、以下のように表すことができる。

$$G = 20 \log_{10} Power \quad (2)$$

式 (1) の G を式 (2) に代入して得られた式と、式をもとに作成した足音音声ファイルの音量の時間推移を図 8 に示す。足踏みの 1 歩 1 歩の音量が一定ではないため、多少ばらつきがあったものの、式に沿って音量制御ができていたと考える。

4.4 提案手法 2：足音の音量を徐々に変化させた音 2

4.2 節で述べた模倣した足音と、4.3 節の徐々に変化させた足音では、RMS 値が 0.13、すなわち -18 dB に到達するまでの時間に差がある。また、図 4 の右図で示したように、ある 1 台の足音再生装置で足音が徐々に音量が小さくなる際、他に設置している足音再生装置では徐々に音量が大きくなっていく。そのため、徐々に小さくなる足音と徐々に大きくなる足音の音量が同じになるときの音量が -18 dB になるように、4.3 節の半分の距離で音量が小さくなる足音の音声ファイルを作成する。2.61 m で -18 dB になるのではなく、その半分の距離の 1.305 m で -18 dB になるように設計した。すなわち、1.455 秒で -18 dB になるよう

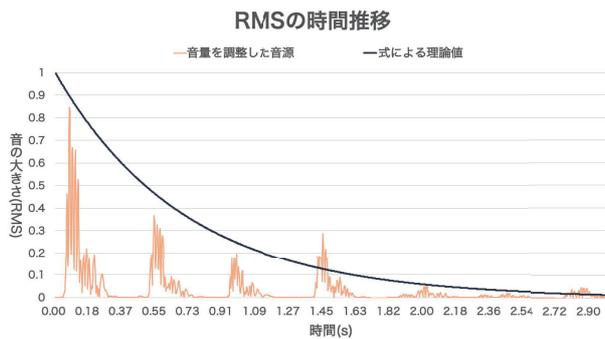


図 9 足音の音量を徐々に変化させた足音 2 の実測値（調整した足踏みの音源の音量の時間推移）と理論値（式による音量の時間推移）

Fig. 9 Actual and theoretical values of footsteps No.2 with gradually changing volume.

に音量制御する。これを式で表すと以下のようになる。

$$G = -\frac{18}{1.455}t \quad (3)$$

4.3 節と同様に、式 (3) の G を式 (2) に代入して得られた式と、式をもとに作成した足音の音声ファイルの音量の時間推移を図 9 に示す。

5. 足音表現手法の比較実験

5.1 実験環境

実験で用いた空間（以降、伝達スペースとする）は、先行研究 [6], [7] と同様の 1 辺が 2.61 m の正方形、高さが 2 m の空間を設定した。2.61 m 四方は江戸間の 4.5 畳と同等の空間である。

伝達スペースの 4 つの頂点に仮設ポールを設置し、床から 2 m の高さに足音再生装置をそれぞれ設置した。足音再生装置は Raspberry Pi と Bluetooth スピーカ（ソニー製 SRS-XB10）から構成されている。足音の音声ファイルは図 4 のように伝達スペース内を各辺に沿って歩くように聞こえることを意図して制作した。実験で聞かせる足音は、その発生源の歩行経路が、図 4 に示したマイクロホン A の位置を歩行開始地点とし反時計回りに 2 周していることを表現するように制作した。先行研究 [5] の実験から、1 周分の歩行では約 14 秒と再生時間が短く、実験参加者が質問について回答するために十分な条件でないということを考慮し、2 周分の足音の音声ファイルを用意した。実験参加者は、伝達スペースの中央に座ってもらった。実験の様子を図 10 に示す。

5.2 実験条件

最適な足音表現手法を選択するために表 1 の 4 条件で比較実験を行った。最適な足音表現手法とは、連続的な足音の移動が瞬間移動しているように感じず、かつ複数人が歩いているように感じない足音表現手法のことである。実験



図 10 実験の様子

Fig. 10 Experimental situation.

表 1 実験の条件

Table 1 Experimental conditions.

条件 a	録音した足音（4.1 節）
条件 b	条件 a を模倣した足音（4.2 節）
条件 c	提案手法 1：徐々に変化させた足音 1（4.3 節）
条件 d	提案手法 2：徐々に変化させた足音 2（4.4 節）

表 2 実験の質問一覧。表 1 の条件ごとに実験参加者に以下の質問に回答された

Table 2 Questionnaire list of Experiment.

Q1	足音だと感じましたか。 (1. まったく感じなかった-7. とても感じた)
Q2	この足音は、遠隔地にいる人が瞬間移動しているように感じましたか。 (1. まったく感じなかった-7. 非常に感じた)
Q3	上記の Q2 で回答したものに追記したいことがあればご記入ください (自由記述)
Q4	複数人の人が歩いているように感じましたか。 (1. まったく感じなかった-7. 非常に感じた)
Q5	上記の Q4. で回答したように感じた理由をご記入ください (自由記述)

参加者には、表 1 に示した 4 条件の音声をそれぞれ再生し聞かせた。実験参加者への質問と選択肢を表 2 に示し、質問は表 1 の条件ごとに回答させた。表 2 の Q1, Q2, Q4 は 7 段階のリッカート尺度で評価させた。Q2 では、先行研究 [7] の結果において、遠隔地の人がワーブしているように感じたり、ジャンプしているように感じたりしていたことから、このような不自然に感じた動きを瞬間移動と称し、「この足音は、遠隔地にいる人が瞬間移動しているように感じましたか」という質問にした。実験参加者には実験前に質問一覧について 1 つずつ説明を行った。また、実験参加者には、実験で 4 回聞く足音の聞き比べを行う旨を実験前にあらかじめ伝えていた。条件の順番は、順番による結果への影響を考慮し、ラテン方格法を用いた。

実験後、実験参加者には表 3 に示した質問を行った。実験参加者には「何回目」と回答してもらったが、ラテン方

表 3 実験後の質問一覧. 4条件の実験をした後, 実験参加者に以下の質問に回答させた

Table 3 Questionnaire list of After experiment.

After-Q1	4回聞いて, 最も1人が生活しているように感じたのは何回目のときでしょうか. (1(回目), 2, 3, 4, どれも変わらなかった)
After-Q2	Q1. のように感じた理由があればご記入ください. (自由記述)

格法を用いて条件の順番を変えているため, 結果では条件ごととして評価および分析を行っている.

実験参加者は22-25歳の学生20名(男性15名, 女性5名)である. 実験前に「マンションやアパート, 一軒家などで「上の階から足音が聞こえる」という経験はありますか」という質問を行ったところ, 「はい」と答えた実験参加者が全体の85%であった. また, 実験参加者には実験で足音が聞こえてくることは事前に伝えたが, 何人歩いているか, については伝えなかった.

5.3 実験結果

「Q1. 足音だと感じましたか」という質問の結果は, どの条件も評価値は5以上に集中しており, 条件間に大きな差は見られなかった. 次に, 「Q2. この足音は, 遠隔地にいる人が瞬間移動しているように感じましたか」という質問の結果を図11に示す. どの条件も平均するとほとんど差は見られないが, 条件aと条件bは評価値が1-7まで選択されているのに対し, 条件cと条件dは評価値を6, 7と選択した実験参加者はいなかった. Q3でQ2の選択した理由を記述させたところ, 条件aで評価値を7と答えた実験参加者は「1つの足音が消えてから他の方から足音が聞こえたから」という意見があった. また, 条件bで評価値を6と答えた実験参加者は「(右前方から左後方)に向けて一瞬で移動しているように聞こえた」「足音が不自然な場所で発生していた気がする」といった意見があった. 条件間でウィルコクソンの符号順位検定を行ったところ, 条件bと条件c, 条件bと条件dの間において5%水準で有意差が確認できた.

「Q4. 複数人の人が歩いているように感じましたか」という質問の結果を図12に示す. 条件a, b, cはほとんど差が見られなかったが, 条件dは他の条件に比べて複数人が歩いているように感じないことが分かった. Q5でQ4の選択した理由について記述してもらったところ, 条件a, bでは「自分から見て, 右の人は右側だけ, 左の人は左側だけを移動している印象だった」, 条件cでは「いくつかの箇所同時に音が出ている気がしたため」といった意見が多かった. 条件a, bでは評価値が5と答えた実験参加者が一番多く, 条件cでは評価値を6と答えた実験参加者が一番多かった. 一方で, 条件dでは評価値を1と答えた実験

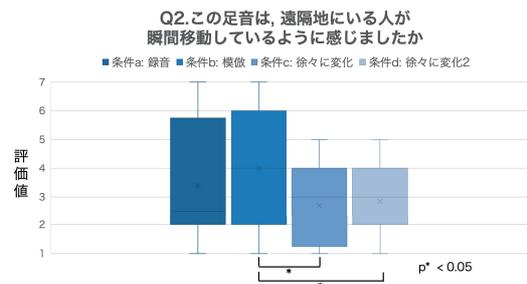


図 11 Q2 のアンケート結果

Fig. 11 Result of questionnaire Q2.

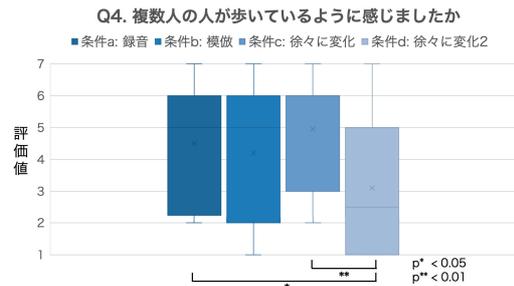


図 12 Q4 のアンケート結果

Fig. 12 Result of questionnaire Q4.

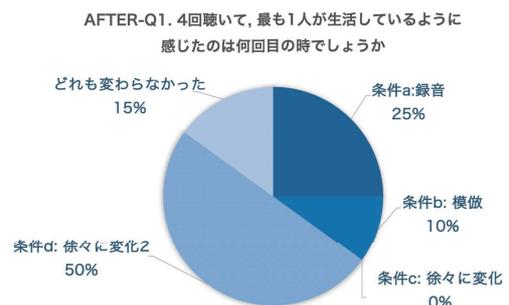


図 13 実験後アンケート結果

Fig. 13 Result of questionnaire after experiment.

参加者が一番多く, 評価値の平均も3.1と4条件の中で唯一4未満であった. 条件dと他の条件でそれぞれウィルコクソンの符号順位検定を行ったところ, 条件aと条件dの間において5%水準, 条件cと条件dの間において1%水準で有意差が確認できた.

実験後に行った, 「After-Q1. 4回聞いて, 最も1人が生活しているように感じたのは何回目のときでしょうか」という質問の結果を図13に示す. 条件dと答えた実験参加者が一番多く, 全体の50%であった. 2番目に多かったのは条件aの25%であった. 条件dを選択した実験参加者は「軌跡が追いやすく特に不快に感じる要素がなかった」「人が歩き回っている感じがしたから」「重複する音が少なかった」という意見があった. 条件aを選択した実験参加者は「足音以外のノイズっぽい音が, ライブ感(加工されていない音)を感じさせた」とノイズについての意見があった.

5.4 考察

Q1で条件ごとに差が見られなかったことから、足踏みを音量制御したものを利用して、足音であると感じることが分かった。Q2では条件aと条件bの評価値が1-7まで選択されているのに対し、条件cと条件dの評価値は1-5に選択が集中していることから、急激に音が変わると、瞬間移動しているように感じやすいのではないかと考えられる。また、条件bと条件c、条件bと条件dの間において有意に差があったことから、足踏みの音源を音量制御したとき、徐々に音量を変化させた方が瞬間移動していないように感じていると考えられる。

条件bが実験参加者に対して瞬間移動を感じさせた原因として、移動する足音を聞く間、足音再生装置間で聞こえない時間が存在するからであると考えられる。図4の右図で示した音量変化の概略図では、マイクロホンAで音量が減衰する際、マイクロホンBでは音量が増大している。このマイクロホンA、Bの間を歩行している際、足音の聴取者には足音が聞こえない時間が存在しており、この時間があることで瞬間移動しているように感じているのではないかと考えられる。そのため、条件dよりもさらに短い時間で減衰させた場合、条件bのように、聴取者は瞬間移動しているように感じるのではないかと考える。

Q4の結果から、条件dが他の条件に比べて複数人の人が歩いているように感じないと考えられる。また、複数人に感じる理由は、主に2つあると考える。まず1つ目は、左右で別の人が歩いているように感じることである。条件aと条件bは、足音が「左右それぞれで別の人が歩いているように感じる」という実験参加者が多かったことから、実験参加者は足音再生装置間の連続的な動きが推測できず、左から聞こえるか、右から聞こえるかのみで離れている人の位置を判断していたと考える。そのため、同じ足音の音源でも、右から聞こえる足音の持ち主と、左から聞こえる足音の持ち主が違っているように感じたのではないかと考える。2つ目の理由は、音の重なりによって複数人に感じるということである。条件cでは「明らかに2つ以上の足音が同時に聞こえたため」という複数の足音が同時に聞こえたことから、複数人に感じた実験参加者が多かった。図5で示したように、条件cの足音は-18dB以上の音量の時間が他の条件に比べて長いことから、複数のスピーカから同時に足音が聞こえていたため、複数人に感じたのではないかと考える。

実験後の質問結果から、条件dが最も1人が生活しているように感じると考えられる。しかし、After-Q1.で条件aと答えた実験参加者から、ザーというホワイトノイズのようなノイズ（以降、ノイズとする）が入っていた方が遠隔地とつながっているように感じるという意見も得られた。これまで、本当に上の階に人がいるような足音の再現を目指し、ノイズは排除しようと考えていた。しかし、ノ

イズがあることにより、遠くの足音を聞いているように感じるという感覚を得られることもあることが分かった。これは、実験参加者がこれまでの人生において、トランシーバや電話などで遠隔地の人と通話していた経験があり、「遠隔地と通信しているときはノイズが入っている音になる」という印象があるからではないかと考える。

5.5 最適な足音表現手法

5.2節の実験結果および5.3節の考察から、条件dの足音表現手法は離れている人の足音が瞬間移動しているように感じず、かつ複数人いるように感じない条件であることが分かった。また、4条件の中で最も生活しているように感じる条件であった。したがって、条件dの足音表現手法が4つの条件の中で最適だと考えられる。

6. 位置計測による足音表現手法

本章では、5章で得られた実験結果をもとに、人の位置を計測することによる足音表現手法を考案する。4章および5章の実験で用いた足音表現手法の音声ファイルは、歩く速度および軌跡を定めた条件で生成した。しかし、実際に足音伝達システムで利用する場合、歩く速度や空間内を自由に歩く様子を伝達することが目的であるため、位置計測によって音量を自動で制御する必要があると考える。

5章の実験結果をもとに、4.4節で述べた条件dの式の値を位置計測によって算出することで、各足音再生装置の再生音量を決める。センサは、これまでのシステムでマイクロホンを設置していたのと同じ場所に配置する条件で音声を生成する。足音記録装置間の距離をL(m)、足音記録装置と人との距離をd(m)としたとき、音量G(dB)は以下の式で表すことができる。

$$G = -36 \frac{d}{L} \quad (4)$$

位置計測によって音量を表すことで、足音記録装置に近づくにつれて足踏みの音量は大きくなり、足音記録装置から遠ざかるにつれて音量が小さくなることが実現できる。

位置計測による足音表現手法を、位置計測による足音表現手法で生成した音声と、4.4節の条件dで生成した音声、条件dの理論値のRMS値を比較した。式(4)のLには、4章と同じ2.61(m)を代入した。また、4章では2.91秒間で足音が変わっているため、2.61mの間を2.91秒間で移動したことを想定した位置計測データをテストデータとして制作し用いた。利用した足踏みの音源は、4章と同じものをを用いた。3つの値を比較したものを図14に示す。

図14より、位置計測による足音表現手法で生成した足音の音声は、4.4節の条件dで生成した足音の音声とほとんど差がなく、遠隔地の足音の移動を表現できることが確認された。この結果から、足音記録装置間の距離と、足音記録装置と人との距離を計測することで、足音の移動を表

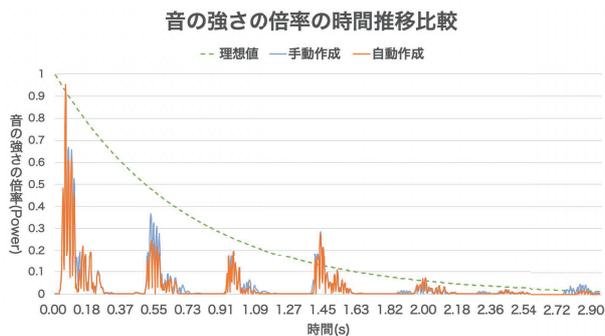


図 14 位置計測による足音表現手法を用いた実測値 (オレンジ色) と条件 d の実測値 (青色), 算出した式の理論値 (緑色の点線で表した曲線)

Fig. 14 Actual value using footstep expression method by position measurement (orange line) and actual value (blue line) and theoretical value (green line) of footsteps No.2 with gradually changing volume.

現でき, 5.1 節で述べた伝達スペース以外の空間でも足音伝達システムを利用できることが期待される.

7. おわりに

我々は, 足音を記録し伝達することによって, 離れて暮らしている人のプライバシーに配慮しながら存在感および移動を伝達するシステムの実現を目指している. 本論文では, 位置計測によって足踏みの音源を音量制御する方法を考案し, 複数の表現手法を比較することを通じて, 従来手法では難しかった滑らかな足音の移動を表現し, 離れている人があたかも近くに存在しているように感じられる足音表現手法を設計した. そして, その足音表現手法をもとに位置計測によって足踏みの音源を音量制御する方法を考案した.

本論文の提案手法は, 伝達スペース内に複数配置される足音再生装置のそれぞれの再生音は 1 つのセンサのみに依存し, 互いに独立である特徴がある. この特徴を活かせば足音再生装置の数を増やすことで, より広い空間を表現できることを期待する. 本論文では, 1 辺が 2.61 m の正方形のスペースという限定された空間で実験を行っているが, 今後空間の大きさや形状を変更しても本論文で考案した足音表現手法が有効であるかを調査する必要がある. また, 実際の家庭で利用した実験を行い, 足音伝達システムの有効性を確認する必要があると考える.

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP18K11410 の助成を受けたものである.

参考文献

[1] 平成 27 年国勢調査人口等基本集計結果, 総務省統計局, 入手先 (<https://www.stat.go.jp/data/kokusei/2015/kekka.html>) (参照 2020-04-06).
 [2] 崔 玉芬: 大学生のストレス反応に及ぼす影響——人暮らしの大学生の友人関係, 学業, 部活動による検討, 日本

教育心理学会総会発表論文集, p.474 (2015).
 [3] FaceTime, available from (<https://support.apple.com/ja-jp/HT204380>) (accessed 2020-04-06).
 [4] Skype, available from (<https://www.skype.com/ja/>) (accessed 2020-04-06).
 [5] 越後宏紀, 小林 稔: アウェアネス支援を目的とした足音記録伝達システムの検討, ワークショップ 2018 (GN Workshop 2018) 論文集, pp.1-8 (2018).
 [6] 越後宏紀, 小林 稔: アウェアネス支援のための足音伝達手法の検討, 研究報告グループウェアとネットワークサービス, Vol.2019-GN-106, No.20, pp.1-8 (2019).
 [7] 越後宏紀, 小林 稔: アウェアネス支援のための足音表現手法の検討, 研究報告グループウェアとネットワークサービス, Vol.2019-GN-107, No.12, pp.1-7 (2019).
 [8] Dourish, P. and Bly, S.: Portholes: Supporting Awareness in a Distributed Work Group, *Proc. CHI' 92*, pp.541-547 (1992).
 [9] Robert, S.F., Robert, E.K. and Barbara, L.C.: The VideoWindow System in Informal Communications, *Proc. ACM Conf. Computer Supported Cooperative Work*, pp.1-11 (1990).
 [10] みまもりほっとライン | 象印マホービン株式会社, 入手先 (<http://www.mimamori.net/>) (参照 2020-04-06).
 [11] Rowan, J. and Mynatt, E.D.: Digital Family Portrait Field Trial: Support for Aging in Place, *CHI '05: Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.521-530, ACM Press (2005).
 [12] Siio, I., Rowan, J., Mima, N. and Mynatt, E.: Digital Decor Augmented Everyday Things, *Graphics Interface 2003*, pp.159-166 (2003).
 [13] 辻田 暉, 塚田浩二, 椎尾一郎: 遠距離恋愛者間のコミュニケーションを支援する日用品 “SyncDecor” の提案, *インタラクティブシステムとソフトウェア*, Vol.26, No.1, pp.25-37 (2009).
 [14] 寺田和憲, 岩瀬 寛, 伊藤 昭: Dennett の哲学的論考が指摘する 3 つのスタンスの存在の検証, 2011 年度日本認知科学会第 28 回大会, pp.94-102 (2011).
 [15] 教育機器編集委員会: 産業教育機器システム便覧, 日科技連出版社 (1972).
 [16] 田村祐一, 佐藤哲也, 陰山 聡, 藤原 進, 中村浩章: 数値シミュレーションデータ表現のための音情報機能を付加したバーチャルリアリティシステムの開発, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.5, No.3, pp.943-948 (2000).
 [17] Kanai, H., Nakada, T., Hanba, Y. and Kunifujii, S.A.: Support System for Context Awareness in a Group Home using Sound Cues, *Revised Selected papers from 2nd International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare 2008*, Methods of Information in Medicine, Vol.47, No.3, pp.198-202 (2008).
 [18] 櫻井爽太郎, 平井重行: スマートハウス向け天井通知システムの評価, *インタラクティブ 2020 論文集*, pp.809-814 (2020).
 [19] 北岸佑樹, 米澤朋子: 講演中の聴衆の聴講態度に応じて移動する音響 AR 型足音 TA エージェントの検証, 2017 年度情報処理学会関西支部支部大会講演論文集, pp.1-8 (2017).
 [20] 尾関基行, 高島愛理, 前田真梨子, 岡 夏樹: 存在しないエージェントへの文脈による存在感の付与について, *HAI シンポジウム 2013 (HAI2013)*, pp.172-175 (2013).
 [21] 館 暉, 佐藤 誠, 廣瀬通孝, 日本バーチャルリアリティ学会 (編): 日本バーチャルリアリティ学, 特定非営利活動法人日本バーチャルリアリティ学会 (2011).
 [22] 効果音ラボ, 入手先 (<https://soundeffect-lab.info/sound/various/>) (参照 2020-04-06).

- [23] Cubase, available from (<https://japan.steinberg.net/jp/home.html>) (accessed 2020-04-06).



越後 宏紀 (学生会員)

1995年生. 2018年明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科卒業. 2020年同大学大学院先端数理科学研究科先端メディアサイエンス専攻博士前期課程修了. 同年同大学大学院同研究科同専攻博士後期課程に進学,

現在に至る. 主にCSCW, ヒューマンインタフェースの研究に従事.



小林 稔 (正会員)

1988年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業. 1990年同大学大学院修士課程修了. 同年日本電信電話株式会社入社. 1996年マサチューセッツ工科大学修士課程修了. 2014年より明治大学総合数理学部先端メディアサイエ

ンス学科教授. 主にCSCW, ヒューマンインタフェースの研究に従事. 博士(工学). ACM, IEEE, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員. 本会フェロー.