

振動スピーカとソフトマテリアルによる 音響・触感インタフェース

中島 武三志^{1,a)}

概要：聴覚障がい者でも楽しめる音楽／サウンド・アートの手段として、触覚提示技術が用いられている。本研究では、ユーザからの入力に対し既存の生楽器や音楽インタフェースでは得られない特徴的な触感と音響を同時に提示する手段として、振動スピーカとソフトマテリアルに着目した音響・触感インタフェースを試作した。さらに、試作したインタフェースの音響特性を調査し、音響と触感を両立する使用方法についての検討を行った。その結果、試作インタフェースは触覚提示装置としては必要十分な特性を持っていることが分かった。一方、試作インタフェースは不均一な音響特性を持っており、現状では一般的なスピーカと互いに相補的な音響装置として使用することが望ましいことが判明した。

1. はじめに

聴覚障がい者でも楽しめる音楽／サウンド・アートの手段として、触覚提示技術が用いられている。2018年に日本フィルハーモニー交響楽団らによって開催された“耳で聴かない音楽会”^[1]では、振動と光によって音の特徴をからだで感じられる装置^{[2][3]}が用いられ、音楽を聴覚以外で体感できるイベントとして話題となった。他にも、作品に触れることによって音響が生成、受容されるサウンド・アートも多く発表されている。Edwina Portocarreroらによる“ListenTree”^[4]は、木の根に振動スピーカが取り付けられており、木の幹に頭を接触させることで微かな音を聴くことができるサウンド・インスタレーションである。中島は、音響のみならず作品に触れることによって生じる聴覚／触覚／視覚の相互作用や、素材の持つ象徴性などを特徴とするサウンド・アートを“ハプソニック・アート”と呼び、作品の特徴による分類を行っている^[5]。このように触覚を通じて音楽／サウンド・アート等に用いられる音響を受容できれば、より多くの人が多様なスタイルで作品を楽しむことが可能となる。

音楽を演奏するための道具である楽器においても、本来はそれ自身が発音体として振動し、演奏者自身が聴覚のみならず触覚を通して音響を受容できる。しかし、コンピュータを介した音楽演奏などに用いられる入力インタフェースにおいては、実際に音響が出力されるスピーカは別に分かれており、インタフェース自体の触感と生成され

る音響は無関係であるのが一般的である。音楽情報の入力インタフェース自体が出力インタフェースとして音響と関連する触感をユーザにフィードバックできれば、既存の生楽器のように触覚からも音響を受容できるだけでなく、ユーザからの入力に対し特徴的な触感と音響を提示する独自のインタフェースの創出が期待できる。さらには、聴覚障がいの有無に関わらず触感でも楽しめるアート／エンタテイメント表現や音楽インタフェース等の分野への貢献にもつながる。

本研究では、ユーザからの入力に対し既存の生楽器や音楽インタフェースでは得られない特徴的な触感と音響を同時に提示する手段として、振動スピーカとソフトマテリアルに着目する。振動スピーカは窓や壁面などの平面に取り付け、平面を直接振動させて音響を生成するスピーカである。用いる素材によって音響特性は異なるが、任意の物体を音源として音響を再生することができる。また、取り付けられた物体が直接振動するため、触れることで直接音響を受容することも可能である。振動スピーカは、主に音響の再現性の観点から硬い素材に取り付けられることが一般的であり、柔らかく変形可能な素材に取り付けられることは想定されていない。しかし、柔らかく変形可能な素材は、音楽情報の入力インタフェースとしては多くの実用例があり^{[6][7]}、触感自体がユーザへの感性的魅力となりうる。

したがって、本研究では振動スピーカをソフトマテリアルに取り付け、ユーザが指で押す行為を入力として受け取ることが可能な音響・触感インタフェースを試作する。そして、本稿では試作したインタフェースの音響特性を測定した結果を報告し、音響と触感を両立する使用方法につい

¹ 東京工芸大学

^{a)} m.nakajima@int.t-kougei.ac.jp

て考察する。

以降、関連研究について概観した上で本研究の位置づけを示す。次にソフトマテリアルと振動スピーカを用いたインタフェースの試作について報告する。続いて、試作インタフェースの音響特性を測定する実験について述べる。その後、測定結果を踏まえて本インタフェースの特性に適した使用例を考察し、今後の課題について論じる。

2. 関連研究

本研究と関連する研究として、振動素子を介して音響を提示するアート／エンタテインメント作品と、柔らかな素材を用いた音楽演奏インタフェースが挙げられる。ここでは上記の2つの観点から先行研究を整理し、本研究の位置づけを示す。

2.1 振動素子による音響提示

振動素子を用いて音響信号を触覚や骨伝導によって受容できる装置は、様々なアート／エンタテインメント作品に用いられている。振動スピーカによって生成された音響を触覚や骨伝導で受容する仕組みを用いたアート作品として、1978年に制作されたローリー・アンダーソンによる“ハンドフォン・テーブル”[8]が挙げられる。この作品は木製の机と椅子からなり、体験者は椅子に座ってテーブルに肘をつき、両手で耳の付近を手で覆うような姿勢を取ることで、テーブルに仕込まれた音響装置から生成される音響を骨伝導で聴取することができる。聴覚障がい者の音楽体験を向上させることを目的とした事例としては、先に挙げた音を光と振動に変換して体感できるデバイス“SOUND HUG”[2]，“Ontenna”[3]の他にも、ジュネーブの芸術歴史博物館で展示された椅子型インスタレーション作品の事例[9]などがある。

これまでの事例の多くは、体験者に音響を提示する装置に硬い素材が用いられているが、本研究では柔らかく変形可能な素材を用いることで、体験者からの入力操作を可能としつつ、体験者が装置に触れる際に生じる感性的、アートの魅力を併せ持つインタフェースを目指している。

2.2 柔らかな素材を持つ音楽演奏インタフェース

柔らかな素材を持つ音楽演奏インタフェースの例として、WicaksonoらによるFabricKeyboardが挙げられる。このインタフェースには布地が用いられており、布を押したり、引っ張ったり、ひねったりするジェスチャーだけでなく、布に対して手をかざしたり振ったりするなど、多くの入力に対応している点が特徴である[10]。他にも、Troianoらは、変形可能な素材でできた音楽演奏用インタフェースを用意し、複数の演奏家に使用させるワークショップを実施したところ、演奏家は変形による入力情報を特に音のフィルタリングや変調に使用していることなどを報告して

いる[11]。

柔らかな素材はすでに音楽演奏インタフェースに用いられており、音楽情報の入力における有用性の観点から議論がなされているが、本研究は柔らかな素材が出力インタフェースとして音響と関連する触感をユーザにフィードバックすることを目指す点が特徴である。また、体験時における素材の質感と生成される音響の感覚間協応[12]についても、明らかにすることを目指している。

3. インタフェースの試作

本章では、ソフトマテリアルと振動スピーカを用いて試作したインタフェースの詳細について報告する。はじめに、インタフェースの概要について述べ、制作の流れについて報告する。

3.1 インタフェースの概要

試作したインタフェースはソフトマテリアル部分がドーム状となっており、ユーザが手で触れやすい形状とした(図1)。ドーム内部は空洞になっており、振動スピーカ(4Ω 25W, FTVOGUE)をドーム内側天井部に両面テープで固定した(図2)。振動スピーカからの出力によってドームが振動し、音と振動をユーザに提示する仕組みとなっている。



図1 大小のドームインタフェース

3.2 台座の制作

ドームの台座は3Dプリンタで制作した。底面と振動スピーカの間にはユーザの押す行為を検出するための圧力センサが取り付けられており、ドームが下方に押し下げられることで振動スピーカを介して圧力センサに力がかかる仕組みとなっている。また、底面には各種ケーブルを通すための穴が空いており、ドーム内部にはリングLEDを内蔵し、光での演出も可能とした。圧力センサからの入力およびリングLEDの制御にはArduino Uno R3を使用した。Arduino Uno側で圧力センサの値をリアルタイムに取得

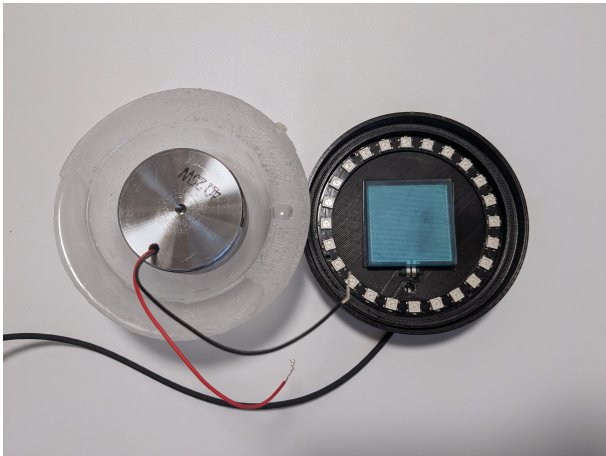


図 2 ドーム内部の構造



図 3 シリコン型 (2種類)

し、0-127の値に変換しMIDIデータとしてPC側へ出力する仕様とした。MIDIファームウェアにはMoco for LUFAを使用した。リングLEDの色・明るさ制御はMIDI信号を介して行い、MIDIコントロールチェンジのメイン・ボリューム、エクスプレッション、パンがそれぞれLEDの明度、彩度、色相に対応する仕様とした。

3.3 ドーム部分の制作

ドームは直径10cmと14cmの2種類のサイズを制作した。素材の厚みは約1.5cmとした。ドーム形状を保持し強度を確保するため、ドーム内側に別途PET素材の薄いドーム板を貼り合わせた。ドーム素材には軟質ウレタン樹脂「人肌のゲル 透明 硬度0」および「人肌のゲル 透明 硬度7」(株式会社エクシール)を使用した。ドーム板は真空成型機(Mayku FormBox)を用いて制作し、原型は3Dプリンタ(Raise3D Pro3, Raise3D社)で制作した。

ドームの制作は以下の流れで行った。はじめに、ドームを作成するためのシリコン型を作成した(図3)。シリコン型作成のための原型となるドームは、3Dプリンタで制作した。シリコン型制作の準備として、平面に粘土を平らに広げ、その上に型取り用ブロック(GSIクレオス社)で枠を作成した。続いて、枠の内部に原型を配置し、硬化剤を混ぜたシリコンを流し入れた。硬化後、枠を外して裏返し、再度枠を作り、硬化したシリコンとドーム裏側に離型剤を塗布した後にシリコンを流し入れた。上記の手順でドーム表裏のシリコン型を作成した。

シリコン型の完成後、「人肌のゲル」の主剤と硬化剤を既定の割合で混合し、シリコン型に流し入れた。硬化後、ドームをシリコン型から取り出し、表面のタック(ベタつき)を抑えるためにベビーパウダー(ジョンソン&ジョンソン社)を薄く塗布した。

4. 実験方法

ソフトマテリアルはその触感がユーザへの感性的魅力に

なりうるが、木や樹脂のような硬い素材と比較して音響特性に劣ることが予想される。そのため、再生する音源の適性や一般的なスピーカの併用などについて考察することを目的として、試作したインタフェースの音響特性を測定した。

試作インタフェースのドーム部分は、直径10cm・硬度0(小, 軟), 直径10cm・硬度7(小, 硬), 直径14cm・硬度0(大, 軟)の3種類を用意した。なお、ここでの硬度は使用した軟質ウレタン樹脂の商品名に記載された値であり、厳密に測定されたものとは異なる。

実験用システムの構成は図4のとおりである。音源の再生用PCはMac Mini (M1, 2020)、オーディオインターフェイスにはM4 (MOTU)、マイクにはPVR2 (PEAVEY)、音響測定ソフトにはREW、振動スピーカのアンプにはFX202A/FX-36A PRO (FX-AUDIO-)を使用した。音響測定は、図5のような形で実施した。試作したインタフェースを小型の防音ボックスに入れ、マイクスタンドに設置したマイク先端をドーム天頂に向けて実験を行った。騒音計(シンワ測定, 品番: 78588)を用いて防音ボックス内の音圧レベルを測定したところ、無音時で約37dB(A特性)であった。

本インタフェースはユーザが手や耳をインタフェースに近接させたり、手を触れながら音響を聴取することが想定されるため、測定は以下の3つの条件で行った。

- マイク先端とドーム天頂との距離が約1cm
- マイク先端とドーム天頂との距離が約20cm
- 実験者がドームに手を添えた状態でマイク先端とドーム天頂との距離が約20cm

測定に際し、まず騒音計を用いて本システムにおける音圧レベルの校正を行った。また、オーディオインターフェイスの周波数特性を測定し、校正を行った。その後、音響測定ソフトを用いて試作インタフェースからスイープ信号を再生し、マイクで収録した信号を元に各ドームおよび測定条件ごとに音響特性を求めた。

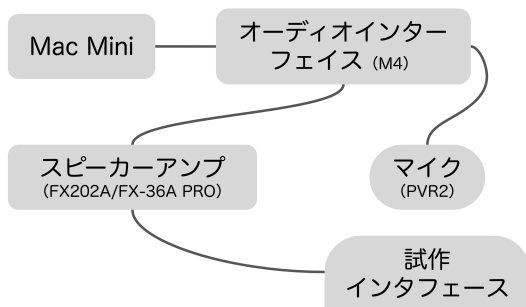


図 4 実験用システム構成



図 5 実験風景の写真

5. 実験結果

本章では、試作インターフェイスの音響特性を計測した結果を報告する。具体的には、3種類のドームに対し、マイクを近接させた状態（約 1cm）、マイクを離れた状態（約 20cm）、手を添えてマイクを離れた状態（約 20cm）の3種類の測定条件で、合計 9 つのデータを測定した。

5.1 各ドームにおける音響特性の違い

図 6, 7, 8 は、各ドームにおける音響特性をマイク近接時、マイクを離れた時、手を添えた時の3種類の測定条件ごとにまとめたグラフである。グラフの横軸は周波数 (Hz)、縦軸は音圧レベル (dB) である。全体的な傾向として、100 - 1000 Hz 付近の帯域において音圧レベルは大きくなり、約

1 kHz 以降、周波数が高くなるにつれて音圧レベルが小さくなる傾向が読み取れた。

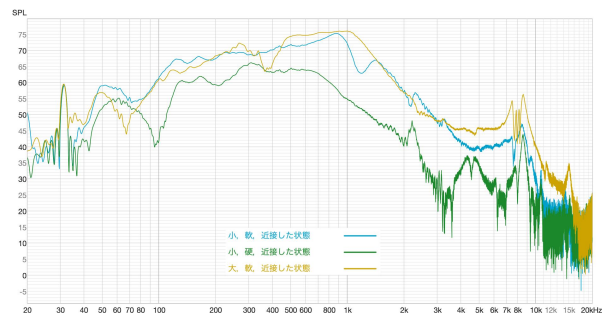


図 6 3種類のドームの音響特性（マイク近接時）

マイク近接時において、ドーム（小、硬）は、ドーム（小、軟）とドーム（大、軟）と比較して全体的に音圧レベルが低かった。また、ドーム（大、軟）は 70, 400 Hz 付近、ドーム（小、硬）では 100 Hz 付近で音圧レベルの低下がみられた。

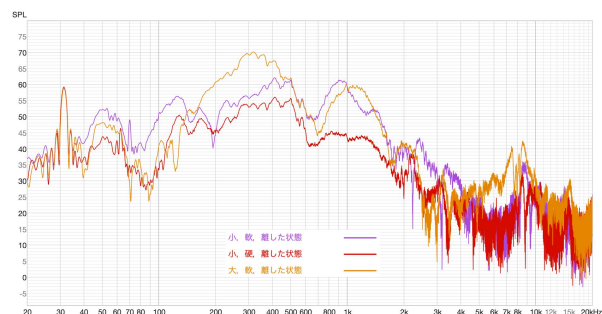


図 7 3種類のドームの音響特性（マイクを離れた時）

マイクを離れた時において、どのドームにおいても 600 Hz 付近で音圧レベルの低下がみられた。ドーム（小、軟）とドーム（大、軟）においては 1 kHz 付近で音圧レベルが上がっており、1 kHz 以降はどのドーム形状においても音圧レベルが低下した。ドーム（大、軟）においては他のドーム形状と比較して 300 Hz 付近の音圧レベルの増大が見られた。

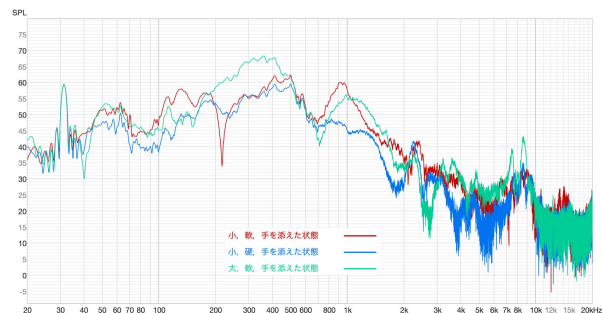


図 8 3種類のドームの音響特性（手を添えた時）

手を添えた時においては、マイクを離れた時と類似した

傾向を示しており、どのドーム形状においても 600 Hz 付近で音圧レベルの低下がみられた。ドーム（小，軟）とドーム（大，軟）においては 1 kHz 付近で音圧レベルが上がっており、1 kHz 以降はどのドーム形状においても音圧レベルが低下した。

5.2 各測定条件における音響特性の違い

図 9, 10, 11 は、マイク近接時、マイクを離れた時、手を添えた時の音響特性をドーム形状ごとにまとめたグラフである。グラフの横軸は周波数 (Hz)、縦軸は音圧レベル (dB) である。

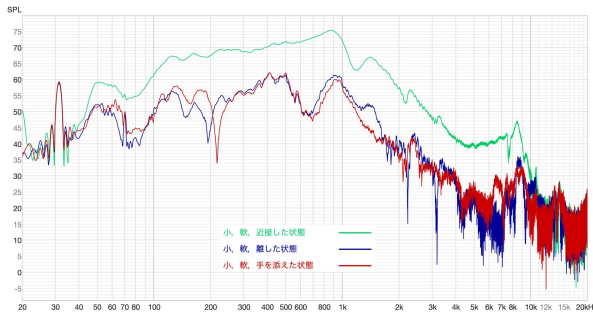


図 9 ドーム（小・軟）の音響特性

ドーム（小・軟）においては、マイク近接時と比較してマイクを離れた時と手を添えた時の方が不均一な周波数特性であり、特に 600 Hz 付近での著しい音圧レベル低下がみられた。また、マイクを離れた時と比較して手を添えた時の方が、80 Hz 付近での音圧レベルがわずかに大きくなった。

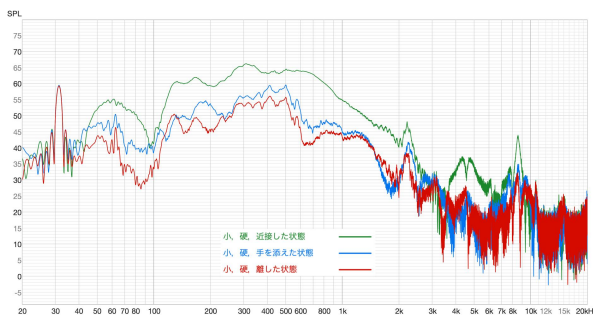


図 10 ドーム（小・硬）の音響特性

ドーム（小・硬）においては、マイク近接時／手を添えた時と比較してマイクを離れた時の方が比較的フラットな特性となった。特にマイクを離れた時と比較して手を添えた時の方が、80 Hz 付近での音圧レベルが大きくなった。

ドーム（大・軟）においては、ドーム（小・軟）と類似した傾向を示しており、マイク近接時と比較してマイクを離れた時と手を添えた時の方が不均一な周波数特性であり、特に 600 Hz 付近での著しい音圧レベル低下がみられた。また、マイクを離れた時と比較して手を添えた時の方が、80 Hz 付近での音圧レベルが大きくなった。

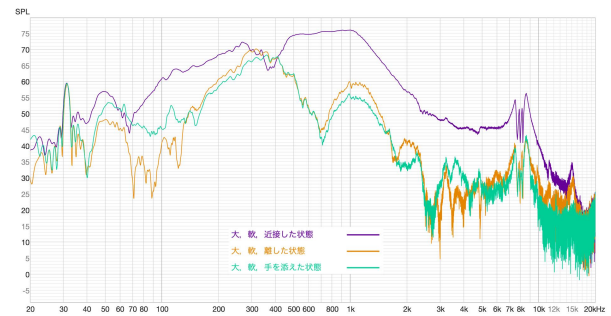


図 11 ドーム（大・軟）の音響特性

6. 考察

本章では、試作したインタフェースの音響特性の計測結果を踏まえ、使用する音源の適性や想定される使用例等について考察する。

6.1 試作インタフェースの音響特性

現状の試作インタフェースは、どのドームにおいても 100 - 1000 Hz 付近の音圧レベルが比較的大きくなり、1 kHz 以降の高周波数帯域が低下するなど、全体的に不均一な音響特性を持っていた。したがって、現状ではドームの硬度や大きさに関わらず、原音を忠実に再現するには不十分な特性である。形状やサイズ等の工夫によって音響特性がいくら改善される余地はあるものの、特に 100 Hz 以下の低音域および 1 kHz 以上の高音域については一般的なスピーカを併用して補う必要があると言える。すなわち、現状のインタフェースはあくまでも音響を触感として提示することに特化したインタフェースとして、一般的なスピーカと互いに相補的な音響装置として使用することが望ましい。

一方、指先によって知覚される振動の感度は 100-300 Hz 周辺にピークがある [13] と言われており、本インタフェースの音響特性とある程度一致する。また、触れることによる音響特性の悪化は確認できず、80 Hz 付近の低音域においては改善された。これらの点から、本インタフェースは触覚提示装置としては必要十分な特性を持っていると捉えることができる。

6.2 使用する音源の適性

続いて、使用に適する音源や使用例について考察する。本インタフェースの音響特性、および指先の振動に対する感度を踏まえると、主に中低音域の提示に適している。具体的な楽器を例に挙げると、ベース、ギターのリズム、バスドラム、スネアドラムの胴鳴りなどが考えられる。逆に、1 kHz を超える帯域においては、本インタフェースの音響特性、およびヒトの振動に対する感度の観点から再生には適していない。特に、倍音を多く含むシンバルや金管楽器のような音色においては倍音成分が十分に再生されないため、既存のスピーカ等を併用する必要がある。

本インタフェースのドーム部分を押し込む操作を用いてインタラクティブに音響を変化させる場合、先行研究 [11] にあるとおり、変形による入力情報を特に音のフィルタリングや変調に使用するのが適していると考えられる。本インタフェースは押し込む強さに応じてドーム部分が柔らかく沈み込む特徴を持つため、音の立ち上がりから最大音量になるまでの時間が短い（アタックの強い）音色は不向きであり、いわゆるパッド系持続音のコントロールに向いている。

6.3 今後の課題

今後の課題としては、本インタフェースと一般的なスピーカを併用した際の音響特性の測定や、本インタフェースと一般的なスピーカを併用した際の音像定位について明らかにすることが挙げられる。また、ドーム素材として使用したソフトマテリアルの硬度によって、ユーザに与える印象は大きく異なると予想される。使用する素材の質感と、生成される音響との親和性などに関する感性評価を行うことで、使用する音色に適した硬度の選定が可能になる。他にも、指先の振動に対する感度の観点より、本研究で用いた手段では約 1 kHz 付近より高い周波数帯域の音響を触覚で提示することが困難である。高周波数帯域の音響を聴覚以外のモダリティに対して提示する手段についてもさらなる調査と検討が必要である。

7. おわりに

本研究では、ユーザからの入力に対し既存の生楽器や音楽インタフェースでは得られない特徴的な触感と音響を提示する手段として、振動スピーカとソフトマテリアルに着目したインタフェースを試作した。さらに、再生する音源の適性や想定される使用例等について考察することを目的として、試作したインタフェースの音響特性を測定した。

その結果、試作インタフェースは、100 - 1000 Hz 付近の音圧レベルが大きくなり、1 kHz 以降の高周波数帯域が低下する不均一な音響特性を持っており、現状では一般的なスピーカと互いに相補的な音響装置として使用することが望ましいことが判明した。一方、本インタフェースは触覚提示装置としては必要十分な特性を持っていることが分かった。

今後の課題としては、本インタフェースと一般的なスピーカを併用した際の音響特性の測定や音像定位、本インタフェースの感性評価などが挙げられる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費若手研究 23K12069 の助成を受けた。

参考文献

[1] 耳で聴かない音楽会 落合陽一×日本フィル プロジェクト VOL.1,

- <https://japanphil.or.jp/concert/20180422> (2023.12.12 閲覧) .
- [2] SOUND HUG, <https://pixiedusttech.com/technologies/sound-hug/> (2023.12.12 閲覧) .
- [3] Ontenna, <https://ontenna.jp> (2023.12.12 閲覧) .
- [4] Portocarrero, E., Dublon, G., Paradiso, J. and Bove Jr, V. M.: Listentree: audio-haptic display in the natural environment, in *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 395–398 (2015).
- [5] 中島武三志：ハプソニック・アート：触感を伝えるサウンド・アート, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 28, No. 2, pp. 71–79 (2023).
- [6] ROLI Seaboard RISE 2, <https://roli.com/products/seaboard/rise2> (2023.12.12 閲覧) .
- [7] The Cell Music Gear, <https://yoshihito-nakanishi.com/projects/thecellmusicgear/> (2023.12.12 閲覧) .
- [8] PROJECTS: LAURIE ANDERSON, https://www.moma.org/momaorg/shared/pdfs/docs/press_archives/5652/releases/MOMA_1978_0088_81.pdf (2023.12.12 閲覧) .
- [9] Sierra, M. C., Brunskog, J. and Marozeau, J.: An audio-tactile art installation for hearing impaired people, in *2nd Nordic Sound and Music Conference* (2021).
- [10] Wicaksono, I. and Paradiso, J. A.: Fabrickeyboard: multimodal textile sensate media as an expressive and deformable musical interface., in *NIME*, Vol. 17, pp. 348–353 (2017).
- [11] Troiano, G. M., Pedersen, E. W. and Hornbæk, K.: Deformable Interfaces for Performing Music, in *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 377–386, New York, NY, USA (2015), Association for Computing Machinery.
- [12] Spence, C.: Crossmodal correspondences: A tutorial review, *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 73, pp. 971–995 (2011).
- [13] 田中由浩：振動に関わる皮膚特性, 触覚, 運動特性, パイオメカニズム学会誌, Vol. 41, No. 1, pp. 21–26 (2017).