

空間オーディオを用いたヘッドパスワードの提案と音源提示手法の最適化

内藤 龍^{1,a)} 雨坂 宇宙^{1,b)} Tian Min^{1,c)} 杉浦 裕太^{1,d)}

概要：近年、音声アシスタントやバイタルデータの計測などの機能を搭載したイヤホン型のウェアラブルデバイスであるヒアラブルデバイスが注目されている。これらの機能を悪用して、他者の個人情報や機密情報に不正にアクセスすることを防ぐために、ヒアラブルデバイス向けの認証システムが必要とされ、多くの研究が進められている。しかし、既存の研究は、生体情報を用いたものが多く、生体情報の変化や保存への懸念などの問題を抱えている。そこで、我々は、空間音響技術とヘッドジェスチャを用いた知識ベースの認証システムを提案する。具体的には、音源の組み合わせをパスワードとし、空間的に提示される音源をヘッドトラッキングと歯の噛み合わせ音で選択することにより認証を行う。本研究では、この認証システムに適したユーザ好みの音源セットの探索と、識別しやすい音源の数と配置の調査を行った。

1. はじめに

近年、イヤホン型のウェアラブルデバイスであるヒアラブルデバイスが注目されている。ヒアラブルデバイスには、音楽鑑賞や通話などの機能に加えて音声アシスタントやバイタルデータの計測などの機能が搭載されており、それらを活用した様々なアプリケーションが実装されると考えられる。例えば、音声アシスタントの機能によるアプリケーションには、リマインダーやメッセージの送信、ネットショッピングなどがある。また、ヒアラブルデバイスはセンサで心拍^[1]、血圧^[2]、体温^{[3],[4]}、発汗量^[3]などのバイタルデータを測定可能である。そのため、これらのデータを活用した介護や健康管理のアプリケーションが開発されると考えられる。このようなヒアラブルデバイス向けに開発されると予想されるアプリケーションの多くは、クレジットカード情報やバイタルデータなどの個人情報、または、メッセージや予定などの機密情報を利用している。そのため、ヒアラブルデバイスを用いて、他者の個人情報や機密情報に不正にアクセスすることを防ぐために、ヒアラブルデバイス向けの認証システムの開発が必要である。

ヒアラブルデバイスは、センサによるバイタルデータの計測が可能であるため、ヒアラブルデバイス向けの認証システムの研究は、生体情報ベースのものが多く、これま

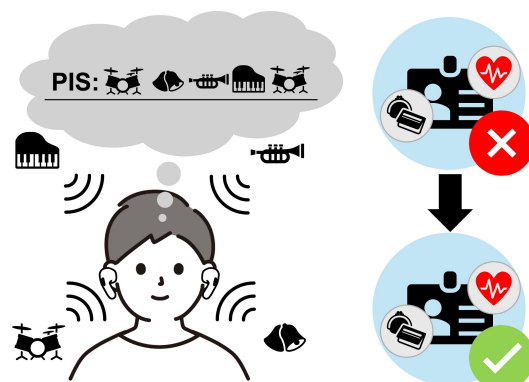


図 1 システム概要

で、外耳道^{[5]-[8]}、耳介^{[6],[9]}、頭蓋骨の形状^{[5],[8],[10]-[13]}、指^{[12],[14]}などの生体情報を利用した認証システムが提案されてきた。しかし、怪我や病気によって生体情報が変化した場合や、プライバシーの観点から生体情報をデバイスに保存したくない場合に、認証システムを利用できないという課題がある。

そこで、我々はヒアラブルデバイスで利用可能な空間音響技術とヘッドトラッキング・音声検知を利用したヘッドジェスチャによる知識ベースの認証システムを提案する。システム利用時、ユーザはあらかじめ複数の音源の組み合わせからなるパスワードである PIS (Personal Identification Sounds) を暗証する。認証時、空間音響技術によって空間的に複数の音源が提示される。ユーザは、ヘッドトラッキングにより選択する音源を正面に捉えた後、歯を噛み合わせることで、その音源を選択する。これを繰り返して、暗証

¹ 慶應義塾大学

a) naitou.ryu.1122@keio.jp

b) amesaka@keio.jp

c) welkinmin@keio.jp

d) sugiura@keio.jp

した PIS の順序通りに音源を選択することで認証を行う。このヘッドトラッキングと歯の噛み合わせ音による音源の選択は、ハンドフリーな選択手法であるため、ユーザビリティや社会的受容性が高い。これらのシステムによる本認証手法は、生体情報やタッチパネルを用いないため、生体情報ベースの認証が不可能な場合や好まれない場合においても、ヒアラブルデバイス単体での認証が可能になる。また、認証の度に音源配置をランダムに変更することで、盗み見による不正アクセスを防ぐことができる。

提案手法では、ユーザが複数の音源から、次に選択すべき音源を識別する必要がある。そのため、本研究では、PIS 認証システムの設計のために、ユーザが好む音源セットの探索と、識別しやすい音源の数と配置についての調査を行った。

本研究の貢献は以下の通りである。

- アンケート調査による PIS 認証システムの音源セットの選定
- 識別容易な音源の数と配置の調査

なお、歯の噛み合わせ音による音源選択機能の実装および認証システムの評価は今後の研究課題である。

2. 関連研究

2.1 ヒアラブルデバイス向けの個人認証手法

ヒアラブルデバイス向けの個人認証手法として、搭載されたセンサやマイク、カメラから得た生体情報を用いたものが多く研究されている。Gao ら^[7]は、個人の外耳道内の形状によって変化する反響音を内部マイクで収集し、その反響音から特徴量を抽出し個人認証を行うシステムを提案している。Wang ら^[5]は、外耳道の特徴に加え、発声による外耳道の変化を用いて個人認証を行うシステムを提案している。Amesaka ら^[6]は、外耳道の特徴に加え、耳介の形状によって変化する音漏れ信号から個人認証を行うシステムを提案している。Mizuho ら^[9]は、ヒアラブルデバイスに搭載した小型カメラで撮影した写真から耳介の形状を抽出し個人認証を行うシステムを提案している。Bi ら^[14]は、加速度センサを用いてデバイスへのタップを検出し、タップのリズムパターンと、指や耳の形状に基づくタップ操作の特徴量から個人認証を行うシステムを提案している。他にも、ヒアラブルデバイスの内部マイクで、呼吸音^[8]、声^[10]、心音^[11]、頬と指の摩擦音^[12]、歯のかみ合わせの音^[13]を録音し、それらから頭蓋骨や外耳道の形状による骨伝導の変化を抽出することで、個人認証を行うシステムも提案されている。

これらの認証システムは、外耳道、耳介、頭蓋骨といった生体情報を利用しているため、損傷や骨折、加齢による形状変化の影響を受ける。また、外耳道では耳垢が、耳介では周囲の髪が障害となり、認証が困難になる可能性がある。そのうえ、このような生体情報に基づく認証システム

に対して、プライバシーの懸念からデバイスへの保存を拒むユーザも存在する。提案手法は、生体情報を利用しない認証システムであるため、生体情報の変化による影響やプライバシーの問題がない。

2.2 空間音響技術と音源定位

音は頭部、耳介、胴体などで反射および回折し、その特性の変化によって、人間は音源の方向を知覚することが知られている^[15]。これらの頭部周辺における音響特性の変化を表す頭部伝達関数 (Head-Related Transfer Function, HRTF) は、頭部周辺の形状に依存し、個人差が生じる。そのため、ステレオ再生によって空間音響を再現する場合、個別の HRTF を適用することは現実的ではなく、KEMAR^[16]などのダミーヘッドを用いて生成された標準的な HRTF が使用される。しかし、標準的な HRTF では、個人の HRTF と比較して音源定位の精度が低下する傾向があることが知られている^[15]。この課題に対処するため、標準的な HRTF を用いた空間音響再現システムにおける音源定位を補助する手法の研究が進められている。Heller ら^[17]は、音源間の距離および高さ、頭部の回転条件を変化させることで音源認識率を調査し、広い音源間隔や頭部のヨー回転による探索が認識率の向上に寄与することを示した。また、Gao ら^[18]は、音源の周波数や再生周期を変え、ユーザの視線と音源の水平方向および垂直方向の差を示すことで、音源の認識率が向上するか調査している。その結果、音源の特性変化により、両方向の認識率が向上することを報告している。

これらの研究は、本研究と同様に標準的な HRTF を用いた空間音響技術における音源定位の精度を向上させることを目指しているが、ユーザに提示される空間オーディオは1つである。一方で、提案手法は、複数の空間オーディオが選択肢として提示され、ユーザは次に選択すべき音源を識別する。そのため、本研究では、複数の空間オーディオの提示手法として識別しやすい音源の特徴や個数を調査した。

3. 提案手法

3.1 認証システムの概要

本認証手法では、ユーザが PIS をあらかじめ設定し、空間音響技術によって提示される複数の音源から、ヘッドトラッキングと噛み合わせ音によるヘッドジェスチャによって、暗証した PIS 通りに音源を選択することで、認証を行う。認証の流れを図2に示す。まず、ユーザは、認証システムで提示される音源を組み合わせで PIS を作成し、あらかじめヒアラブルデバイスに登録する。この PIS は、認証システムで提示される音源による重複を許した順列で、その総数は (音源の数)^(PIS の桁数) となるため、認証システムに利用する音源の数と登録する PIS の桁数によってセ

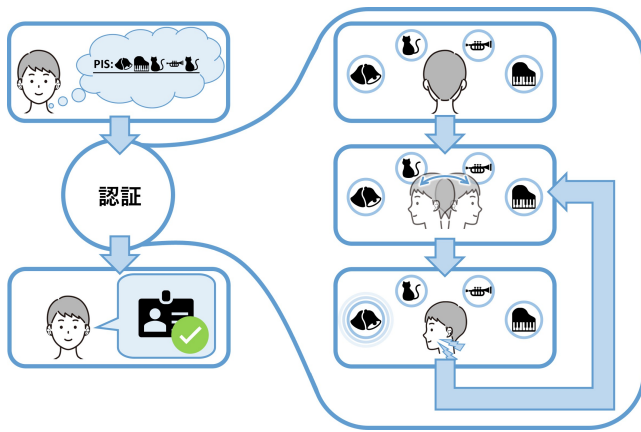


図2 PIS 認証システムの流れ

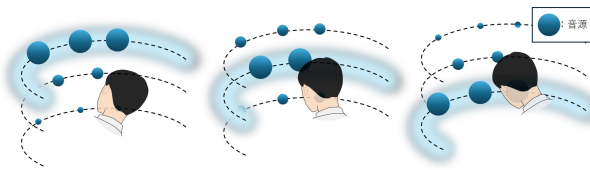


図3 垂直方向のソニフィケーション

セキュリティの強度が変化する。認証時には、まず、システムが、空間音響技術によって複数の音源を空間的に提示する。ユーザは顔を動かして、提示された複数の音源から、次に選択すべき音源を探索する。そして、その音源を正面に捉え、歯を噛み合わせることで選択を行う。この音源の探索と選択をPISの桁数分繰り返すことでPISを入力する。また、認証の度に、提示する音源の配置をランダムに変化させることで、ユーザのヘッドジェスチャの様子も変化するため、盗み見による不正アクセスを防ぐことができる。最後に、入力されたPISが正しければ認証が完了する。

3.2 音量変化のソニフィケーション

本認証システムでは、空間的に提示された複数の音源から、次に選択すべき音源を特定する必要がある。しかし、音源の数が多いと、空間音響技術による音の定位感だけでは、音源の識別が困難になる。そのため、各音源の位置と顔の角度の垂直方向または水平方向の差を、音量変化のソニフィケーションで表した。尚、音源の配置によって効果的なソニフィケーションの向きが異なること、1次元の音量変化のソニフィケーションでは両方向の差を表せないことから、それぞれの音源配置でどちらか一方のソニフィケーションを適用する。

3.2.1 垂直方向のソニフィケーション - 上下の音源配置

一般的にヒアラブルデバイスは、2.0chでの左右の音声出力であるため、上下の音像を表現するのは難しい。そのため、提示する音源を上下に配置する場合、垂直方向のソニフィケーションが効果的となる。本認証システムでは、図3に示すように、ユーザが向いている高さにある音源の

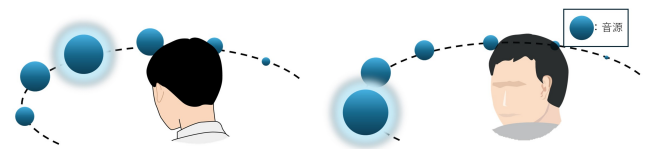


図4 水平方向のソニフィケーション

音量を大きくし、ユーザが向いている高さにある音源の音量を小さくするソニフィケーションを実装した。

3.2.2 水平方向のソニフィケーション - 横一列の音源配置

上下の音源の識別に比べ、左右の音源の識別は容易であるが、音源の数が多くなると、識別が難しくなる。そのため、音源を上下に配置せず、横一列に提示する場合、水平方向のソニフィケーションが効果的となる。本認証システムでは、図4に示すように、ユーザの正面にある音源の音量を大きくし、ユーザの背面にある音源の音量を小さくするソニフィケーションを実装した。

4. 実装

本研究では、ヒアラブルデバイスにAppleのAirPods Pro 2^[19]を利用し、認証システムの作成にUnityを利用した。本章では、認証システムの設計に必要な空間音響技術・ヘッドトラッキングの実装について示す。尚、歯の噛み合わせ音による音源選択機能は未実装であるため、この章では取り扱わない。

4.1 空間音響技術

空間音響技術には、Unity環境上で空間音響をデザイン可能なResonance Audio^[20]を用いた。これにより、Unityの3Dシーン上に複数の音源を配置することで、空間的な音源提示が可能になる。また、リスナーオブジェクトの向きによって、配置された音源の聞こえ方が変化するため、インタラクティブな空間音響を提示できる。

4.2 ヘッドトラッキング

ヘッドトラッキングには、Airpods Proのセンサから得られる頭部姿勢のデータをUnity環境上で利用できるHeadphone Motion^[21]を用いた。これを用いて、Unityの3Dシーン上のリスナーオブジェクトの向きを変化させる。

5. 実験

5.1 実験1：音源の調査

5.1.1 概要

PISに適した音源を調査するために、36人（男性：24人、女性：12人）の参加者を対象としたアンケートを実施した。参加者の年齢の平均は28.1歳で、標準偏差は8.47歳であった。また、参加者が日常的に利用する認証手法は、顔認証（17人）、PIN（11人）、指紋認証（8人）であった。

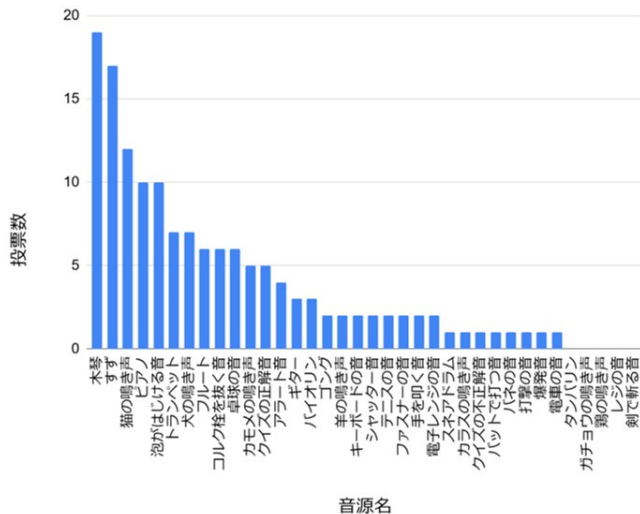


図 5 音源の調査結果

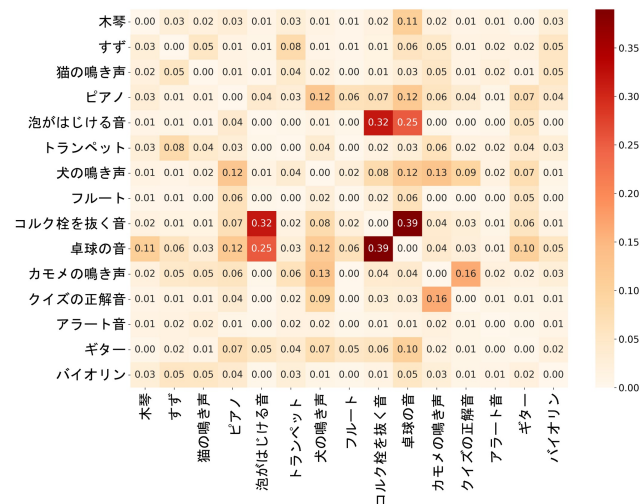


図 6 音源の周波数成分の類似度

5.1.2 手順

参加者に候補となる全 36 種類の音源を試聴してもらい、PIS 認証システムに適していると考える音源を 4 つ選択してもらった。使用した音源は、楽器や動物の鳴き声、生活音などである。実験は Google Form を用いて行った。

5.1.3 結果

アンケートの結果を図 5 に示す。ここで、周波数が似ている音源は、識別がしにくいことが知られているため [22], [23], 参加者の評価が高かった上位 15 種類の音源の周波数成分を、フーリエ変換によってベクトルで表し、各ベクトルのコサイン類似度を調査した。周波数成分の類似度 (図 6) から、コルク栓を抜く音と卓球の音を除外し、以下の 10 種類の音源を選定した。

木琴, すず, 猫の鳴き声, ピアノ, 泡がはじける音, トランペット, 犬の鳴き声, フルーツ, カモメの鳴き声, クイズの正解音

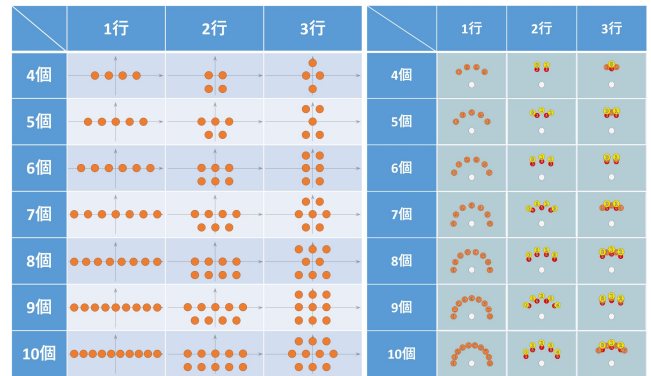


図 7 音源配置 (左: 正面から見た配置, 右: 上から見た配置)

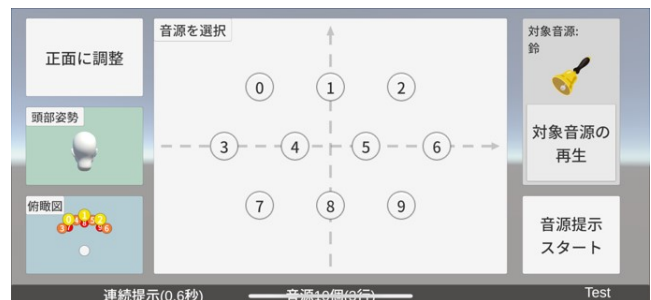


図 8 実験アプリケーション

5.2 実験 2: 識別容易な音源の数と配置の検証

5.2.1 概要

PIS の総数は (音源の数)^(PIS の桁数) によって決まり、総数が多いほどセキュリティ強度が高くなる。認証時間の観点から、PIS の桁数を少なくするために音源の数は多いほうが良いが、音源特定のしやすさの観点から、音源の数は少ない方がよい。

そのため、本実験では、認証時間と音源特定のしやすさに適した音源の数と配置を調査した。

9 人 (男性: 8 人, 女性 1 人) の参加者を対象とし、ユーザ実験を行った。参加者の年齢の平均は 27 歳で、標準偏差は 13.9 歳であった。参加者が日常的に利用しているデバイスは、カナル型 (8 人), インナーイヤー型 (1 人) であった。空間音響技術は、7 人が経験したことがあり、2 人が経験したことがなかった。

5.2.2 手順

参加者には、図 7 に示すような 21 種類の各音源配置パターンにおいて、指定する 1 つの音源の位置を特定するタスクを、それぞれ 10 回ずつ行ってもらった。各音源の横の配置間隔の最大値は、音の弁別に関する先行研究 [24], [25] から 30° とし、音源は横 180° に収まるように等間隔に配置した。例えば、7, 8, 9, 10 個の音源を 1 行に配置する場合、それぞれ 30°, 25.7°, 22.5°, 20° の間隔に音源が並ぶ。音源を上下に並べる場合、音源の縦の配置間隔は 45° とした。2 行の配置では、正面と下に配置し、3 行の配置では、上と正面と下に配置した。

表 1 正答率

	1 行	2 行	3 行
4 個	0.944	0.989	1.000
5 個	0.978	0.989	1.000
6 個	0.933	1.000	0.989
7 個	0.844	0.967	1.000
8 個	0.822	0.911	0.978
9 個	0.856	0.889	0.989
10 個	0.733	0.900	0.956

表 2 回答時間の平均 (秒)

	1 行	2 行	3 行
4 個	9.84	7.91	10.26
5 個	10.89	9.56	11.46
6 個	16.06	11.38	14.45
7 個	16.97	15.30	13.69
8 個	22.23	18.27	17.21
9 個	22.54	20.49	16.77
10 個	27.51	24.50	22.02

音源は実験 1 で選定した 10 個の音源を使用した。4～9 個の音源配置パターンでは、アンケートで上位だった音源を優先的に使用した。また、タスクごとに各音源の場所はランダムに変化させた。各音源の提示の間隔は 0.6 秒とし、提示の順序はランダムに変化させた。

iPhone 12 Pro と AirPods Pro 2 を利用し、iPhone 12 Pro に実装した実験アプリケーション (図 8) で実験を行った。

5.2.3 結果

各音源配置パターンでの正答率の結果を、表 1 に示す。1 行の配置では、音源数が多い 6～10 個の音源配置パターンで音源の識別が困難になることが示された。2 行の配置では、音源数が 7 個まで増えても音源の識別がしやすいことが示された。3 行の配置では、4～10 個のすべての音源配置パターンで音源の識別が容易であることが示された。

次に、各音源配置パターンでの回答時間の平均の結果を、表 2 に示す。1 行の配置は、2,3 行の配置に比べ回答時間の平均が全体的に長いことが示された。また、音源数が 4～6 個の場合、2 行の配置のほうが回答時間の平均が短い、音源数が 7～10 個の場合、3 行の配置のほうが回答時間の平均が短いことが示された。

したがって、本認証システムに適した音源配置パターンは、音源数が 4～6 個での 2 行の配置及び、音源数が 7～10 個での 3 行の配置といえる。

6. 議論と今後の展望

実験 1,2 から、PIS 認証システムのための、ユーザ好みの音源の選定と、識別可能な音源の数と配置の検証を行った。しかし、本論文では、以下の検証・評価を行えていないため、最適な PIS 認証システムの調査や、認証システム全体の評価が不十分である。

- 識別可能な最小の音源提示間隔の検証
- ヘッドトラッキングに依存した音源の選択精度の検証
- 暗証した PIS の通りに音源を複数回選択し、一連の認証を行った場合での、ユーザビリティ評価

したがって、今後はこれらの検証・評価を行うために、実験アプリケーションや、未実装である歯の噛み合わせ音の検知による音源選択システムを実装する。

7. おわりに

本研究では、ヒアラブルデバイス向けの知識ベースの認証システムとして、空間音響技術とヘッドトラッキング・音声検知を利用したヘッドジェスチャによる PIS 認証システムを提案した。ユーザ好みの音源セットの探索実験では、Google Form によって参加者からの評価が高かった音源のうち、周波数成分の類似度が高い音源を除外し、10 種類の音源を選定した。識別可能な音源の数と配置の検証実験では、4～10 個の音源を 1～3 行に並べた 21 種類の音源配置パターンに対して、音源の特定実験を行った。結果として、音源数が 4～6 個の場合は 2 行の配置、7～10 個の場合は 3 行の配置で音源を提示すると、識別しやすいたことが示された。今後は、新たな実験アプリケーションと歯の噛み合わせ音による音源選択システムを実装し、識別可能な最小の音源提示間隔の検証やヘッドトラッキングに依存した音源の選択精度の検証、PIS 認証システム全体の評価に取り組む。

謝辞 本研究の一部は、JST さきがけ (課題番号: JP-MJPR2134) および JSPS 科研費 (課題番号: JP23KJ1884) の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Hammour, G., Yarici, M., Rosenberg, W. v. and Mandic, D. P.: Hearables: Feasibility and Validation of In-Ear Electrocardiogram, *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 5777–5780 (online), DOI: 10.1109/EMBC.2019.8857547 (2019).
- [2] Balaji, A. N., Ferlini, A., Kawsar, F. and Montanari, A.: Stereo-BP: Non-Invasive Blood Pressure Sensing with Earables, *Proceedings of the 24th International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, HotMobile '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 96–102 (online), DOI: 10.1145/3572864.3580341 (2023).
- [3] Matsumoto, K., Temiz, Y., Taghavi, H., Cornelius, E. L.,

- Mori, H. and Michel, B.: An earbud-type wearable (A hearable) with vital parameter sensors for early detection and prevention of heat-stroke, *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 7049–7055 (online), DOI: 10.1109/EMBC.2019.8856821 (2019).
- [4] Olson, K. D., Parker O’ Brien, Lin, A. S., Fabry, D. A., Hanke, S., Schroeder, M. J.: A Continuously Worn Dual Temperature Sensor System for Accurate Monitoring of Core Body Temperature from the Ear Canal, *Sensors*, Vol. 23, No. 17 (online), DOI: 10.3390/s23177323 (2023).
- [5] Wang, Z., Tan, S., Zhang, L., Ren, Y., Wang, Z. and Yang, J.: An ear canal deformation based continuous user authentication using earables, *Proceedings of the 27th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom ’21*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 819–821 (online), DOI: 10.1145/3447993.3482858 (2021).
- [6] Amesaka, T., Watanabe, H., Sugimoto, M., Sugiura, Y. and Shizuki, B.: User Authentication Method for Hearables Using Sound Leakage Signals, *Proceedings of the 2023 ACM International Symposium on Wearable Computers, ISWC ’23*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 119–123 (online), DOI: 10.1145/3594738.3611376 (2023).
- [7] Gao, Y., Wang, W., Phoha, V. V., Sun, W. and Jin, Z.: EarEcho: Using Ear Canal Echo for Wearable Authentication, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 3, No. 3 (online), DOI: 10.1145/3351239 (2019).
- [8] Han, F., Yang, P., Feng, Y., Du, H. and Li, X.-Y.: Exploring Earable-based Passive User Authentication via Interpretable In-ear Breathing Biometrics, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, pp. 1–17 (online), DOI: 10.1109/TMC.2024.3453412 (2024).
- [9] Mizuho, Y., Kawasaki, Y., Amesaka, T. and Sugiura, Y.: EarAuthCam: Personal Identification and Authentication Method Using Ear Images Acquired with a Camera-Equipped Hearable Device, *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2024, AHs ’24*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 119–130 (online), DOI: 10.1145/3652920.3653059 (2024).
- [10] Gao, Y., Jin, Y., Chauhan, J., Choi, S., Li, J. and Jin, Z.: Voice In Ear: Spoofing-Resistant and Passphrase-Independent Body Sound Authentication, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 5, No. 1 (online), DOI: 10.1145/3448113 (2021).
- [11] Cao, Y., Cai, C., Li, F., Chen, Z. and Luo, J.: Enabling Passive User Authentication via Heart Sounds on In-Ear Microphones, *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, pp. 1–15 (online), DOI: 10.1109/TDSC.2024.3429574 (2024).
- [12] Wang, Z., Wang, Y. and Yang, J.: EarSlide: a Secure Ear Wearables Biometric Authentication Based on Acoustic Fingerprint, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 8, No. 1 (online), DOI: 10.1145/3643515 (2024).
- [13] Wang, Z., Ren, Y., Chen, Y. and Yang, J.: Excerpt of ToothSonic: Earable Authentication via Acoustic Toothprint, *Adjunct Proceedings of the 2022 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and the 2022 ACM International Symposium on Wearable Computers, UbiComp/ISWC ’22 Adjunct*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 261–262 (online), DOI: 10.1145/3544793.3563420 (2023).
- [14] Bi, H., Sun, Y., Liu, J. and Cao, L.: SmartEar: Rhythm-Based Tap Authentication Using Earphone in Information-Centric Wireless Sensor Network, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 9, No. 2, pp. 885–896 (online), DOI: 10.1109/JIOT.2021.3063479 (2022).
- [15] 飯田一博: 頭部伝達関数の基礎と3次元音響システムへの応用, コロナ社 (2017).
- [16] Gardner, B., Martin, K. et al.: HRFT Measurements of a KEMAR Dummy-head Microphone (1994).
- [17] Heller, F., Jevanesan, J., Dietrich, P. and Borchers, J.: Where are we? evaluating the current rendering fidelity of mobile audio augmented reality systems, *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI ’16*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 278–282 (online), DOI: 10.1145/2935334.2935365 (2016).
- [18] Gao, Z., Wang, H., Feng, G. and Lv, H.: Exploring Sonification Mapping Strategies for Spatial Auditory Guidance in Immersive Virtual Environments, *ACM Trans. Appl. Percept.*, Vol. 19, No. 3 (online), DOI: 10.1145/3528171 (2022).
- [19] Apple: AirPods Pro 2, <https://www.apple.com/jp/airpods-pro/>. (2024 年 12 月 23 日閲覧).
- [20] Team, R. A.: Resonance Audio documentation, <https://resonance-audio.github.io/resonance-audio/>. (2024 年 12 月 23 日閲覧).
- [21] Devana, A.: Headphone Motion, <https://github.com/anastasiadevana/HeadphoneMotion>. (2024 年 12 月 23 日閲覧).
- [22] Bregman, A. S.: *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound*, MIT press (1994).
- [23] Moore, B. C.: *An introduction to the psychology of hearing*, Brill (2012).
- [24] Mills, A. W.: On the minimum audible angle, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 30, No. 4, pp. 237–246 (1958).
- [25] Alzahr, M., Serrano, P., Tardieu, J., Barone, P., Marx, M. and Nieto, P.: Contribution of a method of assessing minimum audible angle in headphones, *European Annals of Otorhinolaryngology, Head and Neck Diseases*, Vol. 138, No. 5, pp. 333–336 (2021).