脳波による実時間制御可能な音楽演奏インタフェース

REAL-TIME CONTROLLABLE INTERFACE FOR MUSIC PERFORMANCE USING ELECTROENCEPHALOGRAPHY

濵野 峻行 *1*2*3, トマシュ・マチェイ・ルトコフスキ *4, 大村 英史 *1*2, 寺澤 洋子 *4*5, 星-柴 玲子 *1*2*6, 岡ノ谷 一夫 *1*2*6, 古川 聖 *7

Takayuki Hamano*1*2*3, Tomasz Maciej Rutkowski*4, Hidefumi Ohmura*1*2, Hiroko Terasawa*4*5, Reiko Hoshi-Shiba*1*2*6, Kazuo Okanoya*1*2*6, Kiyoshi Furukawa*7

JST, ERATO, 岡ノ谷情動情報プロジェクト *1 , 理化学研究所 *2 , 玉川大学 *3 , 筑波大学 *4 , JST, さきがけ *5 , 東京大学 *6 , 東京藝術大学 *7

JST, ERATO, Okanoya Emotional Information Project*1, RIKEN Brain Science Institute*2, Tamagawa University*3, University of Tsukuba*4, JST, PRESTO*5, The University of Tokyo*6, Tokyo University of the Arts*7

概要 / ABSTRACT

筆者らは、脳波データを用いて実時間での制御が可能な音楽演奏インタフェースを開発した。本インタフェースは、和音を想起する際に出る脳波パターンを実時間解析により弁別し、想起した和音を音響合成により生成する。身体動作を伴わずに、脳内に想起した音楽表象を合成音として直接生成することができることが特徴である。本稿では、演奏可能なインタフェースを実現するためのテクノロジーについて詳述する。

We developed an interface that allows control of music performance using EEG data in real-time. This interface operates real-time analysis to discriminate EEG patterns during imagining musical chords, and generates that the imagined chords by sound synthesis. The novelty of this interface is that a musical imagery in mind is presented directly as a synthesized sound without bodily movements. In this paper, we describe the technology to realize this performable interface.

1. はじめに

筆者らは、脳波データを用いて実時間での制御が可能な音楽演奏インタフェースを開発した。一般にブレインコンピュータインタフェース(BCI)の分野では、異なる事象を想起した際に独自の脳波パターンが生成されると考えられている。本インタフェースは、規定された数種類の和音を想起する際に出る脳波パターンを BCI の

技術を用いて実時間解析により弁別し、想起した和音を 音響合成により生成するものである。

本インタフェースは以下のような経緯により、 開発が 行われた。2011年4月,科学技術振興機構戦略的創造 研究推進事業 ERATO 型研究岡ノ谷情動情報プロジェク ト, 東京芸術大学, 及び筑波大学の共同研究契約に基づ き、「脳波音楽プロジェクト」(通称「BdM プロジェク ト」) が結成された. このプロジェクトは科学者と音楽 家の双方をチームメンバーとして擁し、脳波を用いた仮 想楽器を演奏するパフォーマンスと, それを可能とする テクノロジーの開発研究を行っている. 脳波パターン の分析アルゴリズムに関する研究はルトコフスキが行 い、パフォーマンスに関わるコンセプトデザインや作曲 を古川が行った。そしてそれぞれの技術やアイディアを 一つに結びつけ、脳波による演奏を実現するため、実時 間演奏インタフェースの開発を濵野が行った。こうした 経緯で、一体化した脳波音楽演奏インタフェースとして のプロトタイプがデザインされ、開発が行われる運びと なった.

以上のように、脳波音楽プロジェクトは下記の3つの プロセスにより構成されている.

- 1. 脳波パターンの弁別アルゴリズムの研究
- 2. 演奏を可能にするための実時間データ処理,音響 合成,可視化モジュール,それらを統合するイン タフェースの開発
- 3. 演奏パフォーマンスによるインタフェースの検 証,音楽的探求と実験

本稿で扱うのは、2.の演奏のためのインタフェース開発についてである。

インタフェースの開発にあたっては、実時間での演奏を可能にするという条件を満たすために、克服すべき技術的な問題が幾つかあった。例えば、脳波データ処理と音響・映像合成を同時並行で動作させること、数値解析ソフトウェア MATLAB を実時間で通信可能にすること、軽量化と最適化をすることなどが挙げられる。本稿ではこれらの必須課題について、問題の性質と解決方法について詳述する。

2. インタフェースの概要

本インタフェースは、脳波データにより演奏可能な楽器として機能する。演奏プロセスは、以下のとおりである。

- 1. トレーニング 脳波計を装着した演奏者は、画面の指示に従い特定の数種類の和音を順に想起する. この想起時の脳波データを、逐次記録する. 記録したデータは弁別モジュール(後述)に送信され、Generalized Common Spatial Pattern (GCSP) [1] に変換した上で機械学習が行われる.
- 2. テストトライアル 演奏者は 1. と同様に,画面の指示に従って和音を想起する.このデータもGCSPに変換され,1. で記録した学習データを基に線形判別分析にかけられる.これにより,想起により発生した脳波に対して最も近い和音の想起パターンが求められる.演奏者の想起能力向上をサポートする目的で,フィードバックとして弁別結果が各トライアルごと音響合成によって呈示される.
- 3. 実時間演奏 2. の方法を応用し、脳波データに対して一定の分析時間窓を実時間でスライドさせながら分析、和音を弁別する. また脳波の周波数解析も同時に行われる. これらの情報を基に音響合成を行い、実時間での演奏が可能になる.

以上をまとめると、本インタフェースは機械学習を実装したブレインコンピュータインタフェース(BCI)により脳内に想起された音楽表象を構造化されたデータとして実時間で抽出し、音響合成により演奏を可能にするものである。

今回は演奏時の想起に用いる音楽要素として、和音を 採択した。その理由の一つは、音楽認知、特に音楽の記 憶に関して最も大切な要素の一つはピッチ構造(音の 高さ、相対的なものも含む)であると考えられているか らである。また、様々な他の音楽要素との比較実験も行 い、想起の容易さと機械学習アルゴリズムに適応しやす さの両面から決定された。

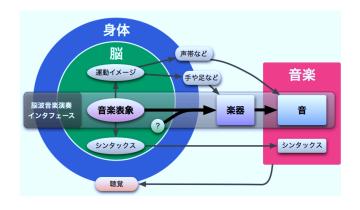


図 1. 身体性から見た従来の音楽演奏と脳波音楽演奏の スキーマの比較

3. インタフェースの特徴

本インタフェースの特徴的新規性は,以下の2点にあると考えられる(図1).

- 1. 脳波による音楽パラメータの意識的な制御が可能 既存の類似する脳波を用いた演奏インタフェースでは、意識的に音楽のパラメータを制御することは困難であった。今回開発したインタフェースでは、音を想起した際のパターンを機械学習により弁別する。これにより、想起した音をそのままの合成音として再現することが可能であり、演奏としての制御が可能になった。
- 2. 身体動作を介さない 従来はいかなる楽器にあっても必ず身体動作を介して音を発生させるため、演奏者は音楽表象を運動イメージに変換する必要があった。例えば歌の場合でも、意図した音を出すために脳内で声帯制御のためのイメージに変換することで発声が可能になる。本インタフェースは身体動作を伴わずに演奏することが可能である。

以上のように本インタフェースは、身体動作を伴うことなく、脳内に想起した音楽表象を合成音として直接生成することができることが特徴である。これは従来の楽器の有り様とは異なるものであり、既存の脳波音楽システムでも両条件を兼ね備えるものは例がない。本インタフェースを用いることで、音楽表象を運動イメージに変換する時に失われるもの、例えば隠れた感情や情動を顕在化することができると考えている。これは我々にとって新しい体験であり、この技法によって音楽の在り方に新しい認識を加えることができると考えられる。

この他に脳波パターン弁別アルゴリズムに関連して幾つかの技術的な新規性があるが,これについては別途執筆する予定である.

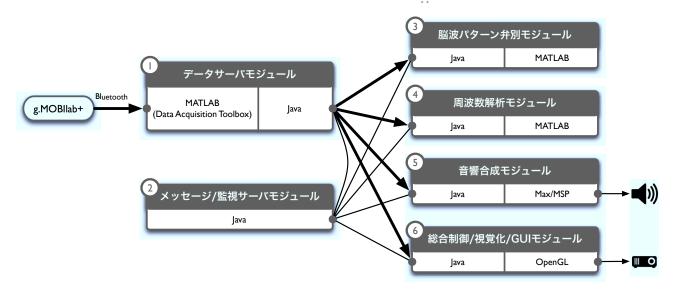


図 2. 本インタフェースにおけるソフトウェアモジュールのダイアグラム

4. インタフェースの構成

4.1. ハードウェア

ハードウェアは、脳波計とラップトップコンピュータ のみのシンプルな構成である。

脳波計は、g.tec(Guger Technologies)社の乾式電極 脳波計 g.SAHARA 及び無線ポータブルアンプリファイ アー g.MOBIlab+ を使用. 電極ボックス及びアンプリ ファイアーはズボンのポケットに収納できるウェアラブ ルなサイズで、演奏者の身体を拘束しない.

コンピュータは、MacBook Air (Intel Core i7 2677M, 1,333MHz DDR3 4.00GB,)を使用. 脳波計とコンピュータ間は、bluetooth バージョン 2.0 (クラス 1) による無線通信が行われる. 基本的な操作はマウスを用いて行うが、パッド式 MIDI コントローラにより演奏モード切り替えなどの操作が可能. オプションとして、外部オーディオインターフェイスを用いる場合もある.

以上のようにハードウェアは簡素なセットであり、 セッティング、脳波計の装着から演奏までの過程はすべ て一人で行えるようになっている.

4.2. ソフトウェア

本インタフェースのソフトウェア構成は、以下の各モジュールにより成り立っている。各モジュールは独立に動作するが、全体として協調的に動作することでひとつの統一プラットフォームであるかのように機能する。括弧内の数字は、図2のダイアグラムの各項目に対応する番号である。

4.2.1. データサーバモジュール (①)

MATLAB 上で動作する g.tec 社(http://www.gtec.at/)の g.MOBIlab+ API for MATLAB 及び Mathworks 社の Data Acquisition Toolbox により、脳波計からデータを取得. 他のモジュールへのブロードキャストを実現するため、MATLAB Java Libraries のインタフェースを介して Java スレッド上に転送. クライアント(=モジュール)からの要求に応じて、データを配信する.

4.2.2. メッセージ/監視サーバモジュール (②) このモジュールは、以下の2つの機能を持つ.

- 1. モジュール間のコミュニケーションの媒介役. 各 モジュールの仮想アドレスを管理し, モジュール 化らの要求を受けて指定されたモジュールにテキ ストメッセージを送信する.
- 2. 他のモジュールを OS プロセスレベルで監視する 機能. モジュールの障害を検知した場合は, 該当 するモジュールを自動的に再起動する.

4.2.3. 脳波パターン弁別モジュール (③)

データサーバから脳波データを受信し、MATLAB上で脳波パターンの弁別、想起した和音を弁別する。弁別結果は⑤のシンセサイザに送信される。このモジュールは、ルトコフスキが担当した。

4.2.4. 周波数解析モジュール (④)

脳波シグナルを MATLAB 上で周波数領域に変換し、 詳細な脳波の状態を分析する。これにより、アルファ波 やベータ波などの周波数帯域ごとの各種成分に分離する ことができる。ここで得られた情報は副次的パラメータとして、③の弁別モジュールと同様に⑤のシンセサイザに送信される。

4.2.5. 音響合成モジュール (⑤)

③及び④のモジュールの結果を受信し、それに基づいて音響合成する。本モジュールは Max/MSP で実装され、以下の下級要素によって構成される。

- アコースティック楽器の録音素材を音源とし、③ で得られた和音のピッチ情報を基にフェーズボ コーダを用いて再合成する。
- また④の周波数解析による各チャンネルの振幅 データを、バンドパスフィルタの周波数にマッピ ングし、付加的に音色に変化を与える。
- 脳波データを加工せずにオーディオシグナルデータとして受信することも可能. 脳波ローデータの受信とオーディオシグナル生成には mxj~オブジェクトを用いた.

4.2.6. 総合制御/視覚化/ GUI モジュール (⑥)

このモジュールは、全体的な演奏の制御と視覚化、及びユーザにより制御なグラフィカルユーザインタフェースの提供、といった複数の機能を持つ。実際の演奏の指示や自動化を行う、重要な働きをするモジュールである。他のモジュールと異なり複数の機能を統合した理由は、オーバーヘッドの削減を重視したためである。

視覚化の描画には OpenGL を用いた。Java2D が J2SE 5.0 以降のバージョンでハードウェア高速化レンダリングに対する OpenGL での描画をサポートしていることを利用し、親和性の高い JOGL の GLJPanel オブジェクトを用いて各描画コンポーネントを制作した。

GUI の設計は、演奏時のユーザビリティを重視し、ユニバーサルデザイン [2] の原則に基づいて行われた(図3). 一般的に GUI のデザインは情報量を統制することで視認性の向上を図るが、演奏時には様々なパラメータにアクセスする必要があるため、あえて隠蔽性を利用しないデザインにし、必要に応じて一部分を拡大できるようにした。基本原理として、スタック型ウィンドウマネージャを採用している。

総合制御/視覚化/GUIモジュールは、以下のコンポーネントにより構成される。

波形表示 脳波データの波形のプレビュー. 各種フィルタ (ローパス, ハイパス, DC オフセット除去) を独立に設定してプレビューすることができる.

トポグラフィック・マッピング 一般的な手法と類似する。チャンネルのラベルを基に電極の2次元行列上の位置を算出,近傍法により行列の各ピクセ

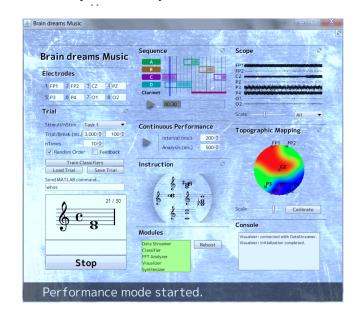


図 3. 総合制御/視覚化/ GUI モジュールの動作時の 画面

ルを分類する. 分類された各ピクセルに脳波シグナルの振幅をアサインし, ガウシアンフィルタにより補完を行う. 各ピクセルの値を HSB の色相としてマッピングし, RGB に変換する.

- トレーニング/トライアル呈示 弁別モジュールが学習 を行うためのトレーニング,及び実験トライアル のための刺激呈示機能.一定の時間間隔で刺激としての楽譜を表示,データサーバには脳波データ の記録を指示する.
- シーケンサー 一般的な DAW のシーケンサーのよう に, 予め用意したシーケンスを表示する. パフォーマンスのための楽曲の構造が表示され, 演奏 時には弁別結果が合わせて表示される.
- 連続演奏 実時間での連続的な脳波分析による演奏を実現する. 脳波データに対して随時一定の時間窓をスライドさせながらの分析を指示する.
- ソフトウェアモジュールの状態表示 監視サーバの情報を表示し、モジュールの再起動などの操作を行うことができる.
- 電極の設定 g.SAHARA 脳波計電極は、電極の位置を 自由に選ぶことが出来るようになっている。電極 位置の変更した際には、各モジュールへの変更の 反映を要求をする。

5. ディスカッション

前章で述べたとおり、本インタフェースは様々なモジュールにより構成されている。これらは全て独立して同時並行で動作させる必要があるが、以下のような工夫

により実現された.

5.1. プロセスのモジュール化とパラレル化

本インタフェースでは図2に示したように、6つのモジュールに分割されている。例えば、マルチスレッド化可能な単一の言語で開発をする場合は、スレッドごとに独立に動作をさせればモジュール化とパラレル化が同時に可能になる場合もある。しかし今回は以下の3つの理由で、独立動作しなければならない機能ごとに分割し、OSプロセスレベルでの分割を行った。

- MATLAB, Max/MSP, OpenGL など複数の環境 が混在しており、更に MATLAB は標準ではマル チスレッド化非対応であること(後述)。
- 一般的なモジュール化のメリットとして、開発における機能間の相互依存性の解消が見込めること、その結果として、開発ミスや動作障害の影響を全体として受けにくくなる。またモジュールごとの障害も監視しやすくなる。
- OS のプロセスレベルで分割することで、CPU の各コア、スレッドに対する自動割り当てが行われ、処理にかかる負荷を分散できる。ただし、Java プログラムはスレッドごとに自動的に分散化が適用される。

前述のとおり、モジュール間のデータやメッセージの通信は、独自に開発したアプリケーションレイヤーのプロトコルを介して行われる。幸い今回は使用したすべてのソフトウェア環境で Java のインタフェースが実装されているため、クライアント処理を行う Java 中間コードをすべてのモジュールで共用した。

またモジュールは監視サーバによって OS プロセスレベルで監視される. コンピュータを用いたライブパフォーマンスではトラブルが憑き物だが, この機能はインタフェースの堅牢性を向上する目的で実装された.

今回の開発では、様々なデバイスにアクセスする必要があったことと、演奏パフォーマンス時におけるシステムの安定性、堅牢性を重視したことを勘案すれば、モジュール化の採用は妥当であったと言える。

5.2. MATLAB のデータ処理, 通信機能の統合

本インタフェースでは、脳波計からの脳波データ取得処理と、脳波パターン弁別処理に MATLAB を用いた. MATLAB は MathWorks 社により開発されているプログラミング言語で、科学技術計算に広く用いられている. MATLAB は大量の行列演算を行うのに適しているので、今回のデータ処理を行う上で得られるメリットは大きい. しかし今回の開発では、MATLAB を実時間処

理に対応させる段階で,以下の問題が発生した.

MATLAB は標準ではマルチスレッド化非対応であり、通信に関わる処理を行うときには問題が生じる。本インタフェースの要件では、各モジュール内の処理と、他モジュールとの通信とを同時に行う必要がある。このため内部処理を行いながら、通信の待ち受けをすることができない。

MATLAB でマルチスレッド処理を行うには、Parallel Computing Toolbox や Simulink を使う方法があるが、今回は MATLAB 外部の可変数のプロセスとの通信を動的に確立する必要があり、要件不十分であった.

そこで最終的には、MATLAB にデフォルトで実装されている MATLAB Java Libraries を使い、メインの処理部分を MATLAB コード上で、通信部分を Java を用いてマルチスレッド化した。MATLAB 側から一方向で Java 内部のメモリーにデータを送信し、必要に応じて MATLAB コードから Java の状態変数を参照する形になっている。

ちなみに今回は使用しなかったが、MATLAB 内 Java プロセスから MATLAB コマンドを実行させるには、matlabcontrol (http://code.google.com/p/matlabcontrol/) などの Java インタフェースを用いる選択肢もある.

5.3. 軽量化と最適化

今回の開発では、設計段階からリソースのアロケーションと開放に細心の注意が払われた。

一例として、音響合成モジュールではフェーズボコーダを用いているが、軽量化のため pfft オブジェクトを利用せず、2つの fft オブジェクトと4つの ifft オブジェクトのみを用いて位相の計算と再合成を行った。このようなパフォーマンスチューニングを行った際には、毎回CPU 時間を計測し、パフォーマンス向上に有効なチューニング方法の見極めを行った。他のモジュールにおいても同様にチューニングを施した。特に視覚化モジュールの場合には、単一のグラフィックに関わるリソースを独占的に使用するため、重点的に行なった。

こうした改善策を積み重ねた結果、先の MacBook Air (Geekbench スコア=5473) 上で動作させたところ、連続演奏時の全プロセスの CPU 使用率(全コア/スレッドの平均)を $25\%\sim35\%$ 程度に抑えることができた。

6. パフォーマンスに関する課題

6.1. 演奏パフォーマンス

プロジェクトの一環として、開発したインタフェース のデモンストレーションとしての演奏パフォーマンスも 行う。開発したインタフェースが、実践的な音楽演奏の コンテクストに即して十分な制御性を持つことのみなら ず、豊かな表現性、延いては芸術性をも発揮しうることを証明しなければならない。そのため既存の楽器と共演(=同時演奏)を行う。これにより、当インタフェースと既存の楽器との調和及び対比構造を明示化し、音楽そのものの有り様を考える契機を与えうるものとなる。

6.2. 科学性と芸術性の融合

前項の演奏パフォーマンスに関連した問題として、科学技術の成果を芸術作品に昇華させることの難しさが挙げられる。今回のパフォーマンスでは、科学的なデモンストレーションの要素と音楽演奏としての2つの側面を含んでいる。その意味で、科学的な透明性と音楽的な面白さを融合させる挑戦であるといえる。

具体的な例を挙げると、音響合成で弁別結果に基づく合成音に対して付加的に音色を変化させることの是非について、議論があった。そのメリットとして音楽的に表現が豊かになり聴衆を楽しませられるということがあるが、デメリットは弁別から音響合成までの過程が複雑になることで聴衆の理解を妨げることになるという不安がある。つまり、公正な制御性を以って演奏が行われているかどうかということに、聴衆が疑念を持つのではないかということである。これを換言すると、科学的な成果を立証して論理的な美として人を感動させることと、音楽的にフィクションとして面白くすることとの両立の難しさだと言える。今回設計を考える上では、演奏者にとっての制御性・汎用性と、聴衆にとっての可聴性・視認性を両立する必要があることも絡み、更に事態を難しくしていたと考えられる。

筆者の意見としては、あるシステムの理想とされる価値は、コンセプトとそれを実現する上での一貫したデザイン、論理性により生まれ、それがユーザに対する誠実さにつながると考えている。それによってシステムは、将来的に他方面に転用できるような拡張性を自ずと持ちうる。この概念を保ちながら今回のような芸術性をシステムに盛り込むには、科学性と芸術性の融合過程を聴衆にクリアに明示することが必要だと考える。

今回の場合は、純粋に機械的振る舞いをする楽器部分と、パフォーマンスの演出効果部分を分離して聴衆に示すことが一つの解決策だと思われる。このように科学性と芸術性の融合過程を明示することで、インタフェースに関わる全ての人が安心してコミットできるプラットフォームを開発することができると考えている。

7. 今後の展望

7.1. 脳波パターン弁別精度の問題

本インタフェースの制御性はまだ十分なものとは言えず, 改善の余地が多いにある。その一つには, 弁別の正

答率に対する各種要因の比較実験が必須となる. 例えば, 音楽要素, 脳の部位, 音楽経験の有無による個人差, 分析のタイミングなど, 要因ごとに検証し, 最適な設定を発見することで正答率向上につながると考えられる.

7.2. 社会性を含む行為としての音楽演奏

将来的には、2人同時に脳波計を用いて演奏をすることも考えている。現在1台で行なっているものが機械とヒトの歩み寄りだとすれば、2台の同時演奏はヒトとヒトとの何らかの相乗効果を期待されるものであろう。音楽が一面において本来コミュニカティブな現象であると考えられる以上、2者間の演奏による一種の共振現象の発生は興味深いところである。

8. まとめ

本プロジェクトでは脳波による実時間制御可能な音楽 演奏インタフェースを開発を手がけており、現時点で第 一段階として基本的なフレームワークの実装が完了した ところである。その結果、実時間演奏する上で一定の動 作安定性を持つインタフェースを開発できたと言える。 本稿では特に、その開発上の課題の中でも実時間演奏を 可能にするための技術的問題について議論した。今後も 更なる改善を行なっていく予定である。

9. 参考文献

- [1] Qibin Zhao, Tomasz M. Rutkowski, Liqing Zhang and Andrzej Cichocki "Generalized optimal spatial filtering using a kernel approach with application to EEG classification", *COGNITIVE NEURODYNAM-ICS* Vol.4 No.4, pp355-358 2010.
- [2] 中川 聰 グラフィックデザイナーのためのユニバー サルデザイン実践テクニック *51* ワークスコーポ レーション, 2011.

10. 著者プロフィール

濵野 峻行 (Takayuki Hamano)

国立音楽大学音楽文化デザイン学科にて作曲,コンピュータ音楽,リアルタイム画像処理を学ぶ。音楽と映像を融合したインタラクティブなダンス・パフォーマンス作品,インスタレーション作品等を制作。国際コンピュータ音楽会議などで作品入選・上演。王立音楽院ソノロジー研究所(オランダ,デン・ハーグ)にて修士課程修了。現在,独立行政法人JST,ERATO 岡ノ谷情動情報プロジェクト技術員,理化学研究所客員技師,及び玉川大学芸術学部非常勤講師。(http://takayukihamano.com/)