

# 音漏れ信号を用いたヒアラブルデバイス向け 個人認証手法の検討

雨坂 宇宙<sup>1,a)</sup> 渡邊 拓貴<sup>2,b)</sup> 杉本 雅則<sup>2,c)</sup> 志築 文太郎<sup>1,d)</sup>

**概要：**ユーザの生活を支える新たなウェアラブルデバイスとしてヒアラブルデバイスが注目されており、現在もヒアラブルデバイスに様々な機能を搭載するための研究が進められている。これらの機能の一部を実社会で実装するためには、セキュリティ対策として装着者の認証を行う必要がある。したがって、いくつかのヒアラブルデバイス向け個人認証手法が研究されてきた。本研究ではヒアラブルデバイスの音漏れに着目し、外耳道反響音と耳介反響音にて装着者の認証を行うシステムを開発した。本研究では、音漏れ信号および耳介の音響特性を理解するための基礎調査と、10名の参加者による認証実験を行った。認証実験の結果、個人識別性能を示すF値は99.5%、個人認証性能を示す平均ROC曲線（Receiver Operating Characteristic Curve）のAUC（Area Under the Curve）スコアは0.993であった。

## 1. はじめに

イヤホン型ウェアラブルデバイスであるヒアラブルデバイスは、多様な機能を有する新しいプラットフォームとして注目されている。ヒアラブルデバイスには、これまでの音楽や通話を楽しむイヤホン本来の機能に加えて、装着者のライフログやバイタルセンシングを行い、健康管理を支援する機能や、音声アシスタントによる情報通知や経路案内などの日常生活を支援する機能など、様々な機能が搭載されると考えられる。その中には、装着者の認証が必要なアプリケーションも想定される。例えば、リマインダ機能やボイスメモ機能を実装するためには、ユーザのプライベートな情報の漏洩を防ぐために装着者の認証が必要になると考えられる。また、装着者の認証が可能となれば、音声アシスタントを介してヒアラブルデバイスのみでECサイトから商品や電子コンテンツの購入ができるサービスなどを提供できる可能性もある。このように、デバイスの装着者の認証機能を実現することは今後のヒアラブルデバイスの発展において重要な技術と考えられる。

ヒアラブルデバイス向け個人認証機能を実現するために、スマートウォッチやスマートフォンで利用されてきた技術をそのまま適用することはいくつかの課題がある。例

えば、ヒアラブルデバイスにはスマートウォッチやスマートフォンと異なり複数箇所のタッチ点を認識できるようなタッチパネルは搭載されていない。また、デバイスの装着位置（耳周辺）も考慮すると、タッチパネルを用いた一般的なPINコード入力による認証手法は現実的でない。その他に、スマートフォンで一般的に利用される指紋センサも、筐体サイズの制約や実装コストなどの課題が残っている。一方、音声認証はマイクのみで実現でき、ヒアラブルデバイス向け個人認証手法として有効であると考えられる。しかし、音声認証は公共の場や騒音環境で利用することができない問題がある。

このような理由から、ヒアラブルデバイス向けに設計された個人認証方法に関する研究が行われている。EarEcho [5] は外耳道の音響特性を利用した認証手法であり、高い認証性能を有している。ToothSonic [12] は、ユーザーが歯を噛んだときに発生する音が、歯型や体内を伝播する過程で個人性を示す特性を利用した認証手法である。これらの研究は、ヒアラブルデバイスで最も一般的なセンサであるスピーカとマイク、またはマイクのみで実現できる点で、ヒアラブルと親和性が高い。一方、外耳道の音響特性を取得するためには、内向きマイクが必要である。内向きマイクはフィードバックアクティブノイズキャンセルなど限られた用途にしか利用できず、外側マイク（音声録音・外音取り込み・フィードフォワードアクティブノイズキャンセル）に比べると重要度は低い。そのため、市販のヒアラブルでは、内向きマイクを搭載しているモデルは少なく、EarEchoで利用している超音波帯域の音響信号を測定できるデバイ

<sup>1</sup> 筑波大学

<sup>2</sup> 北海道大学

<sup>3</sup> 国立研究開発法人科学技術振興機構

a) amesaka@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

b) hiroki.watanabe@ist.hokudai.ac.jp

c) sugi@ist.hokudai.ac.jp

d) shizuki@cs.tsukuba.ac.jp

スは販売されていない。一方、歯のかみ合わせの音に基づく認証はマイクのみで実現でき、多くの市販デバイスに搭載可能であると考えられる。しかし、歯科治療による歯型の変形の影響については未調査である。

本研究では、ヒアラブルデバイスが音響信号を再生する際に、耳の外側へと漏れる信号（音漏れ信号）に着目した新たな生体認証方法を提案する。具体的には、時間とともに周波数が上昇するアップスイープ信号をヒアラブルデバイスから再生し、その音漏れを外側マイクから録音する。この音漏れ信号には外耳道の音響特性（外耳道反響音）が含まれているため、EarEchoと同様に個人認証に利用できる。また、耳介を手で覆うことで音漏れ信号は手と耳介で形成された空間を反響する。この反響音を我々は耳介反響音と定義した。耳介反響音は耳介と手の形状の情報を保持しているが、耳介や手の形状も個人で異なるため、耳介反響音にも個人差が生じる。提案手法は、ヒアラブルデバイスに搭載されている最も一般的なセンサであるスピーカと外側マイクを使用するため、ヒアラブルデバイスへの実装が容易である。また、提案手法は耳介反響音という新たな生体特性を利用しており、従来手法と組み合わせることで、より頑健な認証手法を実現するなど、マルチモーダルな認証手法への応用も期待できる。本研究では、音漏れ信号および耳介の音響特性を理解するための基礎調査と、10名の参加者による認証実験を行った。認証実験の結果、個人識別性能を示すF値は99.5%、個人認証性能を示す平均ROC曲線（Receiver Operating Characteristic Curve）のAUC（Area Under the Curve）スコアは0.993であった。

## 2. 関連研究

本節ではヒアラブルデバイス向け個人認証手法に関する研究・耳介の個人性に関する研究・音響センシングを用いたヒアラブルデバイスに関する研究についてそれぞれ説明する。

### 2.1 ヒアラブルデバイス向け個人認証手法

ヒアラブルデバイスを用いて生体特性や個人の動作特性を取得し、認証手法に利用する研究がいくつか提案されてきた。EarEcho [5] は外耳道内部の音響特性を利用した個人認証手法である。認識システムはヒアラブルデバイスのスピーカと外耳道内の音を録音する内向きマイクを用いてユーザの外耳道音響特性を取得し、装着者の認証を行う。EarDynamic [13] はEarEchoと同様に外耳道音響特性を用いた個人認証手法であるが、ユーザの顔の動きに伴う音響特性の変化に着目している。ToothSonic [12]・TeethPass [15] は歯のかみ合わせ時に生じる音をヒアラブルデバイスに内蔵されているマイクから録音し、音声データを解析することで個人認証を実現している。HeartPrint [3] はヒアラブルデバイス内蔵の内向きマイクを用いて装着者の心音を録

音し、音声データを解析することで個人認証を実現している。EarGate [4] はヒアラブルデバイス内蔵のマイクを用いて歩行時に生じる体内発生音を録音し、ユーザの歩容を取得している。得られた数歩分の歩容データから個人認証を行っている。

これらの研究の内、外耳道の音響特性を取得するためには内向きに配置されたマイクが必要である。内向きマイクは高機能なノイズキャンセリングなどの限定的な利用のために搭載されており、外側マイクよりも重要度は低い。したがって、市販のヒアラブルデバイスにも搭載されているモデルは少ない。歯のかみ合わせによる認証では歯科治療による歯型の変形などの影響がある。心音や歩容による個人認証ではユーザの継続的な心音・歩容の測定が必要であるため、デバイス装着後の認証が困難であるという課題がある。提案手法は、ヒアラブルデバイスに搭載されている最も一般的なスピーカと外側マイクを利用するため、デバイス実装コストが低減できる。また、外耳道や耳介形状は歯と比較して外科治療などで形状が変化する可能性が低い。さらに、提案手法はデバイス装着後、即時に認証が可能である。

### 2.2 耳介の個人性に関する研究

耳介は周囲の音を効率的に收音し、外耳道へ送る役割がある [9]。耳介形状は個人によって異なることが知られており、音の聞こえ方が個人によって異なることの要因の一つとされている。したがって、立体音響を再現するために耳介の伝達関数を測定する研究が行われていた [10]。一方、耳介形状の個人性を利用して個人認証を目指す研究もいくつか行われてきた。Holzら [6] はスマートフォンのタッチスクリーンをセンサとして利用し、スマートフォンを耳に当てることで耳介の空間特徴点を取得し個人認証を行うシステムを提案している。Itaniら [7] はスマートフォン型デバイスを耳に当てることで耳介伝達関数を取得し、個人認証を行うシステムを提案している。また、Sulavkoら [11] はヘッドホンを用いて耳介と外耳道の音響特性を取得し、個人性を調査している。

これらの研究は耳介形状の個人性について取得し、立体音響の再現や個人認証に利用することを目指しており、提案手法も同様に個人認証を目指している。一方で、これまでの研究は利用するデバイスタイプがイヤホン型ではない。提案手法はイヤホン型デバイスに一般的に搭載されているスピーカ・外側マイクを用いて耳介の音響特性を取得するために、音漏れ信号と手で覆う動作に着目している。

### 2.3 音響センシングを用いたヒアラブルデバイス向けジェスチャ入力手法

ヒアラブルデバイスには音楽鑑賞や通話のためにスピーカ・マイクが搭載されており、音響センシングとの親和性

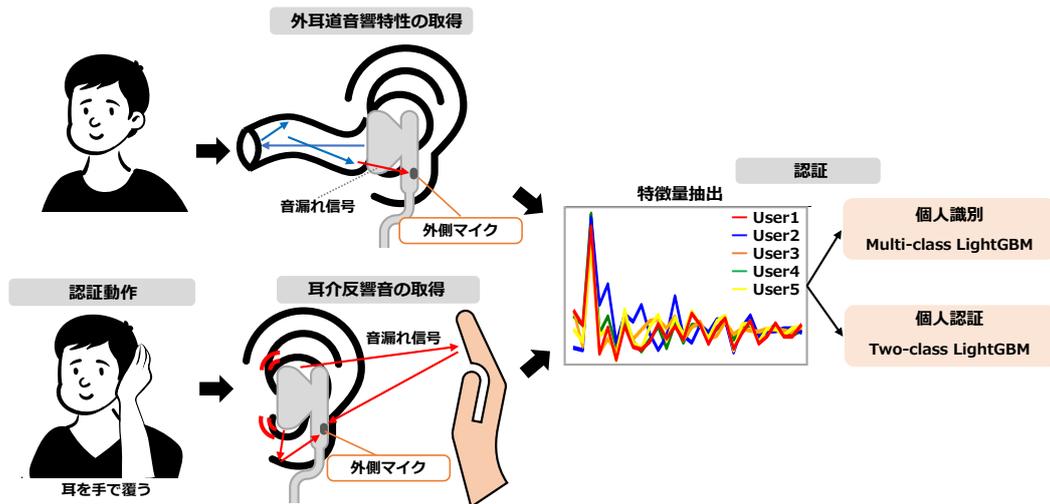


図 1: 認識システムの全体の流れ

が高い。したがって、個人認証手法以外にも音響センシングを用いたヒアラブルデバイスに関する研究は行われてきた。Amesaka ら [1] は顎をずらす、右を向くなどの頭部状態によって外耳道の形状が変化し、それに伴い外耳道音響特性が変化する性質を利用し、頭部状態をデバイスへの入力に用いる手法を提案している。Jin ら [8] は同様の手法を用いて、連続的な外耳道の形状変化を測定し、黙声による単語の発話内容を認識している。Xu ら [16] は市販されているヒアラブルデバイスに内蔵されているマイクを用いて、デバイス周辺で行うタップやスワイプ時に発生する音を解析し、デバイスへのジェスチャ入力に利用する手法を提案している。また、筆者ら [17] は提案手法と同じ音漏れ信号を用いて、手の形状によって変化する耳介反響音を取得・解析することでデバイスへのジェスチャ入力に利用する手法を提案している。

これらの研究はスピーカ・マイクまたはマイクを用いる音響センシング技術を用いてジェスチャ入力を実現している。特に Xu ら [16] と筆者ら [17] の手法は外側マイクまたはスピーカ・外側マイクを用いている。したがって、これらの手法は提案手法との併用ができるため、センサの有効活用が可能である。

### 3. 提案手法

認識システムの全体の流れを図 1 に示す。ユーザはイヤホン型デバイスを装着する。この状態でデバイスから測定信号としてチャープ信号を再生する。チャープ信号とは周波数が一定の間隔で推移する信号であり、広範囲の周波数の応答を高 SN 比で取得するために利用される。再生された測定信号は外耳道にて反響し、一部の信号は耳介側へと漏れる。この音漏れ信号を外側マイクで録音する。音漏れ信号にはユーザの外耳道の音響特性が含まれており、EarEcho [5] と同様に外耳道形状の個人性を取得すること

ができる。また、ユーザが耳介全体を手で覆うことで音漏れ信号は手と耳介で形成された空間内で反響する。この反響音を我々は耳介反響音と定義し、同様に外側マイクにて録音する。個人ごとに耳介や手の形状が異なるため、得られる耳介反響音は変化する。これらの外耳道反響音と耳介反響音の個人毎の変化を機械学習手法にて学習し、装着者の認証を行う。

#### 3.1 個人識別および個人認証

本研究では個人識別システムおよび個人認証システムの評価を行う。

個人識別システムでは、システムは既知のユーザ群から装着者がどのユーザであるか識別する。そのため、学習データに対し、各ユーザのラベルを付与する。分類モデルは各ユーザへの予測確率を計算し、最も高いものを予測ユーザとする。この評価には、ユーザが正しく分類されたことを示す F 値を用いる。

個人認証システムでは、システムは既知のユーザを認証し、それ以外の未知のユーザを拒否する。そのため、学習データに対し、認証者のデータに認証者ラベルを付与し、非認証者のデータに非認証者ラベルを付与する。分類モデルは認証者/非認証者の 2 クラスの予測確率を計算し、定義された閾値に基づいて認証の判定を行う。閾値を変化させることで、2 クラス分類の診断能力を示す ROC 曲線を得ることができる。この評価には、ROC 曲線の面積を表す AUC スコアを用いる。

#### 3.2 特徴量 & 機械学習モデル

取得した音響信号から個人性を示す特徴量の抽出を行う。本研究ではメル周波数ケプストラム係数 (MFCC: Mel-Frequency Cepstrum Coefficients) を特徴量に用いる。機械学習モデルには勾配ブースティング決定木アルゴリズム

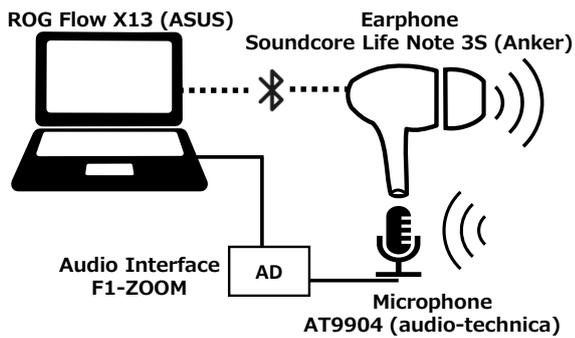


図 2: デバイス構成



図 3: 実験デバイス

(GBM: Gradient Boosting Machine) を用いる。分類モデルを用いて現在の耳介反響音から個人識別および個人認証を行う。

## 4. 実装

本研究で用いたハードウェアおよびソフトウェアの詳細を説明する。

### 4.1 ハードウェア

提案手法はデバイスの外側マイクを利用することを想定している。市販のイヤホン型デバイスに搭載されているマイクはローパスフィルタが内部的にかけられており、高周波帯域の周波数の取得が制限されている。提案手法の本来の性能を調査するために、本実験では市販のイヤホンに別のマイクを固定する。また、予備調査よりカナル型イヤホンの音漏れは小さいことがわかったため、今回の実験ではインナーイヤー型のイヤホンを用いる。デバイス構成を図 2 にまとめた。図 3 に実験に用いたデバイスを示す。本デバイスでは、イヤホンに Anker 社の Soundcore Life Note 3S、マイクに audio-technica 社の AT9904 を用いた。マイクから取得した音響信号は ZOOM 社の F1 オーディオインタフェースを用いて AD 変換し、PC(ASUS 社: ROG Flow X13) へと保存する。

### 4.2 ソフトウェア

本研究で使用するチャープ信号は 0 から 22 kHz に周波

数が遷移するアップチャープ信号を用いた。信号周期は 4,096 サンプル (約 0.093 秒) である。音響信号の再生/録音のサンプリングレートは 44.1 kHz である。信号の再生は PC と Bluetooth 接続したイヤホンより Realtek(R) Audio ドライバを用いて再生する。信号の音量は音漏れを発生させるために通常より大きく設定する必要がある。今回の信号音量は外耳形状を模した模型と騒音計 (SANWA SUPPLY CHESD1) を用いて測定したところ、鼓膜部分にて約 80 dB であった。これは地下鉄車内や航空機内と同程度の騒音レベルであり、短時間での使用を想定すると聴覚健康上問題ないといえる [14]。MFCC 抽出のためのフーリエ変換のウィンドウサイズは 16,384 サンプルとし、8,192 サンプル分のスライドを行った。また、30 分割のメルフィルタバンクを用いて MFCC を 30 次元分抽出し、直流成分である 1 次元目を除いた。上記の MFCC を外耳道反響音と耳介反響音のそれぞれから抽出した 58 次元が学習データの次元数となる。機械学習では訓練データを 5 分割の交差検証を行い、F 値が最も高いパラメータをハイパーパラメータとした。データの測定、特徴量抽出、機械学習のプログラムの実装には Python3.9 を使用した。

## 5. 基礎調査

我々の知る限り、音漏れ信号より得られる外耳道反響音および耳介反響音を利用した認証システムは存在しない。したがって、提案手法の利用する音漏れ信号の特性および個性についての定量的な調査を行った。

### 5.1 音漏れ信号の音響特性

音漏れ信号の音響特性を調査する。本実験では、シリコン製の耳介モデルと外耳道を模したブロック (以降、外耳道モデル) を上下に配置したモデルを用いる (図 4A)。耳介モデルには図 4B の赤丸部分に針金を通し、耳介変形が可能となるように細工した。外耳道モデルは中央に円柱形と円錐形の空洞を有する 2 種類のブロックを 3D プリンタで作製し、片側を紙テープで塞ぐことで鼓膜と外耳道の簡易的なモデルを再現した (図 4C)。ブロックの 1 辺の長さは約 3.5 cm であり、これは外耳道の一般的な長さと同じである。周囲の騒音や音漏れ信号の反響を防ぐため、防音ボックス中央にモデルを置き、この状態でデバイスからチャープ信号を再生し、音漏れ信号を録音した (図 4D)。

#### 5.1.1 外耳道形状が音漏れ信号に与える影響

外耳道形状が音漏れ信号に与える影響を調べるために、同じ耳介モデルにそれぞれ円柱形と円錐形の外耳道モデルを配置した時の音漏れ信号を取得した。図 5A に各外耳道モデルで得られた周波数特性を示す。図より外耳道モデルが異なると得られる周波数特性が最大で 10 dB 程度 (4 kHz~5 kHz) 変化していることがわかる。

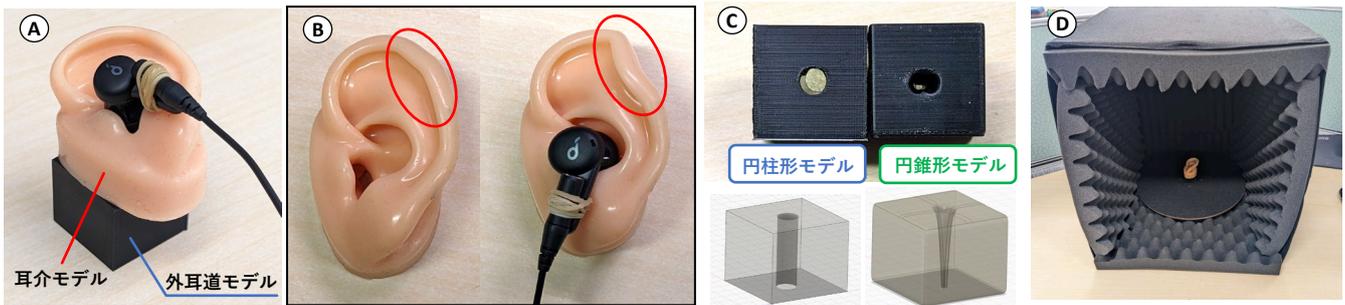


図 4: 音漏れ信号の音響特性調査 A: 測定に利用するモデル, B: 耳介変形 (左: 変形パターン A, 右: 変形パターン B), C: 外耳道モデル (上: 実物, 下: 3D モデル), D: 防音ボックスと測定時のモデル位置

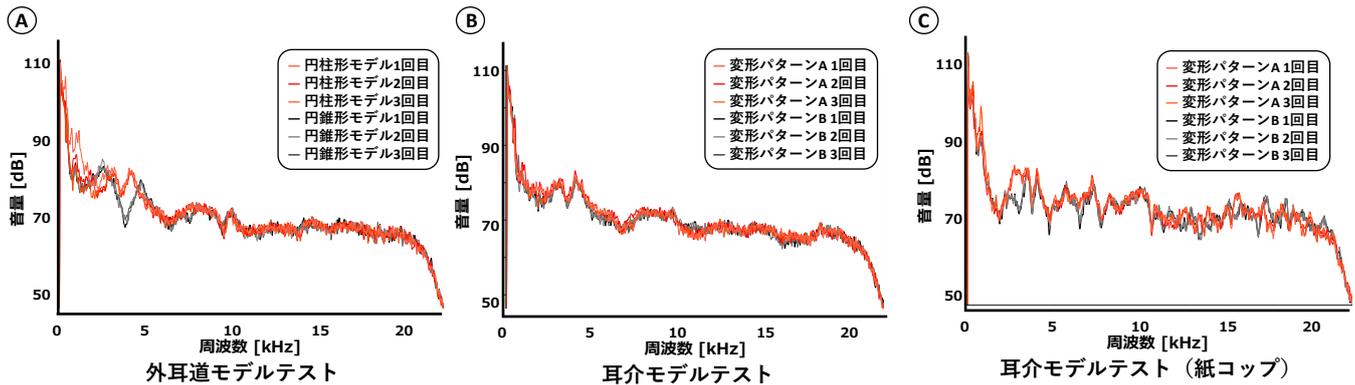


図 5: 各テストの周波数応答 A: 外耳道モデルテスト, B: 耳介モデルテスト, C: 耳介モデルテスト (紙コップ)

### 5.1.2 耳介形状が音漏れ信号に与える影響

耳介形状が音漏れ信号に与える影響を調べるために、同一の外耳道モデル (円柱形) に対して、耳介モデルを変形パターン A と変形パターン B (図 4B) に再現した場合の音漏れ信号の録音を行った。図 5B に各変形パターンで得られた周波数特性を示す。次に、耳介・外耳道モデルを紙コップで覆い、同様にそれぞれの変形パターンにて録音を行った。図 5C に各変形パターンで得られた周波数特性を示す。図 5B より、無反響の音漏れ信号にて耳介の変形は大きな影響を与えることはない。一方で、紙コップで耳全体を覆った場合、音漏れ信号が紙コップ内で反響する。この反響音には耳介の形状が影響を与えることが確認された (図 5C)。

以上の調査より、音漏れ信号は手を覆わない場合は外耳道形状の音響特性が優位であり、耳全体を手で覆うと耳介形状の音響特性が優位になると考えられる。

## 5.2 耳介反響音の個人性

上記の実験より、音漏れ信号を用いて外耳道形状と耳介形状の音響特性を取得できることが確認できた。これらの音響特性のうち、外耳道反響音はこれまでの研究 [5] で個人性を有することが確認されている。一方で、我々の知る限り、提案手法のような音漏れ信号に着目し、耳介全体を手で覆うことで得られる反響音を認証に利用する研究は行

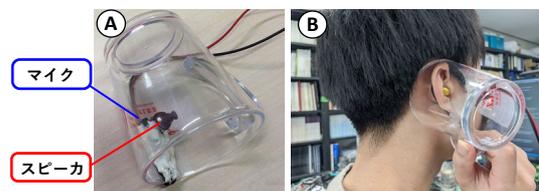


図 6: 耳介の個人性調査実験 A: 測定装置, B: 測定の様子

われていない。本実験では、提案手法が利用する耳介反響音に含まれる耳介形状と手形状の個人性を調査した。

### 5.2.1 耳介の個人性

耳介の個人性についての調査を行う。本実験では、手の形状による影響を排除するため、コップ内にイヤホンとマイクを固定した装置を用いて耳介のみの反響音を取得する (図 6A)。実験では、座った状態で右手でコップの柄を掴み、図 6B のように耳介全体を覆ってもらう。また、外耳道の影響を除くために耳栓を装着してもらった。この状態で 5 秒間チャープ信号を再生し、録音を行う。この録音を装置の再配置を挟んで、5 セット行い、10 名の参加者からデータを測定した。得られたデータにて、提案手法と同様の特徴量抽出と機械学習モデルを用いて個人識別を行った。実験の結果、個人識別率は 99.8%であった。

### 5.2.2 手形状の個人性

手形状の個人性についての調査を行う。本実験では、

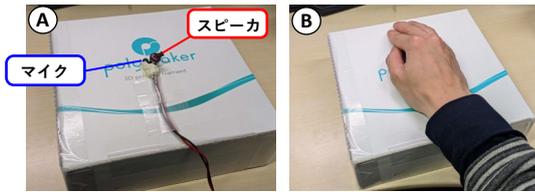


図 7: 手の個性調査実験 A: 測定装置, B: 測定の様子

図 7A で示したイヤホンとマイクを固定した装置を用いて手のみの反響音を取得する。実験では、座った状態で右手でイヤホン・マイク部分を手で覆ってもらう(図 7B)。この状態で 5 秒間チャープ信号を再生し、録音を行う。この録音を手の再配置を挟んで、5 セット行い、10 名の参加者からデータを測定した。得られたデータにて、提案手法と同様の特徴量抽出と機械学習モデルを用いて個人識別を行った。実験の結果、個人識別率は 89.9%であった。

以上の実験より、耳介形状・手形状共に個性を有すると考えられるが、手形状の個性は比較的低いことがわかった。この要因は、手形状の再現度がデータ測定ごとにばらつくことや、手の大きさが似ている参加者同士の反響音が類似してしまったためと考えられる。今後は、各要因が与える影響について調査する必要がある。提案手法は耳介と手形状が組み合わされた状態にて、耳介反響音を取得するため、これらの音響特性が相互に作用すると考えられる。次章にて提案手法の認証性能を調査する。

## 6. 評価実験



図 8: 実験の様子 A: デバイス装着時, B: 耳介反響音取得時

本実験では、10 名の参加者から外耳道反響音および耳介反響音を取得した。実験は研究室で行い、空調の電源は切っていない。実験参加者は測定デバイスを図 8A のように右耳に装着してもらい、椅子に座ってもらう。まず、参加者は手をおろした状態で測定信号を再生し、外耳道反響音を 5 秒間録音する。その後、右手で右耳全体を図 8B のように覆ってもらう。その間に、測定信号を再生し、耳介反響音を 5 秒間録音する。これらの測定を 1 ラウンドとし、デバイスの着脱を挟んで合計 8 ラウンド分のデータ測

定を行った。参加者はマスクを装着し、眼鏡装着者は装着したまま行った。

### 6.1 個人識別

認識システムの個人識別率の調査を行った。識別する参加者の 8 ラウンド分のデータから 1 ラウンド分を検証データとし、残りの 7 ラウンド分のデータとその他の 9 名分のデータを訓練データとする。機械学習時は、汎化性能を高めるために、5 分割の交差検証を行い、F 値を基準としてハイパーパラメータを求める。作成された分類モデルを用いて検証データの識別率を調査する。この調査を全ての参加者とラウンドの組み合わせで行う。各音響特性の影響を調べるために、外耳道反響音のみのデータと耳介反響音のみのデータを用いた場合の識別率も同様の機械学習手法にて調査した。

図 9 に各手法の識別の分布を示す混同行列を示す。右端の数値は各参加者の識別率 (F 値) である。提案手法・外耳道反響音・耳介反響音の識別率の平均はそれぞれ 99.5%, 96.9%, 95.1%であった。

### 6.2 個人認証

認識システムの個人認証率の調査を行った。認証する参加者の 8 ラウンド分のデータから 1 ラウンド分を検証データとし、残りの 7 ラウンド分のデータを認証者用の訓練データとする。その他の 9 名分から 1 名分のデータを未知のデータ (攻撃者) とし、残りの 8 名分のデータを非認証者用の訓練データとする。認証者と非認証者のデータサイズ比がおおよそ 1 : 8 であるため、非認証者データをダウンサンプリングし、データサイズを均等にした。機械学習時は、汎化性能を高めるために、5 分割の交差検証を行い、F 値を基準としてハイパーパラメータを求める。作成された分類モデルを用いて検証データの認証率を調査する。この調査を全ての参加者とラウンドの組み合わせで行う。各音響特性の影響を調べるために、外耳道反響音のみのデータと耳介反響音のみのデータを用いた場合の認証率も同様の機械学習手法にて調査した。

図 10 に提案手法と外耳道反響音のみデータと耳介反響音のみデータのそれぞれの ROC 曲線をまとめた。提案手法・外耳道反響音・耳介反響音の認証率を示す AUC スコアはそれぞれ 0.993, 0.989, 0.983 であった。

## 7. 議論および今後の課題

### 7.1 認証性能

本実験では 10 名の参加者より測定した外耳道反響音および耳介反響音を用いて、提案手法の認証性能を調査した。個人識別と個人認証の両方において、提案手法 (外耳道反響音 + 耳介反響音) の認証性能が最も高かった。これは、提案手法が実際に外耳道と耳介の音響特性を、それぞれの

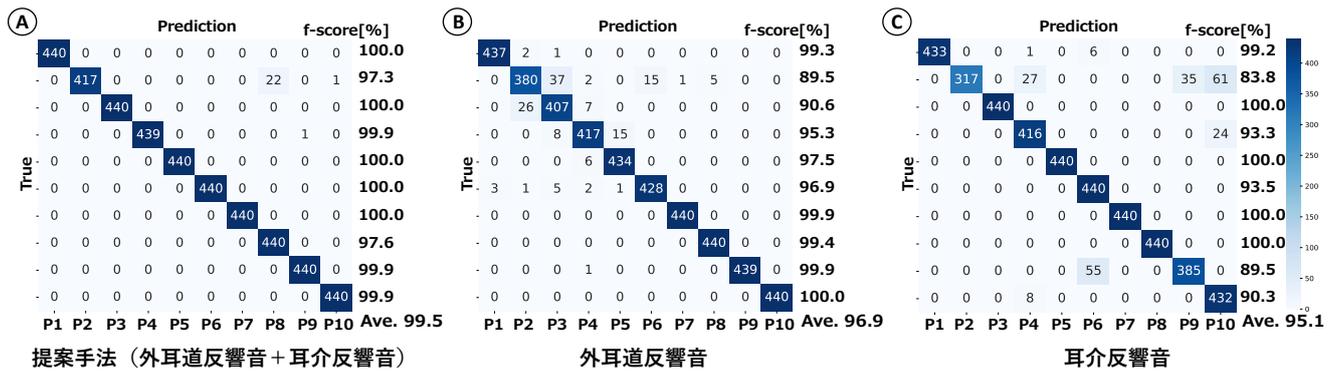


図 9: 個人識別の混同行列 A: 提案手法, B: 外耳道反響音のみ, C: 耳介反響音のみ

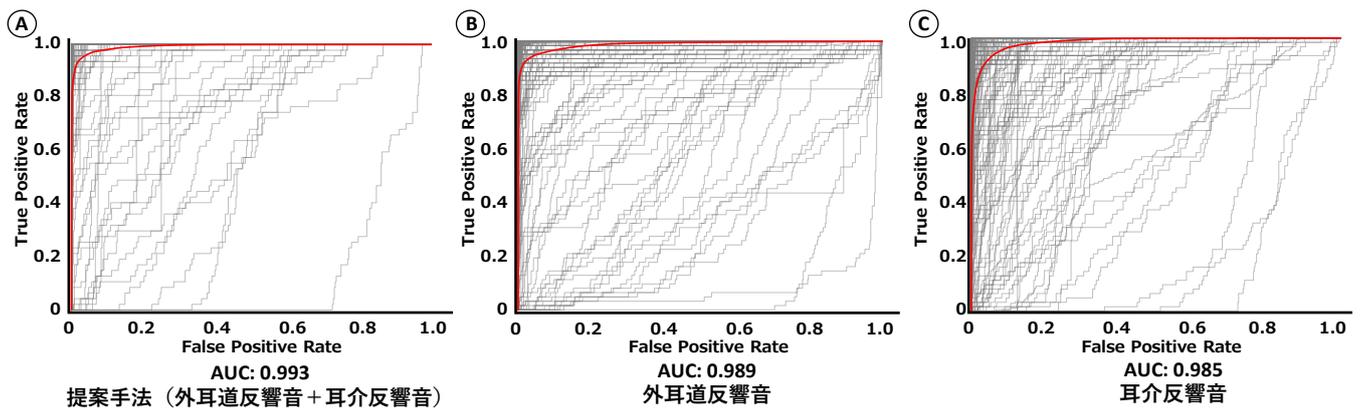


図 10: 個人認証の ROC 曲線. 黒線は各検証データの ROC 曲線を示し, 赤線は全体平均を示す. A: 提案手法, B: 外耳道反響音のみ, C: 耳介反響音のみ

測定方法にて取得できていたためであると考えられる。それぞれの反響音の認証性能は、耳介反響音の認証性能が外耳道反響音の認証性能よりも低かった。基礎調査にて、耳介形状には高い個人性（10名の個人識別率：99.8%）があることが示されていた。一方で、手形状の個人性が低い（10名の個人識別率：89.9%）ことも確認しており、手形状の音響特性が耳介反響音の認証性能の低下の要因となったと考えられる。手形状の音響特性の個人性が低い理由は、手形状の再現度がデータ測定ごとにばらつくことや、手の大きさが似ている参加者同士の反響音が類似してしまったためと考えられる。今後は、手形状が耳介反響音に与える影響を精査し、手形状に依存しない特徴量の発見や性能向上のための機械学習アルゴリズムの改善を目指す。

## 7.2 実用環境の認証性能の調査

本研究では、同一環境で測定したデータのみを用いて認証性能評価を行っている。実用環境を想定すると、ノイズ環境や歩行中などに認証が可能であるか調査する必要がある。また、測定人数も更に増やし、年齢・性別・髪型・ピアス等の影響も調査する必要がある。また、実用環境では悪意のある攻撃者が手形状や耳介形状を再現することで認証をすり抜ける（リプレイ攻撃）可能性がある。今後は提

案手法のリプレイ攻撃に対する脆弱性を調査する必要がある。

## 7.3 異なるデバイスタイプでの認証性能の調査

本研究ではインナーイヤ型デバイスによる調査を行った。音漏れ信号が発生するデバイスタイプは、この他にオープンイヤタイプ [2] や骨伝導タイプのデバイスが想定される。これらのデバイスタイプは信号発信部分が耳穴から離れているため、高 SN 比の音漏れ信号を取得できると考えられる。一方で、外耳道反響音の取得が可能であるか未知である。今後は異なるデバイスタイプに提案手法を適用し、認証性能を調査していく予定である。

## 8. まとめ

本論文では、イヤホン型デバイスの音漏れ信号から外耳道反響音と耳介反響音を取得し、装着者の認証を行うシステムを提案した。予備調査として、耳介と外耳道のモデルを用いた音漏れ信号の特性調査およびに耳介形状・手形状の個人性を調査した。その後、10名の参加者よりデータ測定を行い、個人識別率が 99.5% (F 値)、個人認証率が 0.993 (AUC スコア) であることを確認した。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 21J10706/18H04104, JST

さきがけ JPMJPR2138 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Amesaka, T., Watanabe, H. and Sugimoto, M.: Facial Expression Recognition Using Ear Canal Transfer Function, *Proceedings of the 2019 ACM International Symposium on Wearable Computers, ISWC '19*, ACM, pp. 1–9 (online), DOI: 10.1145/3341163.3347747 (2019).
- [2] BOSE: WHAT ARE OPEN-EAR HEADPHONES?, [https://www.bose.com/en\\_us/better\\_with\\_bose/open-ear-headphones.html](https://www.bose.com/en_us/better_with_bose/open-ear-headphones.html) ((2022.08.29. accessed)).
- [3] Cao, Y., Cai, C., Li, F., Chen, Z. and Luo, J.: HeartPrint: Passive Heart Sounds Authentication Exploiting In-Ear Microphones, *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2023 - IEEE Conference on Computer Communications*, INFOCOM '23, IEEE (2023).
- [4] Ferlini, A., Ma, D., Harle, R. and Mascolo, C.: EarGate: Gait-Based User Identification with in-Ear Microphones, *Proceedings of the 27th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '21, ACM, pp. 337–349 (online), DOI: 10.1145/3447993.3483240 (2021).
- [5] Gao, Y., Wang, W., Phoha, V. V., Sun, W. and Jin, Z.: EarEcho: Using Ear Canal Echo for Wearable Authentication, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 3, No. 3 (online), DOI: 10.1145/3351239 (2019).
- [6] Holz, C., Buthpitiya, S. and Knaust, M.: Bodyprint: Biometric User Identification on Mobile Devices Using the Capacitive Touchscreen to Scan Body Parts, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, ACM, pp. 3011–3014 (online), DOI: 10.1145/2702123.2702518 (2015).
- [7] Itani, S., Kita, S. and Kajikawa, Y.: Multimodal Personal Ear Authentication Using Acoustic Ear Feature for Smartphone Security, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 68, No. 1, pp. 77–84 (online), DOI: 10.1109/TCE.2021.3137474 (2022).
- [8] Jin, Y., Gao, Y., Xu, X., Choi, S., Li, J., Liu, F., Li, Z. and Jin, Z.: EarCommand: "Hearing" Your Silent Speech Commands In Ear, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 6, No. 2 (online), DOI: 10.1145/3534613 (2022).
- [9] Middlebrooks, J. and Green, D.: Sound Localization by Human Listeners, *Annual Review of Psychology*, Vol. 42, pp. 135–159 (online), DOI: 10.1146/annurev.ps.42.020191.001031 (1991).
- [10] Spagnol, S., Geronazzo, M. and Avanzini, F.: Fitting pinna-related transfer functions to anthropometry for binaural sound rendering, *Proceedings of the 2010 IEEE international workshop on multimedia signal processing*, IEEE, pp. 194–199 (online), DOI: 10.1109/MMSP.2010.5662018 (2010).
- [11] Sulavko, A.: Biometric-Based Key Generation and User Authentication Using Acoustic Characteristics of the Outer Ear and a Network of Correlation Neurons, *Sensors*, Vol. 22, No. 23 (online), DOI: 10.3390/s22239551 (2022).
- [12] Wang, Z., Ren, Y., Chen, Y. and Yang, J.: ToothSonic: Earable Authentication via Acoustic Toothprint, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 6, No. 2 (online), DOI: 10.1145/3534606 (2022).
- [13] Wang, Z., Tan, S., Zhang, L., Ren, Y., Wang, Z. and Yang, J.: EarDynamic: An Ear Canal Deformation Based Continuous User Authentication Using In-Ear Wearables, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 5, No. 1 (online), DOI: 10.1145/3448098 (2021).
- [14] World Health Organization: Safe Listening Devices and Systems (2019).
- [15] Xie, Y., Li, F., Wu, Y., Chen, H., Zhao, Z. and Wang, Y.: TeethPass: Dental Occlusion-Based User Authentication via In-Ear Acoustic Sensing, *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications*, INFOCOM '22, IEEE, pp. 1789–1798 (online), DOI: 10.1109/INFOCOM48880.2022.9796951 (2022).
- [16] Xu, X., Shi, H., Yi, X., Liu, W., Yan, Y., Shi, Y., Mariakakis, A., Mankoff, J. and Dey, A. K.: EarBuddy: Enabling On-Face Interaction via Wireless Earbuds, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, ACM, pp. 1–14 (online), DOI: 10.1145/3313831.3376836 (2020).
- [17] 雨坂宇宙, 渡邊拓貴, 杉本雅則, 志築文太郎: 音漏れ信号を用いたヒアラブルデバイス向け手形状認識手法の検討, 第30回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ予稿集, WISS '22, ソフトウェア科学会, pp. 87–93 (オンライン), 入手先 (<https://www.wiss.org/WISS2022Proceedings/data/12.pdf>) (2022).