

温冷覚フィードバックを伴う 流体音楽インタフェースの検討

中島 武三志^{1,a)}

概要：柔らかく変形可能な素材を応用した音楽インタフェースは触感が特徴であり、演奏家のみならず一般人を対象とした体験型作品としての応用が期待されている。音楽インタフェースにおける触覚フィードバックが音楽体験にもたらす価値については、生成される音響との物理的な因果関係の強い力覚や振動感覚に基づくものが主に報告されている一方、それ以外の触覚については十分に検討されていなかった。日常生活においては、力覚や振動のほか、温冷覚も重要な情報の一つである。本研究では、音楽インタフェースにおける温冷覚フィードバックが音楽体験を向上させる可能性に着目し、温度コントロールされた水に触れることで音響が生成される DMI の検討、および応用例としてサウンドインスタレーション作品の制作を行った。

1. はじめに

音楽インタフェースにおける触覚フィードバックの重要性が指摘されており、音楽の演奏や鑑賞体験がより豊かになることが報告されている [1], [2], [3]。中でも、柔らかく変形可能な素材を応用した DMI (Digital Musical Instruments) は触感が特徴であり、演奏家のみならず一般人を対象とした体験型作品としての応用が期待されている [4]。音楽演奏／鑑賞インタフェースにおける触覚フィードバックが音楽体験にもたらす価値については、生成される音響との物理的な因果関係の強い力覚や振動感覚に基づくものが主に報告されている一方、それ以外の触覚については十分に検討されてこなかった。日常生活においては、力覚や振動のほか、温冷覚も重要な情報の一つである。音色を形容する際にも「暖かい」「冷たい」といった表現はしばしば用いられ、温冷覚と聴覚との間には感覚間協応 (crossmodal correspondences[5]) の存在が示唆される。音楽インタフェースに触れる際、生成される音響と調和した温冷覚を提示することで、より豊かな音楽体験が生み出される可能性が考えられる。

そこで本研究では温冷覚フィードバックが音楽体験を向上させる可能性の探求を目的とし、温冷覚をフィードバックする DMI についての検討を行った。具体的には、日常的に異なる温度帯で触れる機会の多い素材である水を用いて、温度コントロールされた水に触れることで音響が生成

される DMI を試作した。

2. 関連研究

本章では、本研究と関連の深い研究についてまとめる。まず、触感が特徴的な DMI に関する研究を整理する。続いて、本研究が着目する温冷覚の提示インタフェースに関する研究、および聴覚と温冷覚との感覚間協応についての研究動向について述べる。

2.1 触感が特徴的な DMI

特徴的な触感や直感的なインタラクションを有する DMI として、弾性素材を用いた柔らかく変形可能な DMI がこれまでに提案されてきた。このような DMI は“ノンリジッド音楽インタフェース”とも呼ばれる [4]。ノンリジッド音楽インタフェースの先駆的な例として Chang らによる“Zstretch”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、布を掴んだり、引っ張ったり、ねじったりするなど、多くの入力に対応している点が特徴である [6]。Wicaksono らによる“FabricKeyboard”も布地が用いられた DMI で、既存の鍵盤と同じレイアウトを採用しつつ、多くの入力操作に対応している [7]。布地以外では、スポンジを用いた DMI [8] や小麦粘土を用いた DMI [9] などが提案されている。

ノンリジッド音楽インタフェースは、楽しさに溢れ、本能的で、探索的な音楽体験への応用が期待されている。複数のノンリジッド音楽インタフェース研究者らは、演奏家だけでなく多くの聴衆を魅了するインタラクティブなイン

¹ 東京工芸大学

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

スタレーションに役立つ可能性を指摘しており [4], 単なる音楽演奏目的ではないアート／エンタテインメントへと展開してゆくケーススタディが今後の課題である。

上述の弾性素材以外に, 流体を用いた音楽インタフェースについても報告されている。特に, 水は柔らかく変形可能な素材として最も身近な存在のひとつである。米澤らによる “Tangible Sound” は, 流れる水に触れることで音響が生成されるインタフェースである [10]。他にも, 等力らはスピーカユニット上にダイラタント流体を入れ, 触れることで音響が生成される DMI を提案している [11]。このインタフェースは触れる強さによって硬さが変化し, 音響を振動で知覚できる点が特徴である。流体はスポンジや布といった素材と異なり, 形状を維持することができない。しかしながら, これらも広義のノンリジッド音楽インタフェースと捉えることができる。

ノンリジッド音楽インタフェースにおいては, 素材が持つ多様なアフォーダンスとコントロールされる音響パラメータとのマッピングについて主に議論されている。一方, ノンリジッド音楽インタフェースの触感によってもたらされる音楽体験向上の可能性については, 未だ議論の余地がある。また, 素材の触感と生成される音響との親和性や相互作用性, すなわち聴触覚間協応や聴触覚間相互作用の観点に基づいた音楽インタフェースデザインについては十分に検討されていない。

2.2 温冷覚を提示するインタフェース

音楽鑑賞を目的とした温冷覚提示インタフェースとしては, Akiyama らによる “ThermOn” が挙げられる [12]。 “ThermOn” はペルチェ素子を取り付けられたヘッドホン型インタフェースで, 音楽鑑賞時の耳に温冷覚を提示する仕組みとなっている。このインタフェースを用いることで音楽鑑賞時の感情体験がより高められる可能性を示している。その他, 音楽鑑賞／演奏目的ではない温冷覚提示インタフェースは複数の報告例がある。中でも, 串山らは温冷覚をインタラクティブに表示できる情報提示用小型ディスプレイを使用した温度のお絵かきができるシステム “Thermo-Drawing” を制作し, 国籍や年齢, 視覚障害などのハンディキャップにかかわらず温度による触覚表現と情報伝達の可能性を提案した [13]。他に, 温覚と振動を提示するインタフェース [14] や水を用いたゲームコントローラ [15] などが提案されている。

一方, 音楽演奏やインタラクティブな音楽コンテンツなどにおける温冷覚提示の心理的効果については十分に検証されていない。

2.3 聴覚と温冷覚の感覚間協応

聴覚と温冷覚の感覚間協応は, 聴覚と他の触覚との感覚間協応と同様に存在が示唆されている。Eitan らは, 音高,

音量, 楽器の音色 (バイオリン／フルート), およびピッチの異なる 20 の音に対して, 6 つの相対する触覚的メタファー (鋭いー鈍い, 滑らかー粗い, 柔らかいー硬い, 軽いー重い, 温かいー冷たい, 湿ったー乾いた) がどれほど適合するかを調査した結果, 高い音程は低い音程よりも有意に鋭く, 粗く, 硬く, 冷たく, 乾燥していて, 軽いと評価されたことを報告している [16]。また, Wang らは熱い水, 常温の水, 冷たい水を試飲した際の味覚に合う音楽を選択する実験を行い, 常温水や熱い水と比較して, 冷たい水の体験が高い音程と速いテンポと有意に結び付けられることを確かめた [17]。

一方, 音響信号の振幅エンベロープや倍音構成など, 音色を特徴づける各種パラメータと温冷覚との感覚間協応については, 未だ検証の余地がある。他にも, 聴覚と温冷覚の感覚間協応を音楽インタフェースに応用することでユーザ体験にどのような効果をもたらすかについても明らかになっていない。

3. 温冷覚フィードバックを伴う流体音楽インタフェースの試作

本章では, 水による温冷覚フィードバックを伴うボウル型音楽インタフェースの詳細について報告する。

3.1 ボウル型インタフェースの概要

本インタフェースは水の入ったボウルに手を入れると, 音楽情報送受信プロトコルである MIDI データを外部 DAW 等に出力するインタフェースである (図 1)。さらに, それぞれのボウル型インタフェース内にはアクリルストーンが入っており, 手で混ぜる動作によって生じる音をトリガーにして音響が変化する仕組みを有する。ボウル内の水はサーモスタットによって一定の温度に保たれる。



図 1 ボウルインタフェースの外観

3.2 ハードウェア構成

インタフェースのハードウェア構成は図2のとおりである。本インタフェースはボウル内の水温コントロール、タッチ検出、動作音の検出を行うための台座と、実際にユーザが触れるボウル（水、アクリルストーン）部分からなる。水やボウルへのタッチ検出には静電容量の変化を利用した。ボウルには熱伝導性の観点からステンレス製のものを用いた。タッチ動作の検出、およびPCへのデータ送信にはArduino Leonardoを用いた。ボウル内の水温コントロールにはPTCヒータープレート（MOYUI, 品番なし）とサーモスタット（KETOTEK, KT3200）を使用し、PTCヒータープレートは台座内部に取り付けた。ボウル内で発生する音の検出にはコンタクトマイク（Luvay, 000026）を使用し、台座内部に取り付けた。コンタクトマイクとPCとの接続にはオーディオインタフェース（MOTU, M4）を用いた。



図2 ハードウェア構成

3.3 データフロー

本インタフェースのデータフローは図3のとおりである。ボウル型インタフェース側で水へのタッチ動作を検出し、MIDI データがPC側へと送信される。同時に、水を手で混ぜる動作によって生じる音がPC側に入力される。PC側ではPure Dataを用いてタッチ、動作音进行处理し、MIDI データとして外部DAW等へ送信する。収録された動作音の音量をMIDIのコントロールチェンジ（CC7）としてDAW等へ送信する仕様とした。

3.4 サウンドインスタレーションへの展開

本インタフェースの応用例として、冷たい感覚を提示しながら音響の変化を楽しむサウンドインスタレーション作品“涼音 -Suzune-”を制作した（図4）。“涼音 -Suzune-”は、流れる水の音、鳥のさえずり、カエルの鳴き声、木の葉の擦れる音が含まれた背景音がスピーカから再生されてお



図3 データフロー

り、ユーザがボウル型インタフェースに触れることで、川辺で水に触れる際の涼しげな感覚と調和した音響が生成されることを意図した作品となっている。サウンドデザインのねらいとして、Wang らによる研究 [17] を参考に、冷たさを連想させる比較的高音で細かなサウンドが生成されるようデザインした。音響の生成にはCubase 10.5 (DAW), Pure Data (オーディオプログラミング), Omnisphere 2 (ソフトウェア音源) を使用した。ボウル内の水の温度は約25℃に設定した。



図4 作品の様子

4. 今後の課題

本章では、試作したボウル型インタフェースに関する今後の課題について述べる。

まずはじめに、ユーザに提示する水温制御の改善が必要である。現状では水温コントロールに既製品を用いているが、より緻密でインタラクティブな水温制御機構の制作が課題である。音響の変化やユーザによるインタラクションに応じて温度をコントロールできれば、より多彩な表現への可能性が広がる。土井らによると、ヒトの手掌部におけ

る温度感覚のカテゴリは以下になる [18].

- だいぶ冷たい: 19.4 °C
- やや冷たい: 25.2 °C
- どちらでもない: 31.5 °C
- やや温かい: 37.7 °C
- だいぶ温かい: 43.8 °C

現状では1つの温度帯しか提示できないが, 上記に基づいて3-5つ程度の異なる温度感覚をフィードバックするインタフェースを用意することで, 温度感覚の違いを体験者に提供することが可能と考えられる.

今回はサウンドインスタレーション作品として作者の感性に基づく温冷覚と音響の対応付けを行った. しかし, 現状では温冷覚と音色との感覚間協応については検証できていない. 今後は温冷覚と結びつきの強い音響パラメータの存在を検討することが課題である. この点が明らかになれば, より直感的なユーザ体験を生み出す可能性や, 音楽インタフェースのデザインなどへの応用が期待できる.

5. おわりに

本研究ではDMIにおける温冷覚フィードバックが音楽体験を向上させる可能性に着目し, 温度コントロールされた水に触れることで音響が生成されるDMIを試作した. また, 本インタフェースの応用例として, 川辺で水に手を触れた際の涼しげな感覚をモチーフとしたサウンドインスタレーション作品“涼音 -Suzune-”を制作した. 今後の課題として, より緻密でインタラクティブな温度制御機構の制作が挙げられる. また, 温度感覚と結びつきの強い音響パラメータの存在を検討することが課題である.

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] Merchel, S. and Altinsoy, M. E.: Music-induced vibrations in a concert hall and a church, *Archives of Acoustics*, pp. 13–18 (2013).
- [2] Fontana, F., Papetti, S., Järveläinen, H. and Avanzini, F.: Detection of keyboard vibrations and effects on perceived piano quality, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 142, No. 5, pp. 2953–2967 (2017).
- [3] Young, G. W., Murphy, D. and Weeter, J.: A functional analysis of haptic feedback in digital musical instrument interactions, *Musical Haptics*, pp. 95–122 (2018).
- [4] Boem, A., Troiano, G. M., Lepri, G. and Zappi, V.: Non-Rigid Musical Interfaces: Exploring Practices, Takes, and Future Perspective., in *NIME*, pp. 17–22 (2020).
- [5] Spence, C.: Crossmodal correspondences: A tutorial review, *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 73, pp. 971–995 (2011).
- [6] Chang, A. and Ishii, H.: Zstretch: a stretchy fabric music controller, in *Proceedings of the 7th international conference on New interfaces for musical expression*, pp. 46–49 (2007).
- [7] 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).
- [8] Boem, A.: Sculpton: A malleable tangible interface for sound sculpting, in *ICMC* (2014).
- [9] 梁文碩, 山岡潤一: 直感的なサウンドデザインのための柔軟な音楽インタフェースの提案, 日本ソフトウェア科学会インタラクティブシステムとソフトウェア (ISS) 研究会 WISS 2020 予稿集 (2020).
- [10] 米澤朋子, 間瀬健二: 流体による楽器インタラクション (< 特集 > インタラクティブアート), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 5, No. 1, pp. 755–762 (2000).
- [11] 等力桂, 横田智大, 橋田朋子: スピーカーユニット表面にダイラタント流体を用いた硬さ変化と振動提示が可能なパッド型音楽インターフェース, *インタラクション 2017 論文集*, pp. 393–396 (2017).
- [12] Akiyama, S., Sato, K., Makino, Y. and Maeno, T.: ThermoOn: thermo-musical interface for an enhanced emotional experience, in *Proceedings of the 2013 International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '13, pp. 45–52, New York, NY, USA (2013), Association for Computing Machinery.
- [13] 串山久美子, 土井幸輝, 笹田晋司, 馬場哲晃: Thermo Drawing: 冷温提示による小型触覚ディスプレイを使用した温度描画システムの開発, *インタラクション* (2012).
- [14] 野澤朋広, 澤田秀之他: 振動と温度のマルチモーダルディスプレイを用いた皮膚の触覚感覚の評価, 第85回全国大会講演論文集, Vol. 2023, No. 1, pp. 241–242 (2023).
- [15] 田中祐玖, 畑田裕二, 苗村健: °C 0Button: 水の物性を活用したゲームコントローラ, *インタラクション 2024 論文集*, pp. 193–196 (2024).
- [16] Eitan, Z. and Rothschild, I.: How music touches: Musical parameters and listeners' audio-tactile metaphorical mappings, *Psychology of Music*, Vol. 39, No. 4, pp. 449–467 (2011).
- [17] Wang, Q. J. and Spence, C.: The role of pitch and tempo in sound-temperature crossmodal correspondences, *Multisensory Research*, Vol. 30, No. 3-5, pp. 307–320 (2017).
- [18] 土井幸輝, 西村崇宏, 瀬尾明彦, 串山久美子, 馬場哲晃: ヒト手掌部における温度感覚特性及び識別特性の評価, *日本感性工学会論文誌*, Vol. 11, No. 3, pp. 419–425 (2012).