

ろう・難聴者に適した警告音通知ウェアラブルデバイスの開発：振動強度と方向伝達の基礎検討

村山 悠太^{1,a)} 米山 文雄^{1,b)} 田中 俊也^{2,c)} 鮫島 健一郎^{2,d)} 中居 志紀也^{2,e)} 伊藤 直樹^{2,f)}
白石 優旗^{1,g)}

概要：ろう・難聴者（高齢者を含む）が安全・安心に外出できるためには、様々な環境音の中でも特に警告音を確実に認識できることが求められる。特に、ろう・難聴者の多くは人工内耳や補聴器を装着することで警告音に気づくことができたとしても、発生方向まで識別することは困難である。したがって、本研究では、警告音の発生方向を触覚情報で伝達することに着目し、左鎖骨、左肩、右肩、右鎖骨の4箇所のうち音源方向と同箇所が振動する首掛け式のウェアラブルデバイスを開発する。音源方向の伝達の有効性の基礎検討として、「振動に確実に気づく」「振動箇所が分かる」「振動に早く気づく」3つの条件を満たす振動の強さを探索する実験を行った。ウェアラブルデバイスに取り付けた振動子（モータ）への入力電圧を1V, 3V, 5V, 7Vとする4種類の振動を用いて、実験協力者の振動検知率と反応時間を調査したところ、振動検知率については1Vとそれ以外の間すべての組み合わせについて有意差が確認できた ($p < .05$, Holm test)。反応時間についてはすべての組み合わせについて有意差が確認できた ($p < .05$, Holm test)。ここで、振動検知率については、5Vと7Vで100%を確認しており、反応時間については、5Vと7Vの差は平均63msと少なかった。一方で、振動箇所を正しく認識できたかどうかの正答率については、1Vとそれ以外のすべての組み合わせで有意差が確認できた。以上より、5Vと7Vで同程度に、最も早くかつ正確に振動の発生と方向を知覚できていることが判明した。また、実験協力者に対するアンケートにより、音源方向を伝達するシステムの必要性についても確認した。

Development of a Wearable Device with Warning Sound Notification Suitable for DHH People: Basic Study of Vibration Strength and Directional Transmission

MURAYAMA YUTA^{1,a)} YONEYAMA FUMIO^{1,b)} SHUNYA TANAKA^{2,c)} KENICHIRO SAMESHIMA^{2,d)}
YUKIYA NAKAI^{2,e)} NAOKI ITO^{2,f)} SHIRAISHI YUHKI^{1,g)}

¹ 筑波技術大学
Tsukuba University of Technology, 4-3-15 Amakubo,
Tsukuba, Ibaraki 305-8520, Japan
² アルプスアルパイン
ALPS ALPINE CO., LTD., 3-31 Meitu, Izumi-ku, Sendai-
shi, Miyagi, 981-3206, Japan
a) a171018@a.tsukuba-tech.ac.jp
b) yonefumi@a.tsukuba-tech.ac.jp
c) shunya.tanaka@alpsalpine.com
d) kenichiro.sameshima@alpsalpine.com
e) yukiya.nakai@alpsalpine.com
f) naoki.ito@alpsalpine.com
g) yuhkis@a.tsukuba-tech.ac.jp

1. はじめに

日本には、ろう・難聴者が約30万人存在し、高齢者などの耳がよく聞こえない人を含めると、約1400万人存在する[1,2]。それらの耳が不自由な人が、安全・安心に外出できるためには、様々な環境音の中で特に安全・安心な生活に直結する警告音（クラクション、救急車のサイレンなど）を確実に認識できることが求められる。そのため、環境音の中からそれら特定の警告音を識別し、ユーザに伝達するシステムが必要とされている。

一方で、近年、深層ニューラルネットワーク (Deep Neural Network, DNN) が注目されており、認識したい警告音をコンピュータに学習させることで自動的に特徴を取得し、ノイズな環境でもロバストな認識性能を持つと報告されている [3,4]。それにより対象物の移動や音響環境の変化の影響を受けない高精度の識別が期待される。

この様な背景のもと、我々はこれまでに深層学習を用いた警告音認識システムを提案し、その基本的な識別性能について確認し、救急車のサイレンと自転車のベルを識別してユーザに伝達するスマートフォンアプリケーションを開発してきた [4-7]。

しかし、これらのシステムでは警告音の発生を伝達することはできても音源方向を伝えることはできなかった。特に、ろう・難聴者の多くは、人工内耳や補聴器を装着することで警告音に気づくことができたとしても、発生方向まで識別することは困難という課題がある。これにより、例えば自転車のベルなどが接近した際どの方向に避ければ良いのかわからず衝突する可能性がある。警告音がどこから接近しているのかをスマートフォンのディスプレイ画面に表示する方法もあるが、カバンの中などに入れていた場合は意味を為さない。

そこで、本研究では、常時警告音を伝達する手段として、ウェアラブルデバイスに振動させる機構を組み込み、警告音が発生した方向だけを振動させるシステムを開発する。ここで、振動による触覚情報呈示については、少なくともろう・難聴者に対しては音情報の代替となりえることが報告されている [8]。

本論文では、首掛け式のウェアラブルデバイスを採用し、左鎖骨、左肩、右肩、右鎖骨の4箇所に振動子を設置する。ここで、音源方向と同箇所の振動子が振動することで、警告音の発生方向を伝達可能とする。さらに、確実かついち早く振動に気づくことができ、振動方向を特定できる振動強度の調査を目的とした評価実験を行い、開発システムの有効性について検証する。

論文の構成は以下のとおりである。次節で関連研究について述べる。次に開発システム概要、実験環境、実験方法、実験結果、議論について述べ、最後にまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

これまでに発表されている警告音認識システムとして、中西らのシステム [9] や岩佐らのシステム [10]、白石らのシステム [4] などがある。[9] は、データをサーバに送信し認識するモバイルアプリケーションを開発している。識別手法には、GMM (金剛正規分布モデル) を音響モデルとする音声認識器 Julius を使い、MFCC (メル周波数ケプストラム係数)、 Δ Power を特徴量としているが、平均識別率は 45 % 程度であり、識別制度が不十分である。[10] はパ

ルスニューロンモデルによる識別を行なっている。平均識別率は 95 % 程度であるが、自動車に取り付けることを前提としており、歩行時には使用が困難である。また、警告音を発する対象物の移動や周辺環境の変化による警告音の変化への対応が困難といった課題が残されている。また、両者とも音源方向の特定まで可能なデバイスの開発はされていない。

深層学習を用いた警告音認識システム [4] については、スマートフォンで音を取り入れ、短時間フーリエ変換 (STFT) の後パワースペクトルに変換し、log スケール変換したものを DNN (Deep Neural Network) の入力として使い、学習済みの DNN をスマートフォンで識別している。しかし、伝達の媒体がスマートフォンでありポケットやカバンの中に入れてしまうと音を拾いにくく、かつ音源方向の推定までは困難である。

一方で、聴覚障害者のための環境音認識に関する研究には、浅井らのシステム [11] がある。[11] は、識別器に SVM (Support Vector Machine) を使い、PLP (Perceptual Linear Predictive) を特徴量としている。平均識別率は 96 % 程度であるが、対象音がドアベル、電子レンジの終了音、電話の着信音といった、生活音とされており、警告音認識のような、安全性の観点から非常に高い精度を要求されるタスクの評価はなされていない。

また、振動を用いた情報提示の有効性を評価した研究としては、村山らの実験 [8] や織田らの実験 [12] などがある。[8] は、ろう・難聴者 16 名に対して車線逸脱発生時およびカーナビゲーションの画面が変化したときに車の運転席のシート座面を振動させ、振動に対する反応時間を計測した。しかし車のシートを振動させたのであり装着可能なデバイスの開発はなされていない。[12] は振動子を一つ、手に握らせ音の代わりに振動を伝えることで種類が分かるかどうかの評価実験を行った。しかし、ろう・難聴者を対象とした実験ではない。

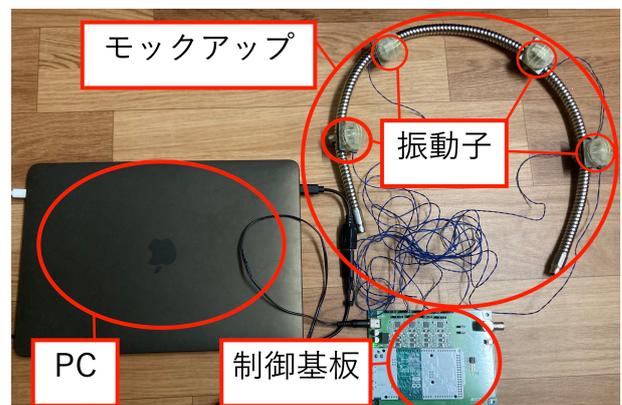


図 1 開発システム

3. 開発システム概要

本研究では、音源方向の特定と伝達がともに可能な方式として、首掛け式のシステムを採用した。実際に、首掛け式の試作品本体（以下、モックアップ）、4つの振動子、振動子制御基板、PCを用いたシステムを構築したものを図1に示す。なお、PC内で振動させるための波形を生成し（以下、振動波形生成システム）、制御基板を介して振動子を振動させる流れとなっている。

モックアップについては、ネックスピーカーのように首にフィット感を持たせるため、首や肩幅の個人差を考慮して調整可能な金属製のフレキシブルアームを採用した。モックアップ装着時の様子を図2に示す。

本システムは前、右、左、後ろ四方向のうち振動方向のみを振動させて装着者に伝えることを目的としている。そのため、振動子をそれぞれ右鎖骨、右肩、左肩、左鎖骨の4箇所に接するように4つ設置した。

振動子には「ハプティック®リアクタ Hybrid Tough Type」を採用した（図3）。本振動子は、独自のバネ共振構造を採用することにより、小型化を実現している。また、動応答速度は1[ms]以下を達成している。

振動波形を生成する際に、振動振幅を変化させることで振動子の振動強度を調整できる。振動子をモックアップの人体接触部（今回は肩、鎖骨に接触する部分）に接触させ、振動振幅（以下、振動強度）別に振動子の縦横それぞれの方向の加速度を30回ずつ計測した平均値を表1、表2に示す。なお、振動を生成する入力波形については、すべて正弦波であり、周波数100[Hz]、振動時間100[ms]、振動繰り返し回数20回で統一した。ここで、加速度ピックアップ



図2 モックアップ装着時

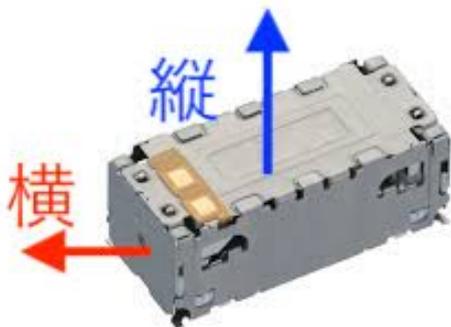


図3 ハプティック リアクタ

表1 振幅別加速度-縦

振動強度 [V]	鎖骨上加速度 [G]	肩上の加速度 [G]
1.0	0.12	0.15
3.0	0.37	0.44
5.0	0.76	0.91
7.0	1.98	2.21

表2 振幅別加速度-横

振動振幅 [V]	鎖骨上加速度 [G]	肩上の加速度 [G]
1.0	0.61	0.51
3.0	2.41	2.01
5.0	4.24	3.46
7.0	5.98	5.13

は人体接触部に貼り付けており、縦方向（320Hz 共振方向）と横方向（160Hz 共振方向）の振動をそれぞれ計測している。

4. 実験方法

「振動に確実に気づく」「振動箇所が分かる」「振動に早く気づく」3つの条件を満たす振動強度を探索するために、本学内の聴覚障害者24名を対象にモックアップを用いた評価実験を実施した。その際、振動の種類は四種類（以下強度順に、1V、3V、5V、7V）とした。

今回の実験環境を図4に示す。机を一つ用意し、実験協力者と実験実施者が対面で座って実験を実施した。

最初に、実験協力者に4箇所の振動子がそれぞれ左鎖骨、左肩、右肩、右鎖骨に接するようモックアップを装着してもらった。実験協力者が装着し終えたら実験実施者が、振動子が接した位置を人体シートにプロットすることで記録した。

次に、ランダムなタイミングで4つの振動子のいずれか一つが振動するので気づいたらすぐに左手人差し指でスペースキーを押下（反応時間の計測）し、その後右手でどこが振動したか指差す（振動箇所の検知）様に指示した。その際、反応時間の計測の誤差を少なくするため、左手人差し指は常にスペースキーに添えてもらった。また、振動音により気づくのを防ぐために補聴器および人工内耳を装着

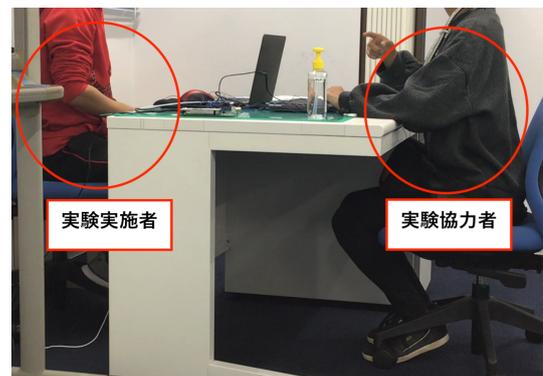


図4 実験環境

している実験協力者に対しては外すよう指示した。なお、振動の発生タイミングについては、振動発生から次の振動が発生するまで8~15秒の範囲でランダムに決定した。

実際の実験の前に、この流れで10回振動させ、練習を行った。

その後本実験を行い、1種類の振動に対して20回、左鎖骨、左肩、右肩、右鎖骨いずれかをランダムで1箇所振動させた。振動してから次の振動が発生するまでの間隔は、練習と同様に8~15秒の中から乱数によってランダムに決定した。なお、反応時間の計測と振動箇所の検知は、練習と同様の方法で行った。ここで、振動から注意を逸らし、手話により手指が動いている状態を再現するため、本実験中は常に実験実施者が実験協力者に話しかけ、実験協力者には右手で応答してもらった。ただし、振動に気づいたら直ちに会話を中止し、左手でスペースキーを押下した後、右手でどこが振動したか指を指すよう伝えた。

以上について、20回振動させた後3分程度の休憩を挟み、別の強度の振動で再び上記の手順で実験を行った。その際、振動の種類はラテン方格法により決定し、 $4! = 24$ 通りすべての組み合わせを一つずつ各被験者に対して行った。なお、各部位の振動回数については実験終了時点で左鎖骨、左肩、右肩、右鎖骨がどれも20回ずつになるようにした。

実験終了後、「本実験で用いた首掛け式のデバイスで、警告音などの音源方向を知りたいと思うか」を5段階リッカート尺度でアンケート調査した。

実験手順をまとめると以下の通りである。

- (1) 実験協力者に対して、本実験の目的の説明
- (2) 実験協力者がモックアップを装用
- (3) 本実験の前に練習を実施
- (3) 本実験を実施
- (4) 実験終了後アンケートを実施

5. 実験結果

実験により、振動の種類1つにつき480個(1人あたり20回振動×24人)、振動の種類が4つのため計1,920個のデータが得られた。

なお、各位置の振動回数についても実験終了時に、左鎖骨、左肩、右肩、右鎖骨がどれも20回ずつになるようにしたため、位置1箇所につき480個のデータが得られた。

また、振動子が接した位置を24人分重ねてプロットしたものを図5に示す。

5.1 検知率

検知率を算出する前に、「振動に気づいて振動箇所を指差しているがスペースキーが押下されていないもの」を異常データとして除去した(データスクリーニング)。なお、異常データの数は、振動強度7V,5V,3Vのそれぞれで(480

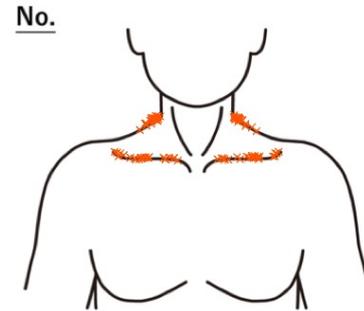


図5 位置プロット図

個のデータのうち)5個であった。

その後、以下の式で検知率を求めた。

$$\text{検知率} = \frac{\text{反応時間取得数}}{\text{データスクリーニング後の総データ数}}$$

振動強度と振動位置による検知率の変化を表3に示す。表3から、振動強度7Vと5Vの平均検知率はともに1.0であることが確認できる。また、検知率に対して、振動強度別にHolm test ($p < .05$)を行ったところ、1Vとそれ以外の振動強度のすべての組み合わせで有意差があった。

5.2 正答率

検知率と同様の方法でデータスクリーニングを行った後、以下の式で正答率を求めた。

$$\text{正答率} = \frac{\text{データスクリーニング後の未回答と誤答を除去}}{\text{データスクリーニング後の総データ数}}$$

振動強度と振動位置による正答率の変化を表4に示す。表4より、平均正答率は7V,3V,5V,1Vの順に高いことが確認できる。また、正答率に対して、振動強度別にHolm test ($p < .05$)を行ったところ、1Vとそれ以外の振動強度のすべての組み合わせで有意差があった。

表3 検知率

振動強度 [V]	左鎖骨	左肩	右肩	右鎖骨	平均
1.0	0.762	0.771	0.762	0.713	0.752
3.0	1.00	1.00	0.991	0.991	0.996
5.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
7.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
平均	0.941	0.943	0.938	0.937	

表4 正答率

振動強度 [V]	左鎖骨	左肩	右肩	右鎖骨	平均
1.0	0.770	0.619	0.483	0.494	0.458
3.0	0.771	0.839	0.853	0.479	0.735
5.0	0.770	0.936	0.905	0.452	0.731
7.0	0.721	0.910	0.878	0.484	0.750
平均	0.702	0.765	0.756	0.452	

表 5 反応時間

振動強度 [V]	平均反応時間 [ms]	標準偏差	データ数
1.0	927	0.381	361
3.0	693	0.315	472
5.0	642	0.281	475
7.0	579	0.241	475

表 6 アンケート調査結果

音源方向を知りたいと思うか	人数
1:まったくそう思わない	0
2:あまりそう思わない	1
3:どちらでもない	4
4:そう思う	7
5:とてもそう思う	12

5.3 反応時間

振動強度による反応時間の変化を表 5 に示す。ここで、データ数が振動強度によって異なるのは、それぞれ強度別に「反応時間を取得できた」データのみを抽出したためである。

表 5 より、平均反応時間は 7V, 5V, 3V, 1V の順で早いことが確認できる。また、標準偏差についても、7V, 5V, 3V, 1V の順に小さいことが確認できる。また、Holm test ($p < .05$) により有意差検定を行ったところ、すべての組み合わせについて有意差が確認できた。

5.4 アンケート結果

「本実験で用いた首掛け式のデバイスで、警告音などの音源方向を知りたいと思うか」について 5 段階リッカート尺度でアンケート調査した結果を表 6 に示す。表 6 より、実験協力者 24 名のうち「4: そう思う」、「5: とてもそう思う」と回答した人数の合計が 19 名であることが分かる。

6. 議論

実験結果より、振動強度 5V と 7V については、振動箇所に関係なく検知率 100% であった。よって今回の実験では、5V と 7V のみが「振動に確実に気づく」という条件は満たしていると判断できる。特に、実験協力者は、実験中手話を使い話しているため右手は常時動いている。それにも関わらず検知率が 100% だったことから、5V と 7V は歩行中、手話で会話中という状況下でも振動で情報を伝達する際に有効であることが分かる。

反応時間についてはすべての組み合わせについて有意差が確認できたものの、検知率が 100% であった 5V と 7V の反応時間の差は平均 63ms と少なかった。ここで、自転車の平均時速 15km とすると、63ms あたり約 26cm 進むため、5V と 7V の差は小さいと判断した。また、5V 時の平均反応時間 642ms についても同様に自転車の移動距離を考えると約 2.68m 進むことになる。ここで、時速 15km で走っている自転車の空走距離は 2m、制動距離は 1m であ

り、制動距離内に入り自転車が停止する前に接近に気づくことができると考えられる。

また、振動箇所を正しく認識できたかどうかの正答率についても、5V と 7V で優位差を確認できておらず、その差は 0.019 である。以上より、5V と 7V で同程度に、最も早くかつ正確に振動の発生と方向を知覚できていると判断した。

一方、5V と 7V の検知率が 100% だったのに対し、正答率はそれぞれ 73.1%, 75.0% であった。振動箇所別の正答率に着目すると、手話で会話したことにより動作が発生した右鎖骨部分が 45.2% と特に低い数値を示した。これは肩の方がモックアップの荷重が大きく、鎖骨部分が振動しても肩に強く伝わってしまい鎖骨と肩を混同したからだと考えられる。そのため、音源方向を振動で伝えるにあたり、鎖骨は伝達に不適である可能性がある。

また、振動素子の接触箇所のプロットの結果より、肩は内側、鎖骨は全体的にばらついており、内肩に寄せた方がフィットしやすいと考えられる。

最後に、アンケート結果から、実験協力者の半数以上が今回開発した首掛け式のウェアラブルデバイスを用いて警告音の音源方向を知りたいと回答しており、本開発システムの意義について確認できた。

7. まとめと今後の課題

本研究は、ろう・難聴者（高齢者を含む）が安全・安心に外出できるため、警告音の発生方向を触覚情報で伝達することに着目し、左鎖骨、左肩、右肩、右鎖骨の 4 箇所のうち音源方向と同箇所が振動する首掛け式のウェアラブルデバイスを開発するものであった。

音源方向の伝達の有効性の基礎検討として、「振動に確実に気づく」「振動箇所が分かる」「振動に早く気づく」3つの条件を満たす振動の強さを探索する実験を行った。結果、5V と 7V で同程度に、最も早くかつ正確に振動の発生と方向を知覚できていることが判明した。また、振動方向を伝達するにあたって、鎖骨は不適である可能性があることが分かった。アンケート調査により、音源方向を特定し伝達するシステムの有用性についても確認することができた。

今後の課題として、「振動に確実に気づく」「振動箇所がより正確に分かる」「振動により早く気づく」条件をさらに探索するため、振動強度だけでなく入力波形を変えることによる振動パターンの変更、モックアップのより装着しやすい形状への改良、首掛け式のウェアラブルデバイス以外の形状の音源方向を伝達するシステムの有用性の探索が挙げられる。

また、警告音認識システムと統合し、認識ボードをモックアップに埋め込むことにより、単体で動作可能なシステムを開発することを計画している。

参考文献

- [1] 平成 25 年版障害者白書（全体版）付録障害児・者数の状況, 2013
- [2] 一般社団法人日本歩調工業会, Japan Trak 2015 調査報告, 2015
- [3] N.D.Kane, P.Georgiey, L.Qendro, “DeepEar: Robust Smartphone Audio Sensing in Unconstrained Acoustic Environments using Deep Learning.” In Proc. Of the UBICOMP’ 15, Osaka, Japan, pp. 283-294, 2015
- [4] Yuhki Shiraishi, Takuma Takeda, Akihisa Shitara, Alarm Sound Classification System in Smartphones for the Deaf and Hard-of-Hearing Using Deep Neural Networks, Proceedings of The Thirteenth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions (ACHI 2020), pp.148-151, Valencia, Spain, 2020
- [5] 矢野和希, 白石優旗, スマートフォンを用いた深層学習による警告音認識システムの改良, 情報処理学会報告, Vol.2018-AAC-6, No.2, pp.1-6, 2018
- [6] 畑伸佳, 白石優旗, スマートフォンを用いた深層学習による警告音認識システムの検討, 情報処理学会報告, Vol.2017-AAC-3, No.8, pp.1-4, 2017
- [7] 白石優旗, 深層学習を用いた警告音認識による危険信号通知システムの検討, DEIM Forum 2016 P6-5, 2016
- [8] 村山悠太, 米山文雄, 早川武博, 森田祥一郎, 白石優旗, 振動シートによる聴覚障がい者に適した自動車運転支援の基礎検討, 情報処理学会アクセシビリティ研究会 第12回研究会, 2020-3
- [9] 中西恭介, 津田貴彦, 西村竜一, 河原英紀, 入野俊夫, 松山みのり, 山田順之助, モバイル携帯端末を用いた環境音収集とその認識手法の検討, 情報処理学会研究報告 Vol.2013-MUS-99 No.18, 2013
- [10] 岩佐要, 藤門岳史, クグレマウリシオ, 黒柳奨, 岩田彰, 段野幹男, 宮治正廣, 車載安全運転支援装置のためのパルスニューロンモデルによる音源接近検出および音源種類識別システム, 信学誌, D, 情報・システム, Vol.91, No.4, pp.1130-1141, 2008
- [11] 浅井研哉, 小栗佑介, 志磨村早紀, 北義子, 綱川隆司, 西田昌史, 西村雅史, 聴覚障害者のための実環境下における環境音認識システムに関する検討, 情報処理学会研究報告, Vol.2017-AAC-5, No.11, p1-6, 2017
- [12] 織田修一, 水島昌英, 古家賢一, 羽田陽一, 片岡章俊, 聴覚障害者支援を目的とした報知音の振動呈示の有効性について-健聴者による検討-, 電子情報通信学会技術研究報告, 2004-10-28