

ハプティックアクチュエータを利用した対話型音階呈示システム

中田 一紀^{*1} 大西 淳児^{*1} 坂尻 正次^{*1}

An Interactive Musical Scale Presentation System via Tactile Sense using Haptic Actuator

Kazuki Nakada^{*1}, Junji Onishi^{*1} and Masatsugu Sakajiri^{*1}

Abstract – In this study, we propose an interactive musical scale presentation system through tactile sense with the haptic reactor for singing training of deaf-blind or the hearing impaired persons. In the proposed system, we applied the Nintendo Switch as an interactive interface to present the musical scale of songs to the player (learner). The partner (teacher) plays music on a key-typing operation panel like a piano keyboard set on the touch screen of the Switch. The learner receives (perceives) vibration patterns corresponding to musical scale including pitch, timing, and melody with the standard game controller of the Nintendo Switch, Joy-Con, equipped with the haptic reactor, and experience the music performance. Furthermore, in addition to the interactive performance mode, we implemented an automatic performance mode so that learners can learn individually.

Keywords: Interactive Musical Scale Presentation System, Vibrotactile Human-Machine Interface, Haptic Actuator

1. はじめに

盲ろう者のコミュニケーションを支援する技術として、触覚として情報を呈示するためのさまざまなシステムが提案されている^[1-9]。コミュニケーションにおいて、言語情報とともに、韻律情報の伝達が重要であることが示唆されており、聴覚代行として触覚により韻律情報を伝える手法の研究が進められている^[1-4]。

音楽によるコミュニケーションでは、音声で言語情報としてメッセージを伝えるとともに、非言語情報として韻律情報（奏者の感情や場の状況）を伝えることは重要な役割を果たしている。また、音楽は本質的に双方向のコミュニケーションであり、音楽を受動的に「聴く」とともに、能動的に「演奏したい」・「歌唱したい」という欲求は潜在的に高いと考えられる。

これまでの研究において、盲ろう者の歌唱支援のための触覚フィードバックを介した音声ピッチ呈示システムが提案されている^[1]。先行研究では、目標となる教示音階と学習者の音階（音声ピッチ周波数に対応）を同時に触覚ディスプレイに呈示することで、教示音階に対して、一定のばらつきの範囲内で音声ピッチを制御できることが示されている^[1]。

本研究では、先行研究で提案された歌唱支援のための音声ピッチ呈示システムのユーザビリティを高めることを目的として、音楽の双方向コミュニケーションの役割に着目し、対話型の音階呈示システムを提案する。ここで、音階とは音声ピッチ、タイミング、メロディという楽曲を構成する要素とし、楽曲の音階を対話的に学習者に呈示するシステムを考える。ユーザビリティを高める

ために、携帯ゲーム機として普及しているニンテンドースイッチをインタフェースとして応用する。鍵盤のような打鍵型の操作パネルをスイッチ本体に設定し、演奏者はタッチスクリーン上で自由に楽曲を演奏する。学習者は音階に対応した振動をハプティックアクチュエータ^[10]を搭載したコントローラ（Joy-Con）で受け取り、演奏者の演奏を体感する。対話的に演奏することで、学習者と演奏者の間の音楽を介したコミュニケーションの向上が期待できる。さらに、対話型演奏モードに加えて、自動演奏モードを実装し、学習者が自主的に学習できるようにすることで学習効果の向上を図る。

2. 関連研究

2.1 聴覚—触覚変換

本研究に関連する従来研究として、聴覚の代行として、音声を振動に変換して触覚呈示するタクトイルエイドの実用化に向けた研究が進められている^{[3][5]}。音声を空間的な触覚パターンとして呈示する触知ボコーダは発話訓練に役立つことが示されており^{[3][4]}、ボディソニックは語学学習の効果を向上することが示されている^[5]。

聴覚—触覚変換において、聴覚の絶対音感のように、音階そのものを厳密に弁別することが難しくても楽曲の音階の相対的变化（音程）を捉えられることが示されている^[6]。聴覚と触覚は異なる周波数知覚特性を持つことから、聴覚での知覚に適した音声波形をそのまま周波数領域に変換しても触覚での知覚に適したものになるとは限らない。そこで、音楽波形の周波数を N 分周して触覚刺激に変換する手法^[7]が提案されている。また、楽器の音色を基本周波数と持続時間の異なる振動で表現し触覚として呈示することで音色を区別できることが示されている^[8]。さらに、単独の周波数のみならず複数の周波数成分を含む振動パターンも弁別できることが示されている^[9]。

^{*1}: 筑波技術大学保健科学部情報システム学科

^{*1}: Department of Computer Sciences, Faculty of Health Sciences, Tsukuba University of Technology

これらの研究から、聴覚代行として触覚に呈示する振動パターンを個々のユーザに応じて調整することで、より豊かな音楽体験を提供できると考えられる。

2.2 韻律同期・リズム同調

本研究では、音楽の双方向コミュニケーションの役割に着目し、対話型音階呈示システムを課題としている。会話を伴う対人コミュニケーションにおいて、話者間の同調傾向が高まり発話の生起時間や生起頻度、発話形態は類似してくる^[11]。つまり、対話により話者間のリズム同調が促進される。また、身体的同調により心理的同調が高まることもある。たとえばリズム同調の効果により幼児間において類似度や親密度が高まることも示されている^[12]。さらに、ディズニーの韻律同期を応用した協調操作ゲームではプレイヤー同士の親密度が高まることも示されている^[13]。音楽ゲームによりリズム同調を高めることで、心理的同調を向上する試みもなされている^[14]。

3. 提案システム

3.1 システム構成

提案システム全体の構成を示す(図1)。ニンテンドースイッチの本体に打鍵型パネルを実装し、それをタッチスクリーン上で操作することにより演奏する。教示者の演奏する楽曲の音階はニンテンドースイッチの Joy-Con の振動パターンに変換される。学習者は Joy-Con を手に持ち、教示者の演奏する楽曲の音階の変化を感知する。

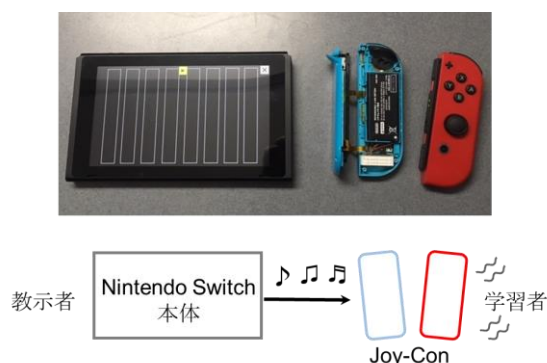


図1 システム構成
Fig.1 System Configuration.

ニンテンドースイッチは、ニンテンドーラボの Toy-Con ガレージというビジュアルプログラミング環境がある^[15]。Toy-Con ガレージには、「(ボタンを) おす」、「(コントローラ) をふる」、「(画面を) タッチする」といった直感的な入力モジュールや、「AND」、「NOT」、「カウンター」といった演算モジュール、さらに「光る」、「音 (が鳴る)」、「しんどろ (ふるえる)」といった出力モジュールが準備されており、それらの機能モジュールを組み合わせることで、データフロー的にプログラムを組むことができる。ここでは、対話型インタフェースとしてタッチ

スクリーン上に打鍵型パネルを実装し、奏でられる楽曲の音階に対応して、Joy-Con を振動させるようにした。

Joy-Con に搭載されているハプティックリアクタは、振動板を電磁的に駆動する方式のアクチュエータであり、高精細振動 (HD 振動) を生じさせることができる。そこで、ここではそのまま学習者のレシーバとして Joy-Con を利用する。振動周波数は 40Hz から 1280Hz まで整数値で設定することができる。ここでは、先行研究^[1]と同様に、音階を設定している (表1)。ただし、整数値とする必要があるため適宜数値は丸め込んでいる。振動の持続時間は最大 10 秒まで 0.01 秒単位で設定することができる。音の持続時間に応じて知覚される音階に影響することが知られており、パラメータとして調整できるように実装している。

4. 機能検証

表1 音階に対応した振動周波数
Table 1 Vibration Frequency Corresponding to Musical Score.

単位: Hz							
音階	C	D	E	F	G	A	B
周波数	131	147	165	175	196	220	247
							262

4.1 対話型演奏モード

ここでは、対話型演奏モードの機能検証について示す。まず、対話型インタフェースとして打鍵型パネルを実装する際に、ピアノ経験者に使用感を確認しながら調整を進めた。ニンテンドースイッチのスクリーンサイズは 6.2 インチであり、両手で操作するには十分な広さがない。そこで、白鍵だけを片手で演奏することを想定して鍵盤を設定した (図2)。タッチスクリーンに表示する大きさは、ユーザ (演奏者) に合わせてサイズを微調整できるようにした。演奏者にそのとき弾いている音をわかるようにするために、スイッチ本体のスピーカから音階を鳴らすようにすると同時に、タッチしている鍵盤を画面上で光らせるようにしている。

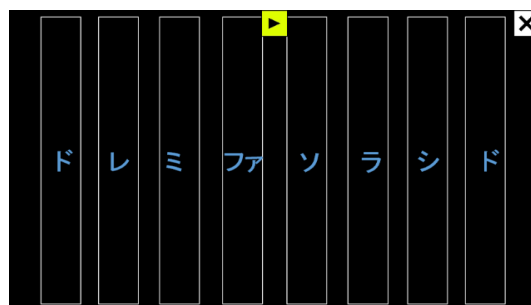


図2 ピアノ打鍵型インタフェース
Fig.2 An Interactive Interface like a Piano Keyboard

次に、Joy-Con によって生成される振動パターンを検証した。Joy-Con に搭載されているハプティックリアクタ^[10]は2つの共振点があり広い周波数帯域を持つ利点があるものの、実際に振動させてみると、幾つかの問題があることが分かった。1つは左右の Joy-Con によってパワーが異なるためより高出力が得られる右の Joy-Con を選択した。もう1つの課題は、共振点付近では十分に高出力が得られるのに対して、それより低周波あるいは高周波帯域になるにつれて急速にパワーが得られなくなることである。そこで、「AND」モジュールをアナログ的に使用すると2入力のうちより小さな値を出力する関数として動作することを利用して、音階毎に異なる出力のパワーを規格化した（図3）。

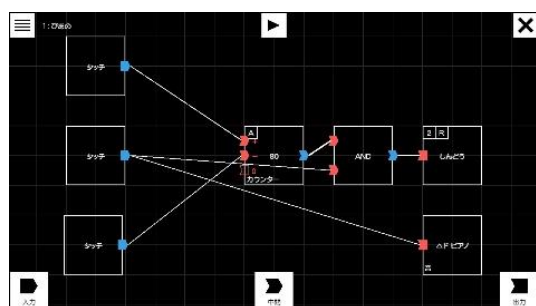


図3 音階毎に異なる出力パワーの規格化
Fig.3 Normalization of Output Power of Each Scale

さらに、拡張性を考えて、より複雑な振動パターンを生成できるかどうか検証した。従来のフォースリアクタは、1軸の自由度を持ち単調振動のみであったが、後継のハプティックリアクタは2軸の自由度を持ち、複数の周波数成分を組み合わせた振動パターンを生成することができる。したがって、もし提案システムの構成で複数の周波数成分を持つ振動パターンを生成できれば、より知覚できる表現の幅が広がる。実際に、複数の周波数で振動させられるかどうか検証したところ、先行した制御信号によって駆動された振動が後続の制御信号によって抑制されてしまうことを確認した。このことから、本来のハプティックリアクタの持つ性能を発揮し、より複雑な振動パターンを呈示するためには、Joy-Con の制御機構をカスタマイズした拡張モジュールの作製が必要になることが分かる。

4.2 自動演奏モード

ここでは、自動演奏モードの機能検証について示す。Toy-Con ガレージの演算モジュールには、0.01 秒単位で最大 10 秒まで任意の時間だけ信号の流れを遅延させる「タイマー」モジュールがある。このモジュールを直列に接続してシフトレジスタのように動作させることで、かんたんな楽曲を自動演奏させることができる（図4）。ここでは、「きらきら星」や「チューリップ」を課題曲と

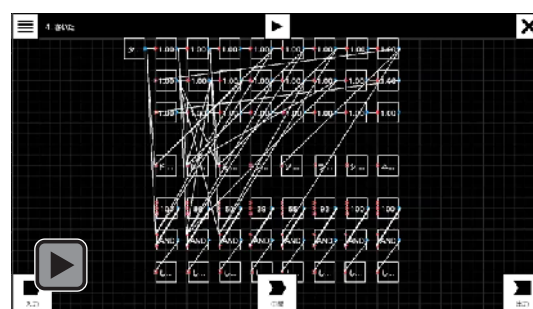


図4 自動演奏モードのデモ。Toy-Con ガレージの機能モジュールを組み合わせで実装している。
Fig.4 Demonstration of Auto Play Mode of Musical Scale Presentation System. It consists of functional modules of Toy-Con Garage.

している。「タイマー」モジュールによって遅延させる時間は、楽曲の楽譜に従うように単位時間を変更することで、演奏の「テンポ」を自由に調整することができるようにしている。

5. まとめとこれからの展望

本研究では、ハプティックアクチュエータを利用した対話型音階呈示システムを提案した。ユーザビリティを高めるために、ニンテンドースイッチとそのビジュアルプログラミング環境をプラットフォームとしてシステム実装を行なった。いつでもどこでもゲームのように演奏できるモバイルデバイスとして実装することで、学習者と教示者の間での音楽体験を通じたコミュニケーションの機会を促進することが期待できる。

今後の課題としては、システム実装に関して、

- ・学習者への歌唱フィードバック機構
- ・ハプティックリアクタを搭載した拡張コントローラを開発したい。ニンテンドースイッチの Joy-Con は仮想現実的な触感を得られるようにチューニングされており、そのままでも聴覚—触覚変換デバイスとして十分な効果を得られる。しかし、ハプティックリアクタの持つ本来の2軸振動を組み合わせた触覚刺激を呈示するために、Joy-Con の制御機構を拡張したコントローラを実装することが必要になる。その研究・開発を進めていく予定である。

また、提案システムの実証実験としては、

- ・韻律同期に着目した客観的評価

を進めていきたい。また、音の持続時間の効果についても検証したい。そのためには、さらにユーザビリティを高めることが必要になるので、その課題に取り組む予定である。

参考文献

- [1] Sakajiri, M., Miyoshi, S., Nakamura, K., Fukushima, S., and Ifukube, T. : Voice Pitch Control using Tactile Feedback for the Deafblind or the Hearing Impaired Persons to Assist their Singing, In Proc. IEEE Int. Conf. on Systems Man and Cybernetics, pp.1483-1487 (2010).
- [2] Chang, A., O'Modhrain, S., Jacob, R., Gunther, E., and Ishii, H. : ComTouch: Design of a Vibrotactile Communication Device. In Proc. of ACM Conf. on Designing Interactive Systems: Processes, Practices, Methods, and Techniques, pp.312-320 (2002).
- [3] Wada, C., Hisakazu S., and Ifukube, T. : Development and Evaluation of a Tactile Display for a Tactile Vocoder, Technology and Disability, Vol.11, No.3, pp.151-159 (1999).
- [4] Ifukube, T. : Discrimination of Synthetic Vowels by using Tactile Vocoder and a Comparison to That of an Eight-Channel Cochlear Implant, IEEE Trans. on Biomedical Engineering, Vol.36, No.11, pp.1085-1091 (1989).
- [5] 増田喜治, 小松明 : リズム教育を重視した LL システムの設計と実践, 語学ラボラトリー学会 (LLA), 第 29 回全国研究大会 (1989) .
- [6] 伊福部達 : 福祉工学の夢-指で見る『夢』, 究, p.10 (2011).
- [7] 岡崎龍太, 栗林英範, 梶本裕之 : 分周刺激を用いた聴触覚変換手法による音楽体験向上, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.21, No.2, pp.335-343 (2016).
- [8] Russo, F. A., Ammirante, P., and Fels, D. I. : Vibrotactile Discrimination of Musical Timbre, Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, Vol38, No.4, pp. 822-826 (2012).
- [9] Yoo, Y., Hwang, I., and Choi, S : Consonance of Vibrotactile Chords, IEEE Trans. on Haptics, Vol.7, No.1, 3-13 (2014).
- [10] <https://www.alps.com/prod/info/E/HTML/Haptic/>
- [11] 大坊郁夫 : しぐさのコミュニケーション: 人は親しみをどう伝えあうか, セレクション社会心理学, 14, サイエンス社 (1998) .
- [12] Rabinowitch, T. C. and Knafo-Noam, A. : Synchronous Rhythmic Interaction Enhances Children's Perceived Similarity and Closeness Towards Each Other, PloS One, Vol.10, No.4, e0120878 (2015).
- [13] Sadoughi, N., Pereira, A., Jain, R., Leite, I., and Lehman, J. F. : Creating Prosodic Synchrony for a Robot Co-Player in a Speech-Controlled Game for Children, In Proc. of ACM/IEEE Int. Conf. on Human-Robot Interaction, pp.91-99 (2017).
- [14] 前田佳史, 中川友貴, 楠見茉耶, 伊藤尚輝, 藤網伊織, 服部託夢, 中田一紀, 身体的コミュニケーションにおけるリズム同調を促進するウェアラブル EMG システ, IT ヘルスケア, Vol12, No.1, pp.149-154 (2017)
- [15] <https://www.nintendo.co.jp/hardware/switch/index.html>