

筋電気刺激による身体同期を利用した演奏者らの動作パラメータを操作可能な指揮棒インターフェースの開発

三浦 寛也^{1,a)} 浜中 雅俊^{1,b)}

概要: 我々はこれまで、筋電気刺激を用いて演奏者たちの身体機能を制御することによるアンサンブル演奏システムの開発に取り組んできた。本研究の目的は、この演奏システムを外部から操作可能な指揮棒インターフェースの開発である。具体的な取り組みとして、指揮棒に装着した加速度センサから指揮者の振る舞いを定量化することで、演奏のテンポや音の強弱、さらにメロディといった演奏者の動作パラメータをインタラクティブに操作するための仕組みを開発する。これにより、指揮者と演奏者の両者を包括した新しい演奏体験の実現を目指す。

Development of a Baton Interface that Enables Manipulation of Movement Parameters of Performers using Electrical Muscle Stimulation

1. はじめに

音楽におけるアンサンブル演奏は、演奏者間、そして指揮者と演奏者との協調作業である。音楽とは、人間の身体行為から生み出される音を組み合わせることで表現されるものであり、リズムやメロディ、ハーモニーなどの要素を用いて表現される。実際の音楽演奏では、実時間で操作されるものであり、視覚や聴覚による知覚、身振りや運動動作による表現などが重畳されたマルチモーダルな体験である [1]。また多人数による演奏では、周りの人のジェスチャや息遣いを感じ取り、指揮者に目を向けながら、協調的に演奏することが要求される。さらに、即興性の高い演奏形態では、演奏を通じてどのような進行にするか、演奏の盛り上がり部分をどうするかなどの意見交換が行われるものである。このように、音楽とインタラクションは演奏表現という観点で密接な関係を有しており、特に 1990 年代以降は、人間と機械、人間と人間のインタラクションに関連した研究や、自動伴奏システムやセッションシステムに代表される研究が活発におこなわれるようになった [2], [3], [4]。一方

で、音楽演奏やその技術習得におけるスキルの獲得と理解には、多大な学習が必要であり、なかでも運動制御の学習に多くの努力が費やされる [1]。

本研究は、アンサンブル自動演奏における指揮者と演奏者とのインタラクションを実現することを目的として、筋電気刺激 (Electrical Muscle Stimulation: EMS) による身体同期を利用した演奏者らのテンポ・ベロシティ・メロディといった動作のパラメータ (以下、動作パラメータと呼ぶ) を操作可能な指揮棒インターフェースを開発するものである (図 1)。我々はこれまで、EMS を用いて演奏者たちの身体機能を制御することにより演奏を達成するためのプロトタイプシステムの開発に取り組んできた [5]。そして我々は、システム利用者の身体の一部を EMS により制御可能であることを確認するとともに、複数の電気刺激発生装置を統合的に制御するための仕組みを試作し、複数楽器を用いた効果的な演奏方法についての試行実験を実施してきた。本研究では、加速度センサを搭載した指揮棒インターフェースおよびグローブインターフェースにより、指揮者の振る舞いを定量化することで、演奏のテンポや音の強弱、さらに未来に演奏するメロディといった演奏者の動作パラメータをインタラクティブかつ直感的に操作するための仕組みを開発する。メロディの操作には、音楽的な理解に基づく直感的な操作が求められる。筆者の 1 人は、音楽理論 GTTM [6] に基づくメロディ分析で獲得される楽曲構造 (タ

¹ 理化学研究所 革新知能統合研究センター
RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, Nihonbashi 1-chome Mitsui Building, 15th floor, 1-4-1 Nihonbashi, Chuo-ku, Tokyo, 103-0027, Japan

^{a)} hiroya.miura@riken.jp

^{b)} masatoshi.hamanaka@riken.jp

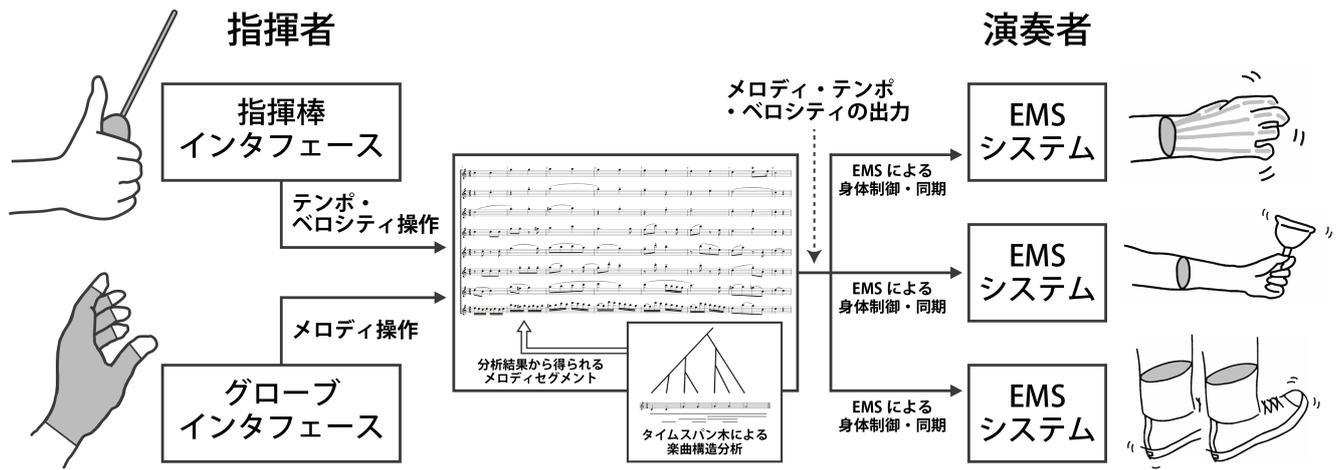


図1 研究概要
Fig. 1 Research Outline

イムスパン木)を用いたメロディ操作を試みており、2つのメロディの間にあるメロディを求めるメロディモーフィングを実現した [7], [8]。メロディモーフィングにより複数のセグメントを全体的な構造を保持したまま装飾音のみを変化させることで、直感的な操作が期待できる。これにより、指揮者と演奏者とのインタラクションを実現し、両者を包括した新しい演奏体験の実現を目指す。

2. 関連研究

音楽演奏におけるインタラクションやその操作に着目した代表的な研究として、自動伴奏システムやセッションシステム、テルミンに代表される電子楽器による音楽操作、複数のオーケストラ楽器を同時に演奏させる装置 [9]、多様なセンサを統合的に使用するインタラクティブ演奏システム [10] などある。しかし一般にこれらの演奏システムはすべて MIDI 音源による操作を基本としている。また、指揮とシステムに関する研究では、人間の指揮動作を何らかの入力デバイスで機械認識し、MIDI 等を用いてシンセサイザーでの演奏へ反映する研究 [11], [13] があるが、これらも同様に演奏者そのものを操作することは難しい。加えて、MIDI 音源と計算機を用いたオーケストラ演奏も実現されているが、これには最初から最後まであらかじめ準備されたデータを入力しておく必要があるため、楽曲そのものを音楽的な理解に基づきインタラクティブに操作することは難しい。なお、音楽演奏の技術習得に関する研究では、熟達した演奏者の場合、これらの練習時間のうちほとんどが滑らかで均一な運動動作の保持にあてられることが確認された [12]。芸術性が高く表情豊かな演奏のためには、緻密な運動の制御は不可欠であることが分かっている。

近年では、Human-Computer Interaction 研究の一環として、Electrical Muscle Stimulation (EMS) や外骨格デバイスを用いて手指の動きを制御し、運動や楽器演奏を支援する

研究も盛んに行われている [14], [17], [18]。この EMS は、インタラクティブメディア研究では、Virtual Reality (VR) や Augmented Reality (AR) のアプリケーションを超える触力覚インタフェースのための新しいメカニズムとして注目されている [19]。当該分野における先行研究では、これまでに EMS や外骨格グローブ型デバイスを用いた演奏補助システム [14], [17] や、筋活動の共有に基づく 2 者間の身体同期を促すシステム [18] などが開発されている。これらの研究は、身体機能の拡張のみに主眼を置かれてきたものであった。本研究では、音楽的な理解に基づく楽曲の操作と EMS による身体機能の融合、そしてテンポ・ベロシティ・メロディといった演奏者の動作パラメータを外部から操作することによるインタラクションを組み合わせた研究であり、従来の演奏体験のあり方に変化をもたらす可能性を秘めている。

3. 提案システム

本研究では、アンサンブル自動演奏における指揮者と演奏者とのインタラクションを実現するため、筋電気刺激 (EMS) による身体同期を利用した演奏者らの動作パラメータをインタラクティブに操作するための仕組みを提案する。具体的な取り組みとして、我々は、EMS システム、指揮棒インタフェース、グローブインタフェースを 3 つのシステムを設計し、それらを統合的に制御可能なシステムを開発した。まず初めに、演奏者の身体動作を制御するための方法として、EMS を用いて、多人数の手指や足などの身体動作を同期・制御するための装置である EMS システムを開発した。次に、指揮者側では、演奏者のリズムや音の強弱 (ベロシティ) に関する動作を制御するシステムである指揮棒インタフェースを開発した。最後に、指揮者が演奏者の未来に演奏するメロディをインタラクティブかつ直感的に操作可能なグローブインタフェースを開発した。

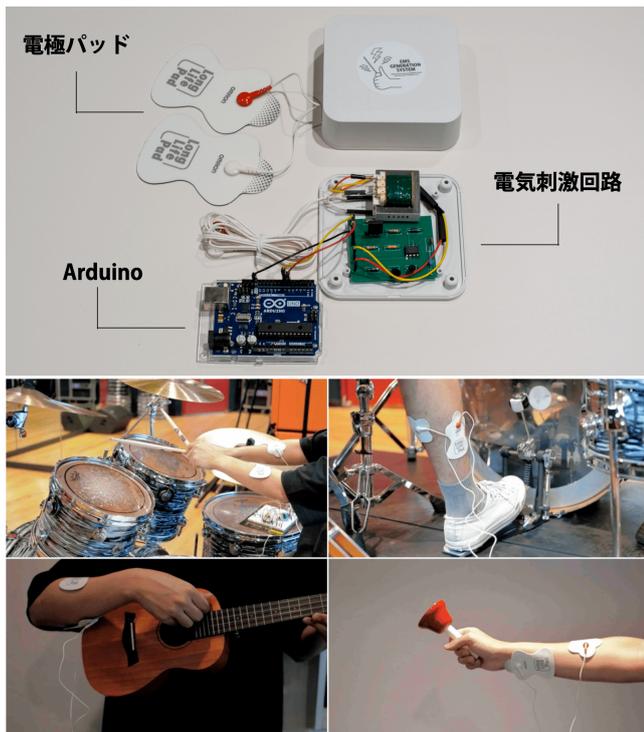


図2 EMS システム
Fig. 2 EMS System

3.1 EMS システム

提案システムの主幹となる演奏者らの身体動作を制御するための方法として、筋電気刺激 Electrical Muscle Stimulation (EMS) を用いて、多人数の手指や足などの身体動作を同期・制御するための装置 (以下、EMS システム) を開発した。本システムは、Arduino、電気刺激回路、電極パッドで構成され、電気刺激を発生させている (図 2)。電極パッドには、市販の低周波治療器に用いられている湿式パッド (OMRON 社製) を採用している。また電気刺激回路には、パルスを発生させるために 555 タイマーを使用し、電圧を上げるために変圧器を用いている。刺激パルスの周波数は 40~70Hz で、パルス幅は 0.8ms である。このパルス電圧はユーザ自身が制御でき、制御したい筋肉の箇所や種類に応じて動的に変更できる。直流安定化電源の電圧を上げることで、電気刺激が強くなり、人体への反応を高めることができる。なお、安全のため自己復帰型ヒューズを電源直後に挿入し、人体に過剰な電流が流れることを防いでいる。

また、複数の EMS 発生器を統合的に制御することで、多人数の身体動作の同期が実現できる。本研究では、従来研究 [5] で開発したシステムの小型化を目的とし、プリント基板設計等のブラッシュアップを進めることで、より小型かつ軽量の EMS システムの設計が実現された。これまでの予備実験から、EMS システム利用者は、自身の意思とは無関係に身体の一部が動き、手首や肘の手首の関節を曲げるといった単純な動作を完全に制御可能であること、背中に電極パッドを装着し微弱な電気刺激を与えることでメト

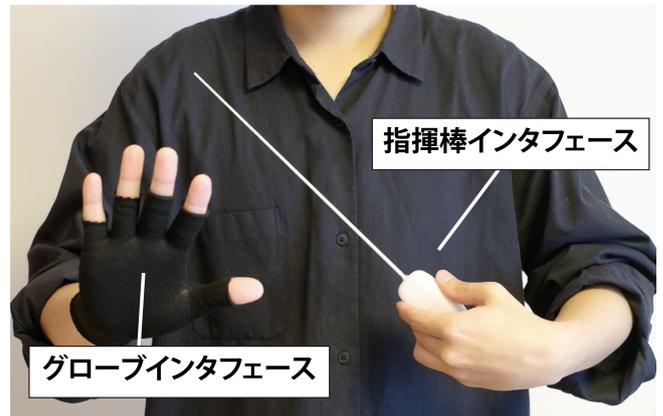


図3 指揮棒インタフェースとグローブインタフェース
Fig. 3 Baton Interface and Glove Interface

ロノームのようにリズムを直接体感できることが確認できている。

3.2 指揮棒インタフェースによるテンポ・ベロシティ操作

指揮者が演奏者の動作パラメータをインタラクティブかつ直感的に操作できる仕組みとして、指揮棒インタフェースを開発した (図 3)。このシステムでは、一般的な指揮者のふるまいに基づいて演奏者のテンポとベロシティを操作することができる。指揮棒インタフェースは、3D プリンタによって生成した指揮棒のグリップ内部に、3 軸加速度センサー M5StickC Plus を搭載したものである。本インタフェースでは、一定のリズムで振りかざした際の腕ふりによる力の変化やふるまいを計測し、1 分間の拍数 (Beats Per Minute: BPM) を算出するものである。本システムでは、指揮法教程 [15] の斎藤メソッドにおける 1 拍子の打法による指揮者のふるまいを対象としている。ここでの動きは、腕を頭上から腹部へ加速しながら落下させる動き、腹部で頭上方向へ急激に跳ね上げる動き、そのまま減速しながら腕を頭上まで持ち上げる動きの 3 ステップが順次行われることで構成される [16]。

本研究では、関連研究 [16] を参照し、3 軸加速度センサーを使ってそれらの動作を検出した。なお、加速度のサンプリング周期は 10msec であり、指揮棒インタフェースの操作による BMP の算出には、閾値を設けて周期をカウントしている。予備実験の結果、本指揮棒インタフェースでは、一般的な楽曲がカバーする 60~160 BPM のテンポ値の計測が可能であることが分かった。また、ベロシティ操作に関して、頭上から腹部へ加速しながら落下する動きと頭上方向への跳ね上げの動きに対して、閾値を設けて 3 段階で識別することで、指揮者の動作の強弱と判定した。この判定は、前節で述べた EMS システムのパルス電圧と対応しており、これによって演奏者の音の強弱を可変できる。

3.3 グローブインタフェースによるメロディ操作

指揮者が、演奏者が次に演奏するメロディを直感的に操作できる仕組みとしてグローブインタフェースを開発した(図3)。ここで、我々は、音楽的な理解に基づいてメロディを横断的に操作するための仕組みとして、Fred Lerdahl と Ray Jackendoff により提案された Generative Theory of Tonal Music (GTTM) [6] による楽曲構造分析を用いる。GTTM とは、人が音楽を聴取する知能の仕組みを形式化したものであり、計算機実装が有望な音楽理論として期待されており、本著者の1人がこれまでその実装に取り組んできた [7], [8]。GTTM の分析によって楽曲構造を階層的に表現するタイムスパン木が得られる。タイムスパン木の各枝は1つの音符に接続され、構造的に重要な音符ほど根に近く接続される。このタイムスパン木の機構を用いることで、既存のメロディ A から一段抽象化されたメロディ B が抽出できる。タイムスパン木に対するこのような操作を簡約と呼ぶ。また、2つのタイムスパン木を重ね合わせて重複した枝のみを残す meet、すべての枝を残す join という操作が定義できる。これにより、2つのメロディの間にあるメロディモーフィングを生成することが可能となった(図4)。

本グローブインタフェースでは、指揮者の腕の高さを変更することで、このメロディモーフィングによってメロディの断片レベルを入力とした未来に演奏するメロディを制御することができる。指揮棒インタフェースと同様に、グローブ内に3軸加速度センサー M5StickC Plus を搭載し、腕の角度を計測することで演奏メロディを操作することができる。腕の角度に関する閾値を設けることで、左手を地面に水平方向に広げた箇所を1、垂直に広げた箇所を8とした8段階による調整が可能となっており、これは、メロディモーフィングの分析結果から得られた原曲を含む8項目のメロディセグメントと対応されている。図5は、指揮棒インタフェースおよびグローブインタフェースによって獲得される指揮者のふるまいを確認可能なグラフィカルユーザインタフェースである。

4. ケーススタディ

提案システムの有効性を検証するため、指揮棒インタフェースとグローブインタフェースの実利用および演奏システムの実利用に関するケーススタディを実施した(図6, 図7)。本ケーススタディでは、指揮者1名、ハンドベル奏者4名、ドラム奏者1名、ダンサー1名による計6名のパフォーマンスを対象とした。演奏曲は、きらきら星変奏曲(12 Variationen über ein französisches Lied "Ah, vous dirai-je, maman")の主題と第1変奏の2曲を入力とし、メロディモーフィングの分析結果から得られた原曲を含む8項目のメロディセグメントを設定した。各奏者の動きを適切に制御するため、約5分間の事前動作テストとキャリブレーション

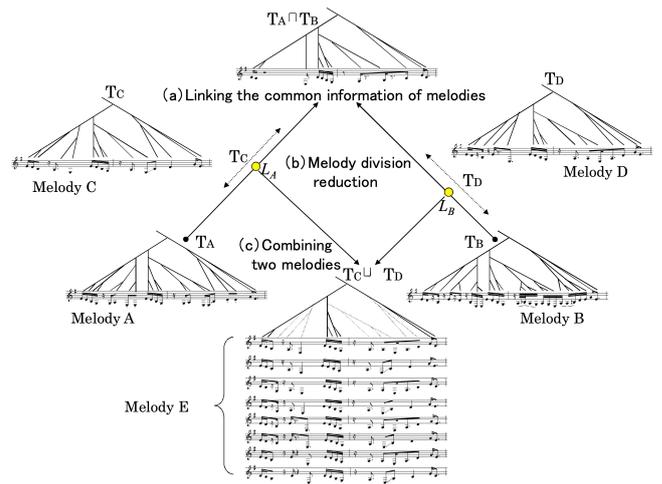


図4 メロディモーフィング手法
 Fig. 4 Melody Morphing Method

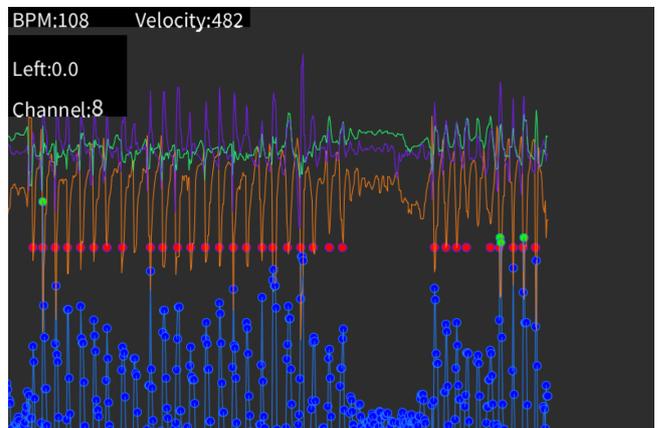


図5 指揮者のふるまいを確認可能な GUI
 Fig. 5 User Interface that can Check Conductor's behavior

ションによって、筋肉の動きを考慮した適切な電極パッドの装着位置を決定した。指揮者への教示および演奏者の電極パッドの装着位置と電気刺激の提示方法は、以下の通りである。

- ・指揮者は、右手に持った指揮棒インタフェースにより動きをとらえ、指揮法に則って演奏のテンポや強弱を操作する。左手のグローブインタフェースでは、その高さによって、楽曲構造分析に基づくメロディモーフィング手法によってメロディの断片レベルを入力としたメロディをする。指揮棒インタフェースの基本的な扱いや振り方について事前に教示を行った。
- ・ハンドベル奏者は、ベルを鳴らす際に手首を振って音を鳴らす必要がある。そのため、手首関節の屈折を機能する長橈骨筋伸筋と短橈骨筋を刺激する箇所に電極パッドを装着した。ハンドベル奏者には、メロディモーフィングから生成された主旋律を情報として与え、完全に動作を制御した状態で演奏可能である。
- ・ドラム奏者には、上腕二頭筋、腕橈骨筋、足関節の底屈

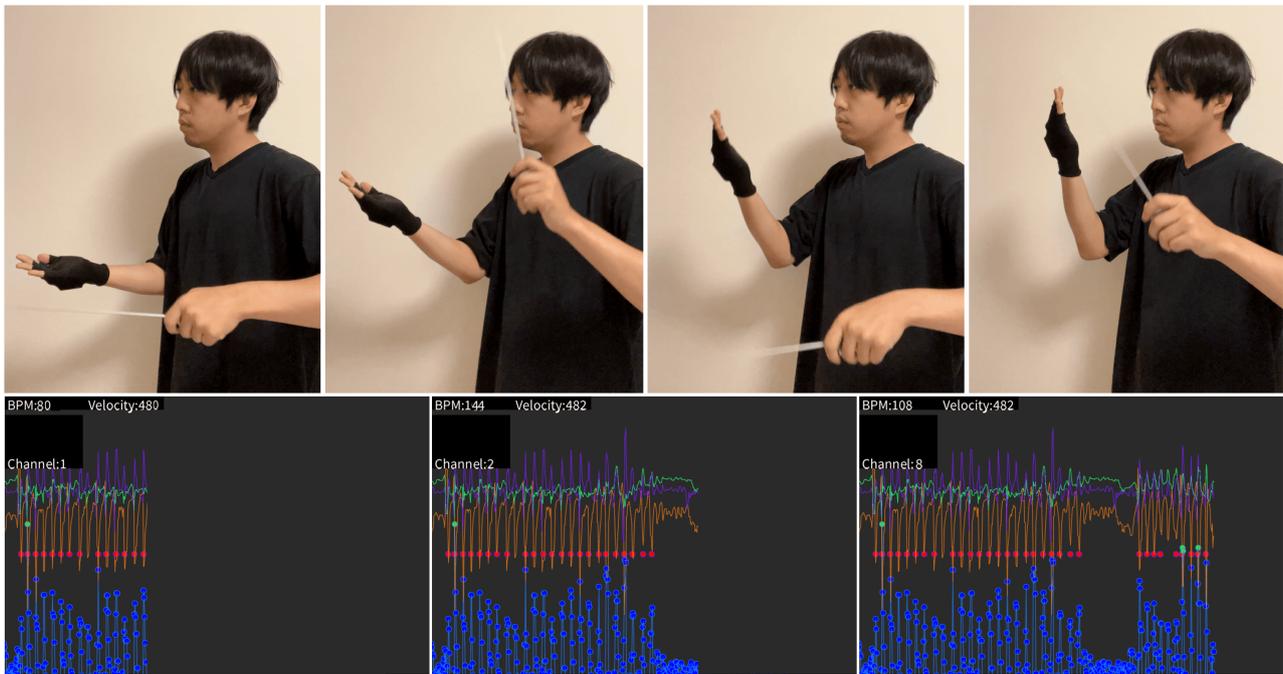


図 6 指揮棒インタフェースとグローブインタフェースの実利用
Fig. 6 Practical Use of Baton Interface and Glove Interface

を制御する腓腹筋を刺激する箇所に電極パッドを装着した。これにより、前腕と手首が動くため、ドラム奏者がスティックでビートを刻むことができる。また、踵を床につけ、足を上に向けた状態で腓腹筋を刺激することで、足のリズムカルな動きが制御できる。ドラム奏者には、演奏曲のテンポ情報を読み取ることで、対応する4ビートを自由自在に演奏可能である。

・ダンサーには、曲のテンポ情報を入力とし、背中に装着した電極パッドから弱い電気刺激を与えた。これにより、メトロノームのようにリズムを感知して、他の奏者とリズムを合わせながら任意のダンスを踊ることができる。

本ケーススタディで得られた結果をもとに、今後はユーザスタディによる評価実験およびワークショップを研究期間内に複数回実施し、そこで起こる事象の観察やモデル化を実施することで、提案システムによる人と音楽との新たな演奏体験のあり方についての有効性を検証する。

5. おわりに

本研究では、アンサンブル自動演奏における指揮者と演奏者とのインタラクションを実現するため、筋電気刺激(EMS)による身体同期を利用した演奏者らの動作パラメータをインタラクティブに操作するための仕組みを提案した。我々は、EMSシステム、指揮棒インタフェース、グローブインタフェースを3つのシステムを設計し、それらを統合的に制御可能なシステムを開発した。

今後は、ユーザスタディによる評価実験およびワークショップを研究期間内に複数回実施し、そこで起こる事象



図 7 システムの実利用
Fig. 7 Performance Using the System

の観察やモデル化を実施することで、提案システムによる人と音楽との新たな演奏体験のあり方についての有効性を検証する。具体的には、演奏者の動作パラメータと音楽表現の関係として、EMSによる身体動作の解析と評価、指揮棒インタフェースによる演奏パラメータの操作効果について検証する。また、演奏指導への応用と教育的側面として、指揮棒インタフェースを活用した演奏指導の効果、演奏者の動作パラメータを理解するための教育的アプローチ、音楽教育への展望と指揮棒インタフェースの可能性

についても検模索していく。さらに得られたフィードバックを元に、ブラッシュアップを重ね、多角的な発展とその応用システムを模索する。加えて、制御する部位やパターンの多様化や動作方法のモデル化を進めるとともに、より高度な演奏表現を実現するため、音長や発音位置での揺らぎといったアーティキュレーションを新たな動作パラメータとして取り入れることを想定している。

謝辞

本研究の一部は、科研費(若手研究 22K17942)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 寺澤洋子, 星-柴玲子, 柴山拓郎, 大村英史, 古川聖, 牧野昭二, 岡ノ谷一夫, 身体機能の統合による音楽情動コミュニケーションモデル, 日本認知科学会論文誌「認知科学」, Vol.21, No.1, pp.112-129 (2013).
- [2] 片寄晴弘, 音楽分野におけるマンマシンインタラクション, システム/制御/情報, pp.328-333 (2001).
- [3] 橋本周司, ジェスチャーによる音楽制御, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.2, pp.204-207, (1996).
- [4] 竹川佳成, 音楽とインタラクション, 映像情報メディア学会誌, Vol.71, No.7, pp.462-465 (2017).
- [5] Hiroya Miura and Masatoshi Hamanaka, A New Interactive Music System by Fusion of Melody Morphing and Body Movements, The ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems Extended Abstracts (CHI '22 Extended Abstracts), ACM, New Orleans, LA, USA, No.206, pp.1-4 (2022).
- [6] Fred Lerdahl and linguist Ray Jackendoff, A Generative Theory of Tonal Music, MIT Press (1983).
- [7] Masatoshi Hamanaka, Keiji Hirata, and Satoshi Tojo, Melody Expectation Method Based on GTTM and TPS, In Proceedings of the 9th International Conference on Music Information Retrieval conference (ISMIR '08), pp.107-112 (2008).
- [8] Masatoshi Hamanaka, Keiji Hirata, and Satoshi Tojo, deepGTTM-III: Multi-task Learning with Grouping and Metrical Structures, In Proceedings of the International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research (CMMR '17), pp.238-251 (2017).
- [9] Pat Metheny, Orchestron - An Excerpt from The Orchestron Project, Retrieved July 28, 2023 from <https://youtu.be/evHVh4bqa0Q> (2013).
- [10] Haruhiro Katayose, Tsutomu Kanamori, Takashi Sakaguchi, Yoichi Nagashima, Kosuke Sato, and Seiji Inokuchi, Virtual Performer, Proceedings of the 2022 International Computer Music Conference, pp.138-145 (1993).
- [11] Mathews, M. V., and D. Barr, The Conductor Program and Mechanical Baton, Stanford University, CCRMA, STAN-M-47 (1988).
- [12] Hans-Christian Jabusch, Hinrich Alpers, Reinhard Kopiez, Henning Vauth, and Eckart Altenmuller, The influence of practice on the development of motor skills in pianists: A longitudinal study in a selected motor task, Human Movement Science, Vol. 28, pp.74-84 (2009).
- [13] H. Morita, S. Hashimoto, and S. Ohteru, A computer music system that follows a human conductor, IEEE Computer, Vol.24, Issue7, pp.44-53 (1991).
- [14] Ayaka Ebisu, Satoshi Hashizume, and Yoichi Ochiai, Building a feedback loop between electrical stimulation and percussion learning, In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2018 Studio (SIGGRAPH '18), ACM, pp.1-2 (2018).
- [15] 齋藤秀雄, 改訂新版 指揮法教程, 音楽之友社 (2010).
- [16] 安田隆, 葉田善章, 3軸加速度センサーを用いた指揮法の独習支援システムの開発, 日本教育工学会論文誌, Vol.46, pp.105-108 (2023).
- [17] Emi Tamaki, Miyaki Takashi, and Jun Rekimoto, Possessed-hand: Techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli, In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '11), ACM, pp.543-552 (2011).
- [18] Jun Nishida and Kenji Suzuki, bioSync: A Paired Wearable Device for Blending Kinesthetic Experience, In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17), ACM, pp.3316-3327 (2017).
- [19] Niels Henze and Kai Kunze, A Dagstuhl Seminar Looks beyond Virtual and Augmented Reality, Journal of IEEE Multi-Media, IEEE, Vol.24, Np.2, pp.14-17 (2017).