

アクティブ音響センシングにおける 環境温度変化にロバストな物体情報識別手法の検討

川崎 祐太^{1,†1,a)} 伊藤 雄一^{2,b)} 藤田 和之³ 尾上 孝雄¹

受付日 2021年1月7日, 採録日 2021年7月7日

概要: 我々はこれまで、アクティブ音響センシングを用いてサーフェス上に置かれた物体を認識するシステムである SenseSurface を提案し、検討してきた。SenseSurface では、時間の経過とともに周波数が増えるスイープ信号をサーフェスに印加し、得られた周波数特性を解析することで物体を認識している。しかし、音響センシングには、環境温度によってサーフェスの音響周波数特性が変化し、物体識別率が低下するという課題があった。そこで本稿では、環境温度がスイープ信号に与える周波数特性への影響を調査し、その知見に基づき環境温度による影響の補正を試みる。具体的には、ある温度 T_1 °C における周波数特性を、 T_0 °C における周波数特性に対して、周波数方向と振幅方向に補正する。この補正を用い、サーフェス上に置かれた物体の種類 (3 種類) と位置 (3 カ所) を異なる環境温度 (17 種類, 22.7°C~30.5°C) 下で識別するテストを実施した結果、物体の平均識別率が補正なしの 21.5% から 75.1% に向上することを確認した。

キーワード: アクティブ音響センシング, 物体認識, 環境温度, フーリエ変換, 周波数特性

A Study of Robust Object Information Identification Method for Environmental Temperature Variations Using Active Acoustic Sensing

YUTA KAWASAKI^{1,†1,a)} YUICHI ITOH^{2,b)} KAZUYUKI FUJITA³ TAKAO ONOYE¹

Received: January 7, 2021, Accepted: July 7, 2021

Abstract: We have previously proposed SenseSurface, a plate-like system that recognizes object type and location using active acoustic sensing, for the purpose of achieving a more accurate and unconscious context awareness. SenseSurface recognizes objects by applying a sweep signal whose frequency changes with time to a surface and analyzing the change in the acoustic frequency response given to the sweep signal from the response. However, there remain a problem with active acoustic sensing that the acoustic frequency characteristics of the surface vary with the environmental temperature, which reduces the recognition performance of SenseSurface. This paper investigates the effect of environmental temperature on the acoustic frequency response and try to compensate for the influence of the environmental temperature based on the findings. Specifically, the change in the acoustic frequency response at T_1 °C is corrected in the frequency and amplitude directions against the change in the acoustic frequency response at T_0 °C. Using this correction method, we tested the discrimination of multiple object types (three types) and locations (three locations) placed on the surface under different environmental temperatures (17 patterns ranging from 22.7°C to 30.5°C), and confirmed that the average object discrimination rate improved from 21.5% to 75.1%.

Keywords: active acoustic sensing, object identification, environmental temperature, fast Fourier transform (FFT), frequency characteristics

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

² 青山学院大学理工学部
College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University,
Sagamihara, Kanagawa 252-5258, Japan

³ 東北大学電気通信研究所
Research Institute of Electrical Communication, Tohoku
University, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

1. はじめに

我々の生活環境には多くの物が存在しており、何がどこ

^{†1} 現在, 株式会社 WOWOW
Presently with WOWOW INC.
a) kawasaki.yuta@ist.osaka-u.ac.jp
b) itoh@it.aoyama.ac.jp

にあるのかといった状態は、人の活動に応じて変化する。コンピュータが、このような人の活動の中で変化する物体の存在やその位置を認識することで、コンテキストウェアな作業支援が可能になると考えられる。たとえば、机上でノートとペンの存在を認識すると、「勉強中」というコンテキストが付与でき、これに基づいてスマートフォンの通知を切って集中を促すといった支援が考えられる。これに関連する様々なコンテキストウェアネス技術が研究・開発されており [1], [2], なかでも最近では、カメラベースの物体認識手法 (たとえば文献 [3]) が注目されている。これらの手法は、画像処理技術の進化にともない認識精度が向上してきたが、物体同士のオクルージョンに弱いことや、プライバシーの観点から利用場面が限られるなどの制限がある。一方、近年のセンサデバイスの高精度化や小型化にともない、加速度センサ、静電容量センサ、圧力センサなどの各種センサを用いて、コンピュータが対象物の種類や位置を認識する技術が研究されている。たとえば、物体の種類を認識する研究として、物体の持つ電磁特性 [4], 導電性 [5], 振動特性 [6] を用いて物体の種類を認識する研究がある。また、物体表面でのレーダ波の反射の様子から物体認識する研究もある [7]。この方法は、電磁特性などを持たない日常物体を広く認識可能である。これらの研究では、物体の種類は認識できるが位置は認識できないものや、物体の位置は高精度に認識できるが種類の認識に物理的なタグを取り付ける必要があるものが多く、複数の物体の種類と位置を同時に認識できる技術は少ない。

日常における複数の物体の種類と位置を同時に認識するために、我々はこれまでにアクティブ音響センシングを用いてサーフェス上の物体を認識するシステムである SenseSurface を提案し、その有用性を検討してきた [8]。SenseSurface では、机などの物体配置が可能なサーフェスに超音波域のスイープ信号を入力し、配置された物体およびその位置によって変化する音響信号に機械学習を適用することで、配置物体の位置と種類を識別する。つまりアクティブ音響センシングとは、物体にマイクとスピーカを付与し、音響信号を伝播させ、応答を解析するセンシング手法である。本手法はカメラベースの手法に見られるオクルージョンの問題が発生せず、超音波信号を用いれば人に知覚されることもないため、我々の生活空間においてユーザに意識させないセンシングに適していると考えられる。しかし、SenseSurface およびアクティブ音響センシングには、環境温度の変化にともない、システムによる物体識別精度が低下するという課題が存在する [8]。これは、図 1 に示すように、環境温度の変動により、サーフェスの剛性が変化することで、スイープ信号に与える影響が変化することに起因すると考えられる。音叉においても環境温度変化による周波数の変動が報告されており [9]、一般に剛性を持つ固体全般において同様の現象が起ると考えられる。つま

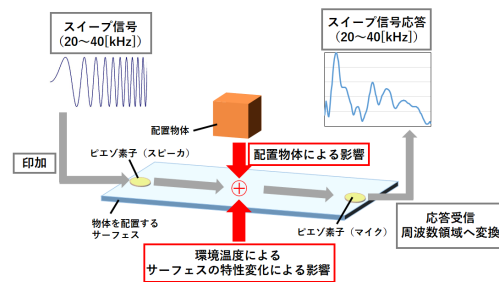


図 1 アクティブ音響センシングにおける環境温度によるスイープ信号応答への影響

Fig. 1 Effect of environmental temperature on sweep signal response in active acoustic sensing.

り、現在の実装では、温度ごとに配置物体によるスイープ信号への影響を訓練する必要がある。SenseSurface の実用化において、使用時の環境温度を制御することは難しいため、訓練コストを抑えるためにも改善が必要である。

そこで本研究では、SenseSurface により得られる周波数特性 (本稿ではこれをスイープ信号応答と呼ぶ) に対する環境温度の影響を調査・解析し、環境温度変化に対してロバストな物体認識を実現することを目的とする。温度変化後のスイープ信号応答を、温度変化前のスイープ信号応答へと補正することで、温度ごとに必要となる訓練データの収集コストを最小限に抑え、複数の温度下で識別可能なシステムを目指す。まず、観測用のサーフェスを実装し、環境温度別にスイープ信号応答を、実測データを用いて観察する。観察結果をもとに、環境温度の変化によってスイープ信号応答が受ける影響を打ち消すための補正手法について検討する。

本稿では、まず SenseSurface を用いて、温度によるスイープ信号応答の変化を調査した結果について述べる。次に、提案する補正手法の詳細と、それを用いた識別テストの結果を報告する。最後に、結果をふまえ今後の展望について述べる。本稿の主な貢献としては以下の 2 つがあげられる。1 つ目は、アクティブ音響センシングにおいてスイープ信号応答の変化が、配置物体による影響と環境温度による影響とで独立であることが分かったこと。2 つ目は提案する補正手法により、アクティブ音響センシング技術が環境温度変化に対してロバストに適応できる可能性を示したことである。

2. 関連研究

2.1 物体情報識別

物体認識において、カメラベースの手法は最も研究されている手法の 1 つである。代表的な例として、YOLO [3] では、グリッド分割とバウンディングボックスを用いて、80 クラスの物体を 57.9% で認識する。しかし、カメラは光学的オクルージョンの問題や、ユーザの個人的な情報も取得してしまう問題がある。

電磁波を利用した手法 [4], [10] では、物体が発する電磁ノイズの個体差を利用して物体を認識する。この方法は、認識された物体を操作する（プロジェクタや照明装置の操作）などの応用が可能であるが、認識できる物体が電子機器に限定されてしまう。Laput らは、物体に手で触れたときにスマートウォッチに伝わる振動の違いから物体を認識した [6]。しかし、認識できる物体が、振動をとともなう機械的なものに限られる。

レーダ波を利用した RadarCat [7], [11] は、照射されたレーダの反射の様子が、物体ごとに異なることを利用して、物体を認識する。26 種類の日常物体を 99.97% の精度で認識することができ、物体の重なりや回転も取得できる。しかし、物体をレーダ装置に十分接近させる必要があり、広範囲の認識は困難である。

Lumino [12] は、ガラス板の下から、光ファイバを充填したブロックのパターンをカメラで撮影することで、ガラス板上のブロックの位置と種類を認識する。この方法では、積み上げられたブロックのマーカを認識することができる。GravitySpace [13] では、床を感圧シートで構成し、足跡や家具のフットプリントから、個人や家具の種類と位置を認識する。しかし、フットプリントを広範囲で取得するシステムは実装コストが高い。また、家具の認識にはドットマーカを用いる必要がある。

別の方法として、物体の接近によるコイルのインダクタンスの変化を利用して物体認識を試みる研究 [5], [14] もある。しかし、これらの手法では認識対象が導電性の物体に限定され、非導電性の物体を認識するためには、導電性のマーカを装着する必要がある。Zanzibar [15] は、NFC 通信と静電容量センシングを組み合わせたデスクマットを使用し、物体の種類や位置を認識する。複数の物体の種類と位置を認識することができるが、認識できる対象物は導電性のものに限られ、対象物に NFC 通信モジュールを装着する必要がある。SurfaceSight [16] では、LIDAR を用いて、点群からテーブル上の物体の種類と位置を認識する。このシステムでは、テーブル上の広い範囲の物体を認識することができるが、奥行きによる物体の重なりというオクルージョンの問題や、形状が似ている物体を誤認識してしまうという問題がある。

以上のように、様々なアプローチによる物体認識の研究があるが、カメラベースの手法ではプライバシーやオクルージョンといった導入に不向きな場面が存在し、他の手法では認識対象となる物体の特性に制限がある場合が多い。一方で、サーフェス上に置かれた物体を対象とする研究では導入コストの問題や物体に ID タグを与えるものが多いため、日常生活で用いる多くの物体を認識することが難しく、手軽に様々なものをセンシングできる技術が必要である。

2.2 音響センシング

2.2.1 パッシブ音響センシング

音響センシングは、物体や空气中を伝わる音を解析する手法であり、センサデバイスから能動的に特定の信号を印加しその応答を解析するもの（アクティブ）と、自然に発生する音を解析するもの（パッシブ）に分けられる。本項では、まずパッシブ音響センシングの先行研究について紹介する。

パッシブ音響センシングは、タップしたときに生じる音や擦る音などといった動作により発生する音を検知し、解析することにより実現される。タッチ検出 [17], [18] やスワイプジェスチャ検出 [19], [20], タッチに用いた物体 [21], [22] や人の活動 [23], [24], [25], [26] を認識することができる。また、物体に凹凸や「爪」を付与することで、引っ掻くとき、弾くときに生じる固有の音を認識し、音響 ID として用いる研究もある [27], [28], [29]。また、日常物体を認識する研究として、Knocker [30] がある。これはスマートフォンで物体をノックしたときに生じるインパルス応答をスマートフォンのマイクで記録し解析することで、周波数特性の違いからノックした物体を認識する。インパルス応答を用いるためリアルタイムに認識が可能であるが、認識にはユーザのノック動作が必要となることや、物体の位置を認識できないという制限がある。

2.2.2 アクティブ音響センシング

アクティブ音響センシングは、スピーカから音響信号を物体または空間に印加し、その応答をマイクで取得し解析する手法である。古くになされた研究では、特定の音響信号を空中に送信し、空中ソナーとして利用することで、物体の認識や位置推定が検討されてきた [31], [32], [33]。また、アレイ状に並べたスピーカにより形成されるビームフォームを利用したハンドジェスチャ認識の研究 [34]、人体が音を吸収することを利用した室内人数推定 [35] など、現在でも幅広く研究されている。

音は空中以外にも伝わるため、アクティブ音響センシングは音が伝播する物体に広く適用可能であると考えられる。Brenner ら [36] はトランスミッタ、レシーバ、リフレクタを取り付けたガラス板で、表面弾性波の減衰からタッチ位置を検出した。人体にマイクとスピーカを取り付け音響信号を伝播させると、手や体の姿勢や表情などが変化することで、伝播する信号が変化する。これを利用して、肘の角度 [37] やハンドジェスチャ [38], [39], 表情 [39], [40] を認識する研究がある。Zhang らは、親指にスピーカを、手首にマイクを取り付け、親指で他の指をタップした際に音が伝わる経路が変化することを利用して、タップ位置を 93.77% の精度で認識した [41]。また、タンクや袋の音響特性の変化をとらえることで、内容物の種類や量を推定する研究もある [42], [43], [44]。彼らは、物体を流れる音響信号は表面だけでなく内部も伝達すると考察している。

アクティブ音響センシングは、物体を自由にデザインで

きる 3D プリントとの親和性が高い。物体の内部構造の違いで音響特性が変わることを利用し、3D プリントされたオブジェクト内部に ID を付与する試み [45] や、内部に空洞を表面に穴を設けることで、穴を塞いだときの音響特性の変化を利用したタッチインタラクションの付与が研究されている [46]。

アクティブ音響センシングはパッシブ音響センシングと比べて、接触音をともなわないタッチも取得できることが利点である。大野らはアクティブ音響センシングを用いて、物体の把持状態を 99.6% の精度で認識する Touch & Activate [47] を提案した。このシステムでは物体と人が接触することで、物体の周波数特性が変化することを利用している。また、Liu らの BibWrite [48] は、タッチによる音響特性の変化の個人差をセキュリティに利用することで、新たな入力インタフェースを提案している (95% の精度)。

このように、アクティブ音響センシングでは、音が伝わる物体の情報だけでなく、人の接触位置や触れた人間の情報も取得可能である。これらの研究では、人と物体の接触にのみ注目しているが、実際は指先以外の接触でも音響特性は変化することが考えられる。これに対して本研究では、サーフェスに音響信号を入力し、配置された物体の認識を試みている。

3. SenseSurface とアクティブ音響センシングにおける温度依存性

3.1 SenseSurface

システム概要

ある物体の周波数特性は、物体の形状、物体の材質、物体表面の境界条件の 3 つの要因によって変化する [49]。このため、物体を配置するサーフェスの境界条件は、置かれる物体の性質 (材質、底面形状、重さ) や位置などによって変化する。サーフェスの周波数特性に影響を与えると考えられる。したがって、サーフェスの周波数特性の変化から、サーフェス上に置かれた物体の種類や位置を検出することができると思われる。

これらの周波数特性を取得して解析するために、我々はこれまでに、アクティブ音響センシングを用いてサーフェス上の物体を認識するシステムである SenseSurface を提案し検討を進めてきた [8]。SenseSurface では、図 2 に示すように、 piezo 素子から物体を配置する平板にスイープ信号を入力し、その上に置かれた物体の状態に応じて変化する応答を別の piezo 素子で取得し、高速フーリエ変換 (FFT) を用いて周波数領域に変換する。スイープ信号は、時間の経過とともに周波数が増加する信号である。スイープ信号には様々な周波数が含まれるため、スイープ信号を印加した際に得られる応答から周波数特性を解析することができる。得られた周波数特性に機械学習を適用することで、配置物体の種類や位置を認識する。

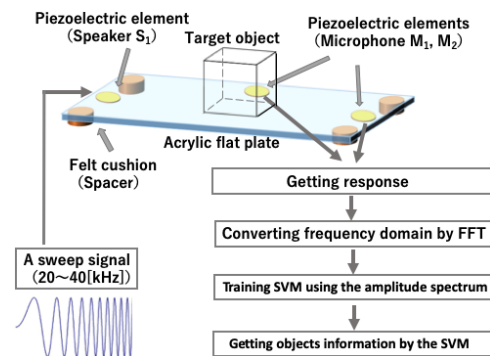


図 2 SenseSurface 概要図

Fig. 2 System overview of SenseSurface.

プロトタイプ実装

図 2 に示す SenseSurface のプロトタイプ概要では、物体配置面として、机の天板として使われる素材の中で、硬くて振動が伝わりやすいアクリルを使用している。アクリル平板は、長さ 180 mm、幅 320 mm、厚さ 5 mm である。プレートに四隅に、直径 32 mm、厚さ 5 mm のフェルト製のクッションを、プレートの側面がクッションに接する位置に貼り付ける。スペーサを四隅に配した場合のスピーカ S_1 と 2 つのマイクの位置 M_1 , M_2 は、図 2 に示すとおりである。スピーカ S_1 とマイク M_1 と M_2 は、直径 20 mm、厚さ 0.3 mm のユニモルフ型 piezo 素子で、アクリル平板に瞬間接着剤で貼り付ける。スイープ信号には、周波数が 20 kHz から 40 kHz まで線形に増加する 1.0 秒の正弦波を使用する。この帯域の周波数を使うメリットは、人の可聴域外であることと、環境ノイズに強いことがあげられる。信号の送受信は、TASCAM 社製のオーディオインタフェース (SERIES 208i) を介して、サンプリング周波数 96 kHz で行う。サンプリング定理から、オーディオインタフェースを介して piezo 素子と送受信できる信号に含まれる最大周波数は 48 kHz である。piezo 素子から得られた応答から、フレームサイズ 1,024 点のハミング窓を用いて順次データを抽出し、FFT で周波数領域に変換する。ここで、ハミング窓の重なり幅は 1,016 点であった。20 kHz から 40 kHz までの各周波数における振幅スペクトルの最大値をアクリル板の周波数特性として用いて、その次元は 215 であった。これらすべてを特徴量に用いた。

3.2 アクティブ音響センシングにおける環境温度依存性の調査

一般に、物体の剛性に関するヤング率やポアソン比は温度依存性があることが知られている。このため、環境温度により物体の剛性が変化し、周波数特性が変化すると考えられ、アクティブ音響センシングにおける認識精度にも悪影響を及ぼすと見込まれる。

前述の SenseSurface のプロトタイプにおいても、識別器の訓練時と環境条件が異なる場合に、識別率が低下するこ

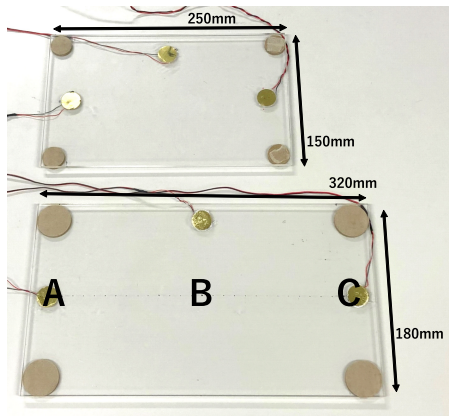


図 3 環境温度による影響を観測するリファレンスサーフェス（上）と SenseSurface プロトタイプ（下）

Fig. 3 Plates used for measurement. Plate to observe environmental temperature effects (top) and SenseSurface prototype (bottom).



図 4 測定に用いた物体

Fig. 4 Objects used for measurement.

とを予備調査において確認している [8]。この識別率の低下は、PC から送信された音響信号が伝播するアクリル平板、 piezo素子、接着剤の剛性が環境温度により変化したためであると考えられるが、これまで詳細な調査はされていない。そこで、温度変化による影響が、アクリル平板と piezo素子と接着剤のうち、どの部分に支配的であるかを確認するため、ヒートガンによりアクリル部分のみ加熱、および、piezo素子を貼付した部分（アクリル平板、piezo素子、接着剤）を局部的に加熱したときの取得信号の音響周波数特性を調べた。その結果、どちらの場合も同様に、周波数軸方向および振幅軸方向への周波数特性の変動が確認され、アクリル平板、piezo素子、接着剤を含む系全体が温度の影響を受けることが分かった。

そこで、環境温度変化が SenseSurface の物体識別精度へ与える影響を調べるため、異なる環境温度条件下で数日間測定を行った。測定条件を以下に示す。用いたサーフェスは図 3 に示す 3.1 節で述べた SenseSurface プロトタイプと、縦 150 mm、横 250 mm、厚さ 5 mm の環境温度の影響を観測するためのリファレンスサーフェスである。リファレンスサーフェスは、環境温度による影響がサーフェス（アクリル平板）のサイズに関係するかを調べるために用いた。プロトタイプには、オフィスでの利用を想定し、オフィス机で典型的に用いられるであろう、図 4 に示すノート、ペン、マグカップの 3 種類を識別対象の物体を載せ、

環境温度変化による配置物体識別精度への影響を調べた。物体を置く位置は先行研究 [8] と同様に、図 3 の A, B, C に示すように、プロトタイプの短辺の midpoint から、向かい合う短辺の midpoint に向かって、5 mm, 160 mm, 315 mm の位置とした。一方で、リファレンスサーフェスには物体を載せず、環境温度による周波数特性の変化のみを測定した。

まず、何も物体を載せずにプロトタイプにスイープ信号を印加し、周波数特性を記録する。次に、3 種類のうち 1 つの物体を 3 カ所のいずれかに配置する組合せである 9 通りの状態（3 種類 × 3 カ所）で物体を載せ、周波数特性を記録する。次に、物体を 2 つ同時に配置した 18 状態と、3 つ同時に配置した 6 状態で、同様に測定する。この一連の測定を 1 セッションと定義する。1 セッションの初めと終わりには、室温、湿度、およびサーフェスの表面温度を記録し、測定中に急激に温度が変化していないことを確認する。室温を一定に保つため、実験中はつねに空調を作動させ、実際に測定中には温度が大きく変化することはなかった。次に、セッションで得られた周波数特性に対して、文献 [8] で提案された推定式による複数物体識別手法を用いることで、1 つだけ物体が置かれた状態から、物体が複数同時に置かれた状態の周波数特性の仮想データを生成し、そのセッションの訓練データとする。推定式は運動方程式を基に作成されており、振幅スペクトルの加減算によって、物体が単体で置かれた状態と何も配置されていない状態から、複数同時に置かれた状態を推定する。詳細は、先行研究 [8] を参照されたい。セッションのテストデータには、実際に物体が複数同時に配置された状態で測定した周波数特性を用いる。このセッションを、5 日間断続的に 17 セッション実施し、22.7°C から 30.5°C までの 17 種類の環境温度データを得た。すなわち、環境温度ごとに訓練データとテストデータを得た。得られたデータのうち、最も高い 30.5°C の訓練データでサポートベクタマシン (SVM) を用いて訓練し、全環境温度のテストデータに対して識別テストを行う。最も高い環境温度の訓練データを用いた理由は、より広い範囲で環境温度低下による識別率の推移を観察できると考えたからである（最も低い温度でも同様のことが可能である）。また、比較のため、同一温度の訓練データとテストデータを用いて、それぞれ SVM を訓練し、識別精度を求める。識別には、Python の scikit-learn パッケージで実装された線形カーネル ($C = 100$) の SVM を用いる。

また、すべての測定の際には、同時にリファレンスサーフェスにもスイープ信号を印加し、リファレンスサーフェスの周波数特性を記録した。

図 5 に、測定で得られた環境温度と、環境温度変化による物体識別率の推移を示す。赤色のプロットは、訓練と識別テストを同じ環境温度データで実施したものであり、温度影響のないリファレンスとして用いる。青色のプロットは、30.5°C で訓練した SVM を用いて、各環境温度データ

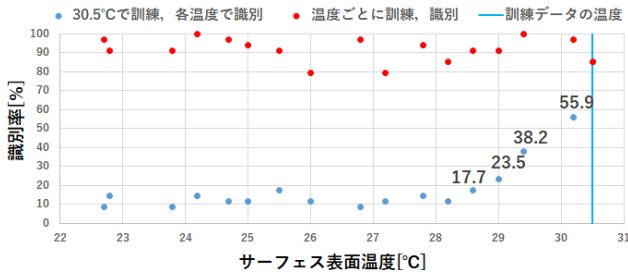


図 5 各環境温度における物体識別率

Fig. 5 Object identification rates for changes in environmental temperature.

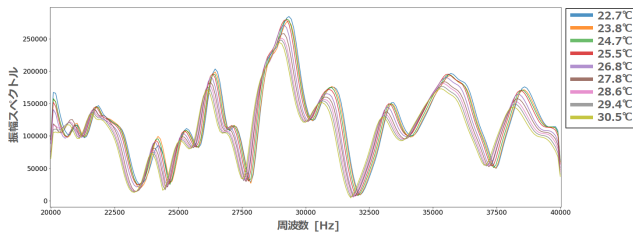


図 6 各環境温度におけるリファレンスサーフェスでのスイープ信号応答

Fig. 6 Frequency characteristics of the reference surface at each environmental temperature.

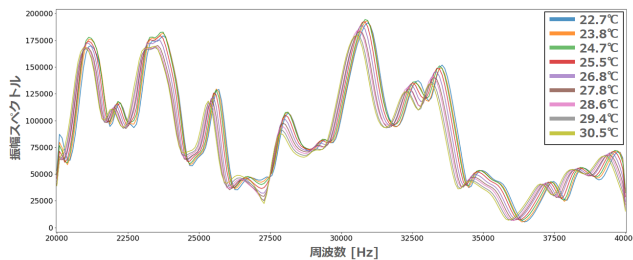


図 7 各環境温度における物体を載せていないプロトタイプでのスイープ信号応答

Fig. 7 Frequency response of the prototype without the object on it at each environmental temperature.

を識別テストし、物体識別率の推移を表したものである。図 5 の青色のプロットから、環境温度が異なると物体識別率が著しく低下していることが分かる。たとえば、識別器を訓練した 30.5°C から約 1°C 環境温度が下がると、物体識別率が 38.2% まで低下することが分かる。赤色のプロットとの比較から、環境温度変化による物体識別率への悪影響が確認された。また、図 6 に、リファレンスサーフェスの環境温度別の周波数特性を示す。図 7 には、プロトタイプに物体を載せていない状態の周波数特性を環境温度別に示す。図 6 および図 7 から、環境温度の変化により、周波数特性が周波数軸方向と振幅軸方向に対して変動することが確認できる。具体的には、環境温度が下がると、スペクトルのピークが右方向（周波数の正方向）へ移動することが観察された。また、環境温度が下がることでピークの高さ（振幅）が変化することが観察された。このピーク値の

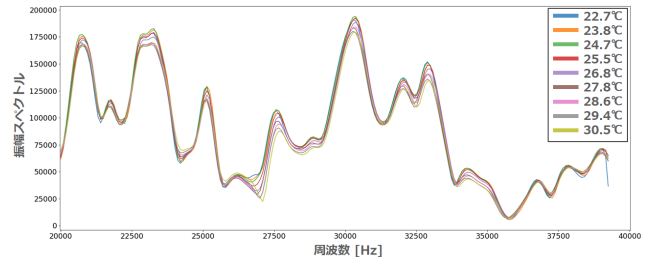


図 8 周波数方向への補正結果

Fig. 8 Result of frequency correction.

増減の様子は、サーフェスごと、周波数ごとに異なる変化であり、サーフェスのサイズが異なる場合、振幅方向の変化が異なることが確認された。

4. 環境温度変化に対する補正手法の検討

本章では、3.2 節で確認された環境温度による周波数特性への影響を補正する方法を、周波数方向と振幅方向に対して検討する。

4.1 周波数方向への補正

一般に物体の固有周波数 f は、

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

と表される。ここで、 k はその物体の剛性定数、 m は質量である。環境温度が変化すると剛性定数が変化するため、環境温度変化後の合成定数を k' とすると、 f' は、

$$f' = f \sqrt{\frac{k'}{k}} \quad (2)$$

となる。したがって、環境温度変化の前後における固有周波数の比 f'/f は一定となる。これは、サーフェスの質量やサイズには関係しない。したがって、リファレンスサーフェスで得た固有周波数の変化前後の比を利用して、物体を置いたサーフェスの応答を補正できると考えられる。図 8 に、図 7 の周波数特性を補正したものを示す。図 7 の周波数特性の周波数軸に対して f'/f の逆数を乗算することで、周波数軸に対して伸縮させることで補正した。図 8 では、図 7 と比較して、周波数方向のずれが少なくなっていることが確認できる。したがって、物体を載せないリファレンスサーフェスで得られた固有周波数の比を用いて、プロトタイプのスイープ信号応答の周波数方向への補正が可能となることが分かる。

4.2 振幅方向への補正

3.2 節の結果から、振動の周波数に加え、振幅も環境温度変化の影響を受けることが示唆された。また、サーフェスのサイズが異なる場合は振幅方向の変化が異なるため、4.1 節のように、リファレンスサーフェスの応答を用いてプロトタイプの応答を補正することは難しいと考えられる。

そこで、プロトタイプにおける、物体を載せた状態の周波数スペクトルと、何も置いていない状態の周波数スペクトルの差分を、環境温度ごとに比較することで、配置物体による周波数特性の変化と環境温度の関係性を調べた。図 9 に、物体（ノート）をサーフェス中央に置いたときと、何も載せていないときの周波数スペクトルの差分を、環境温度ごとにプロットしたグラフを示す。図 9 から、環境温度を変えることで各周波数における振幅が不規則に変化していることがうかがえる。一方で、物体を載せていない場合（図 7）と同様の規則性で振幅が変化している可能性が考えられ、すなわち、物体による振幅変化と環境温度による振幅変化は独立であるという仮説を立てた。この仮説に基づき、何も載せていない状態の、環境温度による振幅の変化量の実測値をほかの温度で得られたスイープ信号応答に適用することで、周波数特性を補正することを試みる。具体的には、ある環境温度 $T^{\circ}\text{C}$ における物体を載せていない状態の周波数スペクトルから、訓練データである 30.5°C における物体を載せていない状態の周波数スペクトルとの差分を求める（この差分が、環境温度による影響分であるとみなされる）。この差分を $T^{\circ}\text{C}$ である物体を置いた状態の周波数スペクトルから減算することで、 30.5°C である物体を置いた状態のスイープ信号応答を生成する。

図 10 は、補正結果の例として、 25.5°C において得られた物体を配置しない場合 (None)、ノート (Notebook)、マグカップ (Mug) を配置した場合の 3 状態の周波数スペクトルから、 30.5°C における周波数スペクトルを周波数方向・振幅方向の補正により擬似的に生成したものを示して

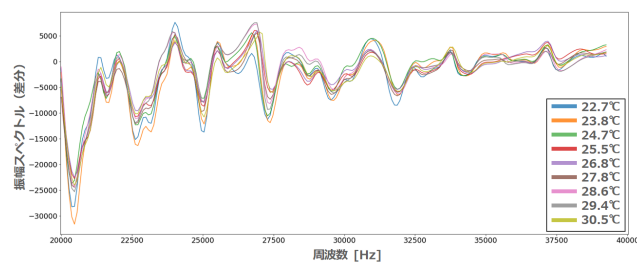


図 9 各環境温度においてノートをサーフェス中央に載せた際のスイープ信号応答の変化

Fig. 9 Variation in frequency characteristics as the notebook is placed in the center of the surface at different environmental temperatures.

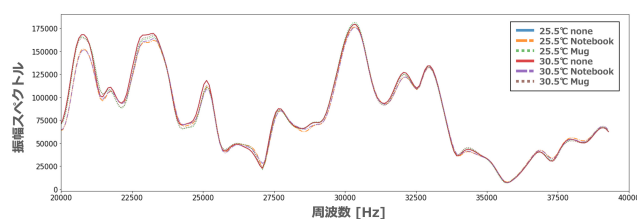


図 10 周波数方向・振幅方向の補正結果の例

Fig. 10 Example of results in frequency and amplitude directions.

いる。図より、3 状態をそれぞれ各温度間で比べると、各ピークに見られる振幅ではわずかな差が見られるものの、図 8 に比べて小さくなっていることが分かり、補正手法の妥当性が示唆された。

4.3 環境温度変化に対する補正の結果・考察

まず、 30.5°C で得られた周波数特性を用いて識別器を訓練させる。次に式 (2) および 4.1 節に基づき、各環境温度におけるスイープ信号応答を、 30.5°C のデータとなるように、周波数方向を補正する。次に 4.2 節に基づき、各環境温度におけるスイープ信号応答を、 30.5°C のデータとなるように、振幅方向を補正する。補正された環境温度別データを、 30.5°C のデータのみで訓練した識別器で識別し、物体識別精度を求める。また、比較のため、各環境温度におけるスイープ信号応答周波数方向のみと、振幅方向のみのそれぞれの場合で、 30.5°C のデータとなるように補正して物体識別精度を求める。

表 1 に、すべての環境温度における識別率の平均を補正の方法別に示す。また、図 11 に、図 5 のデータに環境温度変化を補正したデータでの物体識別率を加えたものを示す。表 1 から、平均識別率は補正なしの場合では 21.6%、周波数方向と振幅方向の両方を補正した場合は 75.1% となった。図 11 から、補正前の青色のプロットと補正後の緑色のプロットを比較すると、すべての温度において補正後の識別精度が向上していることが分かる。また、補正後では、おおむね 70% 以上の精度で物体が識別できていた一方で、 22.7°C では補正後の精度が 38.2% となり、補正後の識別率の中で最も精度が低くなった。

表 1 補正条件別の識別精度の平均

Table 1 Mean identification accuracy by correction condition.

補正条件	識別精度
補正なし	21.6%
周波数方向のみ補正	25.6%
振幅方向のみ補正	64.0%
周波数方向と振幅方向を補正	75.1%
温度ごとに訓練・識別	91.9%

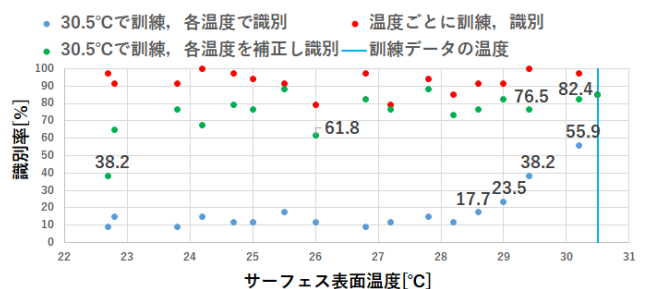


図 11 温度影響補正後の識別精度

Fig. 11 Object identification accuracy after temperature effect correction.

測定結果から、ある特定の温度で識別器を訓練した後、環境温度が変化した場合でも、本研究で検討した周波数方向と振幅方向の両方の補正手法により、サーフェス上の物体識別率が改善されることが分かった。これにより、スイープ信号応答に環境温度が与える影響と、配置物体が与える影響が独立であると考えて補正しても差し支えないことが分かる。また、表 1 から、振幅方向のみ補正した場合が周波数方向のみ補正した場合より大きいことが確認されるが、周波数方向と振幅方向の両方に補正した場合が最も識別率が高いことが分かる。したがって、周波数方向と振幅方向の両方を補正する必要があることが分かる。一方で、22.7°C では補正後の識別率が最も低くなった。22.8°C においては 64.7% の精度で識別可能であるため、22.7°C の識別率は、環境温度以外の要因によって識別率が低下した可能性が考えられる。この環境温度以外の要因については、物体の位置のずれによる測定誤差など、いくつかの可能性が考えられ、今後詳しく調査する必要がある。

5. 議論

本研究で検討した補正方法によって、22.7°C から 30.5°C の範囲において、スイープ信号応答を周波数方向と振幅方向の両方で 30.5°C のスイープ信号応答となるように補正することで、平均 75.1% の精度で物体識別が可能であり、補正しない場合に比べて明らかに識別率が改善されることが分かった。したがって、本研究で検討した補正方法によって、環境温度に対するロバスト性が向上したといえる。また、識別結果からは、訓練時の環境温度 (30.5°C) に近い温度の条件ほど、補正後の識別精度が高くなる傾向が見られた。このため、本手法を大きな温度変化が起こりうる環境に適用する場合、複数の環境温度における訓練データをあらかじめ用意しておき、識別時の温度に最も近い温度の訓練データを用いて識別するなどの方法により識別精度をさらに高められると考えられる。

この補正手法を用いることにより、アクティブ音響センシングを用いた物体認識を、より実用的な多くの場面で適用可能になると考えられる。たとえば、デスクや特定の棚に置かれた物体の有無を認識する場合や、底面積や重さの大きく異なる物体を識別する場合など、識別が容易な条件であれば、本研究で得られた精度 (平均 75.1%) よりも高い精度が見込まれ、実用に耐えうると考えられる。これらを用いれば、たとえばデスク利用者の作業内容の推定や、貴重品の置き忘れの通知などに応用できる。他にも、先行研究 [8] で示していた冷蔵庫の棚をセンサ化するアプリケーションでは、保存されている食品を認識することで、食品ごとに適切な保存温度を切り替えて提供することが可能となる。

本研究で検討した補正手法は、音響センシングのデータ処理のみによって実現されるため、追加のハードウェア実

装を必要とせず、多くの既存のアクティブ音響センシングを用いた研究にも適用可能であると考えられる。特に、大野らの研究 [47] のように、物体表面の境界条件の変化に着目したシステムでは、我々の補正手法による補正が可能であると考えられる。また、物体そのものの形状変化に着目したシステムでは、物体の形状変化により大気と接する面積が増えるため、我々のシステムより環境温度影響を大きく過敏に受ける可能性がある。したがって、我々の補正手法を適用するためには、今後さらなる検討が必要となると考えられる。

本研究で検討した補正手法以外のアプローチとしては、まず識別器の検討があげられる。これまでも畳み込みニューラルネットワーク (CNN) とパッシブ音響センシングを組み合わせた研究 [20] が報告されている。このように CNN を用いることで、環境温度による複雑な周波数特性の変化に対してもロバストに識別できる可能性がある。しかし、CNN を利用するためには音響信号の周波数スペクトルを画像信号に変換する必要があるため、データ処理コストが大きくなることが考えられる。また、サーフェスを構成する材質を、ヤング率やポアソン比の温度依存性が小さいものに変更することで、環境温度によるサーフェスの周波数特性変化が小さくなり、スイープ信号応答への影響も小さくなる可能性がある。しかし、サーフェスの素材に制約を設けるため、アプリケーションが制限される可能性がある。

また、本研究ではあらかじめ環境温度別のスイープ信号応答を収集し、環境温度変化によるスイープ信号応答の変化が既知の状態で行った。今後は、この補正をオンライン化し、システムが未知の環境温度に順次適応していく必要がある。これは、システムが応答をつねに監視することで解決できると考えられる。システムが定期的にスイープ信号応答を観測し、単位時間あたりのスイープ信号応答の変化量を観測することができる。ここで、スイープ信号応答に対する単位時間あたりの配置物体変化による影響は、単位時間あたりの環境温度変化による影響より大きくなると考えられる。したがって、閾値を用いることでこれらを分別し、温度影響のみを補正することが可能であると考えられる。加えて、本研究では物体の質量についてはあまり考慮しなかったが、質量の小さな物体は熱容量が小さいため、環境温度による影響をより受けやすいと考えられる。補正のオンライン化にあたっては、この点も考慮に入れる必要がある。

本研究を通して我々が観測できた環境温度は 22.7°C から 30.5°C の範囲である。これは人の生活空間の環境温度を網羅しているわけではないが、この範囲外の環境温度においても、物体の剛性に急激な変化がない (たとえば相転移などが起こらない) 場合には、本研究で検討した補正手法が適用可能であると考えられる。この適用範囲について

は、今後調査していきたい。より高いまたはより低い環境温度に対して本研究で検討した補正手法を用いることで、たとえばIHヒータ上での鍋やフライパンなどの認識や、オープン内の料理の状態認識、鉄板上の料理の認識、冷凍倉庫などでの在庫管理などが実現できると考えられる。

6. おわりに

本稿では、SenseSurfaceにおける環境温度へのロバスト性向上のため、環境温度によるサーフェスの周波数特性への影響を調査した。具体的には、周波数方向と振幅方向への補正を検討し、物体識別のテストを通して補正方法を評価した。その結果、補正をかける前より識別率の改善が見られたため、スイープ信号応答への環境温度による影響と配置物体による影響が独立であると考えて補正することが可能であると分かった。今後は、観測する環境温度を広げて測定するほか、オンライン処理の実装を進めていく。

謝辞 本研究はJSPS科研費JP20H04228の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Chen, G. and Kotz, D.: A survey of context-aware mobile computing research (online), available from (https://digitalcommons.dartmouth.edu/cs_tr/177) (2000).
- [2] Baldauf, M., Dustdar, S. and Rosenberg, F.: A survey on context-aware systems, *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, Vol.2, No.4, pp.263–277 (2007).
- [3] Redmon, J. and Farhadi, A.: YOLOv3: An Incremental Improvement (2018).
- [4] Xiao, R., Laput, G., Zhang, Y. and Harrison, C.: Deus EM Machina: On-Touch Contextual Functionality for Smart IoT Appliances, *Proc. 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '17*, pp.4000–4008, ACM (online), DOI: 10.1145/3025453.3025828(2017).
- [5] Gong, J., Wu, Y., Yan, L., Seyed, T. and Yang, X.-D.: Tessutivo: Contextual Interactions on Interactive Fabrics with Inductive Sensing, *Proc. 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.29–41, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/3332165.3347897 (2019).
- [6] Laput, G., Xiao, R. and Harrison, C.: ViBand: High-Fidelity Bio-Acoustic Sensing Using Commodity Smartwatch Accelerometers, *Proc. 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.321–333, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/2984511.2984582 (2016).
- [7] Yeo, H.-S., Flamich, G., Schrempf, P., Harris-Birtill, D. and Quigley, A.: RadarCat: Radar Categorization for Input & Interaction, *Proc. 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '16*, pp.833–841, ACM (online), DOI: 10.1145/2984511.2984515 (2016).
- [8] 岩瀬大輝, 伊藤雄一, 秦 秀彦, 尾上孝雄: SenseSurface: アクティブ音響センシングによる物体識別と位置推定, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.10, pp.1869–1880 (2019).
- [9] 岡田元三: オッシログラフの回轉鏡で観測した音叉の温度誤差, 精密機械, Vol.1, No.6, pp.199–201 (1934).
- [10] Laput, G., Yang, C., Xiao, R., Sample, A. and Harrison, C.: EM-Sense: Touch Recognition of Uninstrumented, Electrical and Electromechanical Objects, *Proc. 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.157–166, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/2807442.2807481 (2015).
- [11] Yeo, H.-S., Minami, R., Rodriguez, K., Shaker, G. and Quigley, A.: Exploring Tangible Interactions with Radar Sensing, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol.2, No.4, pp.200:1–200:25 (online), DOI: 10.1145/3287078 (2018).
- [12] Baudisch, P., Becker, T. and Rudeck, F.: Lumino: Tangible Building Blocks Based on Glass Fiber Bundles: Invited Demo, *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '10*, p.299, ACM (online), DOI: 10.1145/1936652.1936727 (2010).
- [13] Bränzel, A., Holz, C., Hoffmann, D., Schmidt, D., Knaust, M., Lühne, P., Meusel, R., Richter, S. and Baudisch, P.: GravitySpace: Tracking Users and Their Poses in a Smart Room Using a Pressure-sensing Floor, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '13*, pp.725–734, ACM (online), DOI: 10.1145/2470654.2470757 (2013).
- [14] Gong, J., Yang, X., Seyed, T., Davis, J.U. and Yang, X.-D.: Inductivo: Contact-Based, Object-Driven Interactions with Inductive Sensing, *Proc. 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '18*, pp.321–333, ACM (online), DOI: 10.1145/3242587.3242662 (2018).
- [15] Villar, N., Cletheroe, D., Saul, G., Holz, C., Regan, T., Salandin, O., Sra, M., Yeo, H.-S., Field, W. and Zhang, H.: Project Zanzibar: A Portable and Flexible Tangible Interaction Platform, *Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18*, pp.515:1–515:13, ACM (online), DOI: 10.1145/3173574.3174089 (2018).
- [16] Laput, G. and Harrison, C.: SurfaceSight: A New Spin on Touch, User, and Object Sensing for IoT Experiences, *Proc. 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1–12, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/3290605.3300559 (2019).
- [17] Harrison, C., Tan, D. and Morris, D.: Skinput: Appropriating the Skin As an Interactive Canvas, *Comm. ACM*, Vol.54, No.8, pp.111–118 (online), DOI: 10.1145/1978542.1978564 (2011).
- [18] Paradiso, J.A., Leo, C.K., Checka, N. and Hsiao, K.: Passive Acoustic Knock Tracking for Interactive Windows, *CHI '02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '02*, pp.732–733, ACM (online), DOI: 10.1145/506443.506570 (2002).
- [19] Harrison, C. and Hudson, S.E.: Scratch Input: Creating Large, Inexpensive, Unpowered and Mobile Finger Input Surfaces, *Proc. 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '08*, pp.205–208, ACM (online), DOI: 10.1145/1449715.1449747 (2008).
- [20] Chen, M., Yang, P., Xiong, J., Zhang, M., Lee, Y., Xiang, C. and Tian, C.: Your Table Can Be an Input Panel: Acoustic-based Device-Free Interaction Recognition, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol.3, No.1, pp.3:1–3:21 (online), DOI: 10.1145/3314390 (2019).
- [21] Harrison, C., Schwarz, J. and Hudson, S.E.: TapSense: Enhancing Finger Interaction on Touch Surfaces, *Proc.*

- 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, *UIST '11*, pp.627–636, ACM (online), DOI: 10.1145/2047196.2047279 (2011).
- [22] Lopes, P., Jota, R. and Jorge, J.A.: Augmenting Touch Interaction Through Acoustic Sensing, *Proc. ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '11*, pp.53–56, ACM (online), DOI: 10.1145/2076354.2076364 (2011).
- [23] Sim, J.M., Lee, Y. and Kwon, O.: Acoustic Sensor Based Recognition of Human Activity in Everyday Life for Smart Home Services, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol.11, No.9, 679123 (online), DOI: 10.1155/2015/679123 (2015).
- [24] Yatani, K. and Truong, K.N.: BodyScope: A Wearable Acoustic Sensor for Activity Recognition, *Proc. 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing, UbiComp '12*, pp.341–350, ACM (online), DOI: 10.1145/2370216.2370269 (2012).
- [25] Amento, B., Hill, W. and Terveen, L.: The Sound of One Hand: A Wrist-mounted Bio-acoustic Fingertip Gesture Interface, *CHI '02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '02*, pp.724–725, ACM (online), DOI: 10.1145/506443.506566 (2002).
- [26] Wu, J., Harrison, C., Bigham, J.P. and Laput, G.: Automated Class Discovery and One-Shot Interactions for Acoustic Activity Recognition, *Proc. 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1–14, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/3313831.3376875 (2020).
- [27] Murray-Smith, R., Williamson, J., Hughes, S. and Quaade, T.: Stane: Synthesized Surfaces for Tactile Input, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '08*, pp.1299–1302, ACM (online), DOI: 10.1145/1357054.1357257 (2008).
- [28] Harrison, C., Xiao, R. and Hudson, S.: Acoustic Barcodes: Passive, Durable and Inexpensive Notched Identification Tags, *Proc. 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '12*, pp.563–568, ACM (online), DOI: 10.1145/2380116.2380187 (2012).
- [29] Shi, L., Zelzer, I., Feng, C. and Azenkot, S.: Tickers and Talker: An Accessible Labeling Toolkit for 3D Printed Models, *Proc. 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16*, pp.4896–4907, ACM (online), DOI: 10.1145/2858036.2858507 (2016).
- [30] Gong, T., Cho, H., Lee, B. and Lee, S.-J.: Knocker: Vibroacoustic-Based Object Recognition with Smartphones, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol.3, No.3 (online), DOI: 10.1145/3351240 (2019).
- [31] Wylie, C. and Mackie, R.R.: Active Sonar Target Detection and Reporting: Perceived Consequences and their Effects on Performance, Technical Report, Canyon Research Group Inc Goleta Ca Human Factors Research Div (1972).
- [32] Lach, M. and Ermert, H.: An acoustic sensor system for object recognition, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.26, No.1-3, pp.541–547 (1991).
- [33] Kunze, K. and Lukowicz, P.: Symbolic Object Localization Through Active Sampling of Acceleration and Sound Signatures, *UbiComp 2007: Ubiquitous Computing*, Krumm, J., Abowd, G.D., Seneviratne, A. and Strang, T. (Eds.), pp.163–180, Springer Berlin Heidelberg (2007).
- [34] Iravantchi, Y., Goel, M. and Harrison, C.: BeamBand: Hand Gesture Sensing with Ultrasonic Beamforming, *Proc. 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '19*, pp.15:1–15:10, ACM (online), DOI: 10.1145/3290605.3300245 (2019).
- [35] Shih, O. and Rowe, A.: Occupancy Estimation Using Ultrasonic Chirps, *Proc. ACM/IEEE 6th International Conference on Cyber-Physical Systems*, pp.149–158, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/2735960.2735969 (2015).
- [36] Brenner, M.C. and Fitzgibbon, J.J.: Surface acoustic wave touch panel system, US Patent 4,644,100 (1987).
- [37] Takemura, K., Ito, A., Takamatsu, J. and Ogasawara, T.: Active Bone-conducted Sound Sensing for Wearable Interfaces, *Proc. 24th Annual ACM Symposium Adjunct on User Interface Software and Technology, UIST '11 Adjunct*, pp.53–54, ACM (online), DOI: 10.1145/2046396.2046419 (2011).
- [38] McIntosh, J., Marzo, A., Fraser, M. and Phillips, C.: EchoFlex: Hand Gesture Recognition Using Ultrasound Imaging, *Proc. 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1923–1934, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/3025453.3025807 (2017).
- [39] Iravantchi, Y., Zhang, Y., Bernitsas, E., Goel, M. and Harrison, C.: Interferi: Gesture Sensing Using On-Body Acoustic Interferometry, *Proc. 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1–13, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/3290605.3300506 (2019).
- [40] Amesaka, T., Watanabe, H. and Sugimoto, M.: Facial Expression Recognition Using Ear Canal Transfer Function, *Proc. 23rd International Symposium on Wearable Computers*, pp.1–9, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/3341163.3347747 (2019).
- [41] Zhang, C., Xue, Q., Waghmare, A., Meng, R., Jain, S., Han, Y., Li, X., Cunefare, K., Ploetz, T., Starner, T., Inan, O. and Abowd, G.D.: FingerPing: Recognizing Fine-grained Hand Poses Using Active Acoustic On-body Sensing, *Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18*, pp.437:1–437:10, ACM (online), DOI: 10.1145/3173574.3174011 (2018).
- [42] Fan, M. and Truong, K.N.: SoQr: Sonically Quantifying the Content Level inside Containers, *Proc. 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp.3–14, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/2750858.2804264 (2015).
- [43] Zhao, Y., Yao, S., Li, S., Hu, S., Shao, H. and Abdelzaher, T.F.: VibeBin: A Vibration-Based Waste Bin Level Detection System, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol.1, No.3, pp.122:1–122:22 (online), DOI: 10.1145/3132027 (2017).
- [44] Olson, R.S. and Christensen, E.L.: Nonintrusive acoustic liquid level sensor, US Patent 4,901,245 (1990).
- [45] Kubo, Y., Eguchi, K., Aoki, R., Kondo, S., Azuma, S. and Indo, T.: FabAuth: Printed Objects Identification Using Resonant Properties of Their Inner Structures, *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '19*, pp.LBW2215:1–LBW2215:6, ACM (online), DOI: 10.1145/3290607.3313005 (2019).
- [46] Katakura, S. and Watanabe, K.: ProtoHole: Prototyping Interactive 3D Printed Objects Using Holes and Acoustic Sensing, *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '18*, pp.LBW112:1–LBW112:6, ACM (online),

- DOI: 10.1145/3170427.3188471 (2018).
- [47] Ono, M., Shizuki, B. and Tanaka, J.: Touch & Activate: Adding Interactivity to Existing Objects Using Active Acoustic Sensing, *Proc. 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '13*, pp.31–40, ACM (online), DOI: 10.1145/2501988.2501989 (2013).
- [48] Liu, J., Wang, C., Chen, Y. and Saxena, N.: Vib-Write: Towards Finger-input Authentication on Ubiquitous Surfaces via Physical Vibration, *Proc. 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, CCS '17*, pp.73–87, ACM (online), DOI: 10.1145/3133956.3133964 (2017).
- [49] Ewins, D.J.: *Modal testing: Theory, practice and application*, John Wiley & Sons (2009).



尾上 孝雄 (正会員)

1993年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。大阪大学助手、講師、京都大学助教授、大阪大学助教授を経て、2003年大阪大学教授。博士(工学)。



川崎 祐太

2021年大阪大学大学院情報科学研究科情報システム工学専攻博士前期課程修了。同年より株式会社WOWOW。



伊藤 雄一 (正会員)

2000年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年同大学院博士後期課程入学。2002年同大学院情報科学研究科助手。2008年大阪大学クリエイティブユニット(旧ウェブデザインユニット)准教授。2021年より青山学院大学理工学部教授。博士(情報科学)。



藤田 和之

2010年大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程修了。2013年同研究科情報システム工学専攻博士後期課程修了、同年株式会社イトーキ。2018年より東北大学電気通信研究所助教。博士(情報科学)。