

研究報告書

「生命のうごきが聞こえる: 生命動態情報の可聴化による「生き様」の理解」

研究タイプ: 通常型(ライフイベントによる延長)

研究期間: 平成 23 年 10 月～平成 27 年 11 月

研究者: 寺澤 洋子

1. 研究のねらい

人間の聴覚は、時間的に変動する多数の音に対して、選択的に注意を払い、そこに込められた構造的な情報を瞬時に、直観的に理解することに長けている。このような特長を最大限に生かしたデータ可聴化を行い、評価を重ねるプロセスを通じて、「音による情報表現と理解」の方法論を確立し、同時に応用分野を開拓することが、この研究プロジェクトの狙いである。

時間的に変動するデータの代表例として、生体データに着目した。身体からうまれる様々なデータを音に変換し、その動的な時間構造、つまり「うごき」を忠実に反映し、かつ美的評価にも耐えうる可聴音を生み出すことを目標とした。

データ可聴化では、可聴音を通じて構造を理解するのは人間である。可聴音の聴取によって、我々のデータ構造の理解はどれくらい正確にされるのか、情報探索におけるストレスをどれくらい軽減できるのか、可聴音があることでどのような情動が生まれているのか、などの可聴音の認知と知覚に関する評価実験を徹底することも目標とした。

これらの狙いを達成するための指針となるのが、聴覚ゲシュタルト認知 (auditory scene analysis) と音楽情動の研究体系である。音楽心理学の枠組みの中で発展してきたこれらの研究体系を、よりインタラクティブで応用的な事例に適用した。データの構造が聴覚ゲシュタルトに置き換えられ、そのまま音のアンサンブルとして聞こえてくるような可聴音を作るメソッド、自分の動作が生き生きとした音の躍動として感じられ、思わずさらに手足を動かしたくなるようなインタラクティブシステム、そういった事例を開拓しつつ、各事例を音楽心理学の体系から紐解いて、応用的事例に適した形に理論を作り変えていく、そのような研究を行って、理論と現実の間の溝を埋めていくことを目標とした。

2. 研究成果

(1) 概要

「脳波の可聴化」「運動の可聴化のリハビリテーション応用」「心電図の可聴化」「笑顔の可聴化」などの応用的事例に取り組み、その中で、音の構造認知や知覚、情動反応をキーワードに、音楽心理学に立ち帰って議論・検討を行った。脳波の可聴化では、複数チャンネル間の相関の認知、運動の可聴化では視聴覚バイオフィードバックによるパフォーマンスの違い、心電図の可聴化では重要度の高い情報と音による注意喚起の関連付け、笑顔の可聴化では情動的反応、などの評価を行った。

「身体性を統合した音楽情動コミュニケーションのモデル」「データ可聴化の理論化」は、理論研究の取り組みである。インタラクティブシステムにおける情動体験は今後の重要課題であり、その基盤となるような理論を構築したのが前者である。また後者は、データ可聴化におけるゲシュタルト認知、情動反応、注意喚起、などを検討したものである。これまでのデータ可聴化研究では、このような事象があることは広く認識されていたが、評価や理論化はされていなかったため、新規性のある貢献となった。

芸術と科学の学際研究において、その発表の形態は必ずしも論文には限られない。体験をテキストに抽象するのが研究論文の特色であるならば、芸術作品の形態では、体験をそのまま観客に提供できる強みがある。本プロジェクトでは、テーマごとに適した発表形態を探り、論文、コンサート作品、参加型インスタレーション、ワークショップなどの形で、成果発表を行った。この発表形態の幅広さもまた、学術的探索の一部であったと考える。

(2) 詳細

研究テーマ A: 脳波の可聴化

プロジェクト期間を通じて、脳波の可聴化を行った。通常、複数の電極によって測定された脳波は、エネルギー強度の分布と波形パターンの観点から、加算平均や相関、スペクトル解析などによって分析される。本テーマでは、複数チャンネル間での脳波の波形パターン相関、およびエネルギー強度が可聴音の聴取によって理解されるかを検証した。

これまでの脳波の可聴化は、Alvin Lucier、David Roseboomらの音楽作品のような、脳波をそのままに聞くものか、あるいは Thomas Hermannらによって提案されたような、詳細に分析した結果を聞くものが多かった。本研究では、コンピュータ音楽の手法、聴覚心理学の知見を活用し、多チャンネルデータを分析せずに、全体の傾向(共通点、インテンシティ、リズム)を理解できるような可聴化を実現した。これによって、多チャンネル間の相関を直観的に理解でき、また、脳活動の時間変化を体感できるようになった。評価実験を行い、チャンネル間相関係数と聴取実験での「まとまり感」指標の回帰分析を求め(決定係数 0.8 程度)、およびインテンシティの理解度の正答率を測定した(正答率 70%程度)。

脳波の可聴化では図1に示す手法がとられた。脳波の複数チャンネルデータをそのまま複数の可聴音にする。その際、同じようなマッピングを採用するので、類似したデータから作られれば類似した可聴音になり、お互いにマスキングしあい、聴覚上は融合した一つの音となる。また、特異なパターンを見せる脳波データからできた可聴音は、他のチャンネルと異なる可聴音となり、聴覚上は融合せず、浮かび上がって聞こえる。複数の電極間で似たようなパターンが全体的に測定され、相関が高い場合は、それぞれの可聴音が溶け合ってよく「揃った」印象になる。電極間で相関が低い場合は、音がバラバラに鳴り響くため、「揃っていない」印象になる。

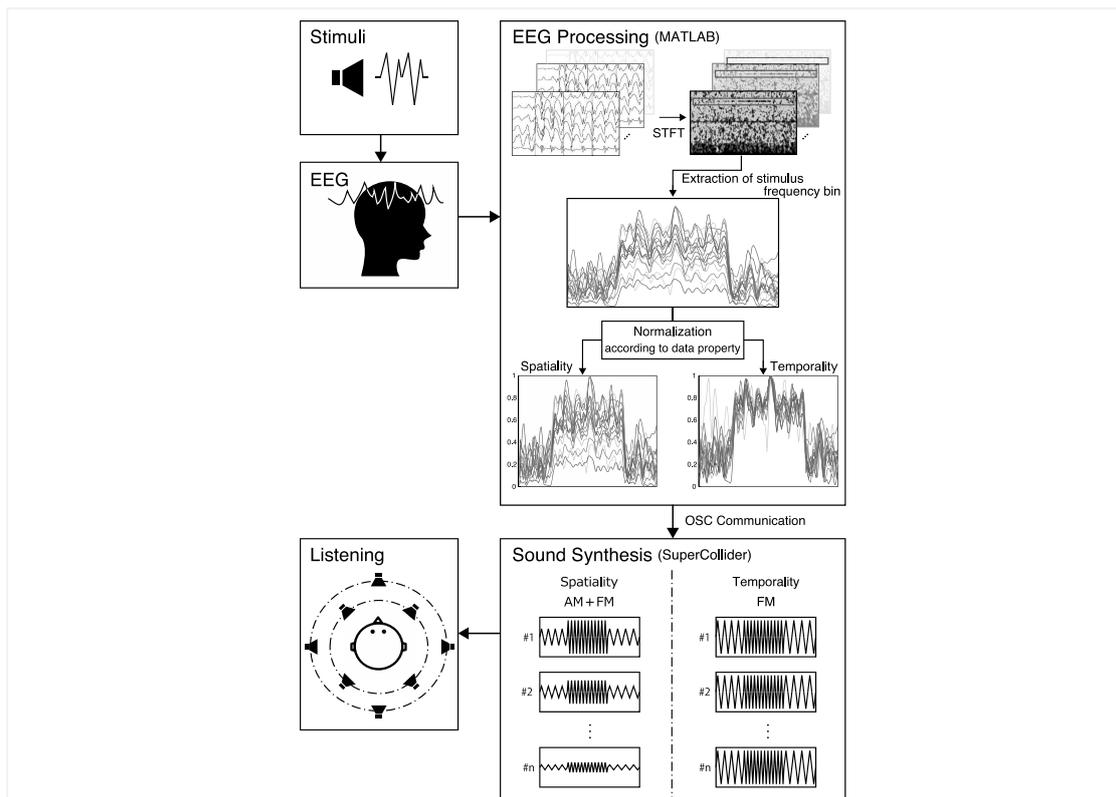


図 1: 脳波の可聴化の流れ

本テーマでは、このような音合成の手法を提案し、また、電極間の相関と「揃った・揃っていない」印象の関係性を検証し、電極間の相関が高いほど可聴音も揃った印象になることを示した。脳波データには、てんかん発作時の脳活動(EOCoG: Electrocorticography で測定)、定常状態誘発反応(EEG: Electroencephalography で測定)を用いた。

研究テーマ B: 運動の可聴化のリハビリテーション応用

本テーマでは、筋活動や足関節運動のリアルタイム可聴化(バイオフィードバック)を行い、運動リハビリテーションへの応用可能性を検討した。視覚を用いたバイオフィードバックに比べて、可聴化を用いたバイオフィードバックでは、姿勢や視線の角度が固定されず、運動範囲の自由度が高くなるため、有用性が見込まれているためである。

従来提案されてきたバイオフィードバックによるリハビリテーションは、視覚によるものが主であるが、視点が固定されるので、運動しにくい。また、視覚障害をもつ人には使えない。そこで、我々は、バイオフィードバックが音で提示されるシステムを作り、評価を行った。提案システムでは、音によるフィードバックのため、姿勢が自由にとれ、視覚障害があっても使用可能である。これらの評価はトラッキングタスク(お手本の動きを真似するタスク)で行った。視覚フィードバックと音フィードバックで同等のパフォーマンス、フィードバックなしと比べると格段によ

いパフォーマンスを達成した。特に視覚障害者からは、「わかりやすい」「使い続けたい」などのポジティブな主観評価が得られた。

グリップングタスクの可聴化では、前腕に取り付けられた電極によって、筋電信号を取得し、可聴音を生成した。可聴音の音量がグリップングの強度を示すマッピングを採用した。比較対象として、グリップングの強度を可視化した条件、フィードバックなしの条件を用意した。視覚障害者の場合は、フィードバックなしと可聴化の条件間で有意にグリップングの精度が上がった。晴眼者の場合は、フィードバックなし、可聴化、可視化の順番でより精度が高くなる傾向が見られたが、有意差は見られなかった。また、フィードバックの好ましさに関する主観評価では、視覚障害者の場合に、聴覚フィードバックを強く好む傾向が見られた。この研究をきっかけに、複数の障害者支援研究を開始し、情報処理学会アクセシビリティ研究会の発足にも関わることになった。

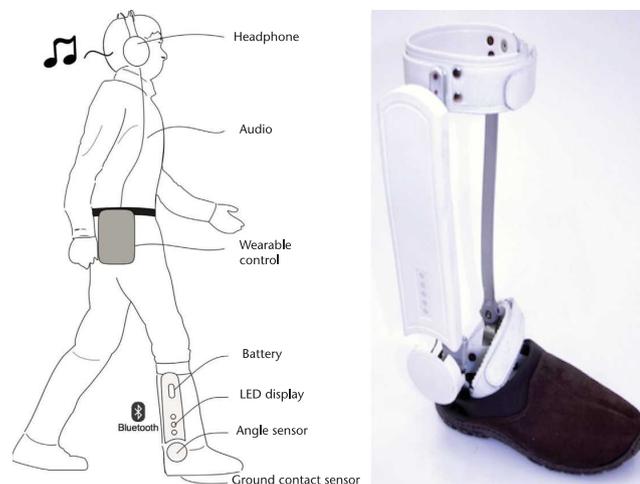


図 2: 足関節運動の可聴化システム

足関節の運動の可聴化では、曲げセンサを装着した足関節装具を使い、足首の角度を可聴化した(図 2)。リハビリテーションにおける基本的な足関節の運動(伸展と屈曲の繰り返し)のトラッキングタスク(お手本の真似をして運動する)を行い、その角度とタイミングの精度を、可視化と可聴化の条件間で比較した。その結果、可視化と可聴化でほぼ同等の精度となり、可聴化によるリハビリテーションの応用可能性が示された。この研究成果は、IEEE multimedia に掲載された。

研究テーマ C: 心電図の可聴化

本テーマでは、心電図の高機能な可聴化の開発を行った。心電図の波形は、PQRST 波に分かれており、従来の心電図可聴化では、メインのピークである QRS 波のみを音に変換しており、QRS の間隔、心拍の間隔しかわからなかった。しかしながら、P 波、T 波には、不整脈診

断に関する重要な情報が多く含まれており、これらの波の状態を把握できるような可聴化が行えれば、術後患者のモニタリングなどに有益である。そこで我々は QRS 間隔の間に隠れている、不整脈診断で重要な情報にフォーカスして可聴化を行った。P 波、T 波の状態が理解できるような高機能な可聴化が達成され、臨床応用を模索している。公式な評価実験はまだ行われていないが、医師とのデモセッションを通じ、様々な症例の聞き分けができることが確認されている。

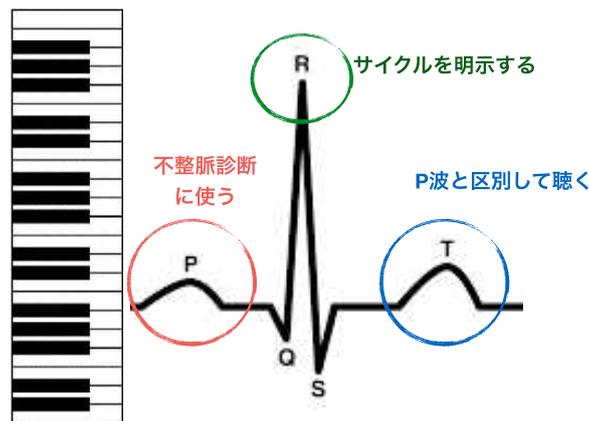


図 3: 心電図可聴化における各部分の役割

可聴化には波形の形を音高の変化に対応させ、メロディックな音の変化によって心電図が表されるピッチマッピングの手法をとった(図 3)。しかしながら、QRS波は非常に変動が大きいため、そのままでは「変動が速く、音量が大きく、音高が高い」可聴音となり、聴取において注意がそこにしか向かなくなってしまう。そこでその反対の特徴をもたせた「変動が遅く、音量が小さく、音高が低い」音を QRS 波の可聴音に割り当て、P 波と T 波の可聴音を際立たせるようにした。また、不整脈診断のためには、P 波の重要度が高いので、P 波の可聴音に高い音高を割り当てて、より注意を向けやすいようにした。

これにより、可聴音によるさまざまな病態の区別が可能になった。特許出願を行い、さらなる研究開発を進めている。

研究テーマ D: 笑顔の可聴化

筋電の可聴化の一展開として、笑顔の可聴化を行った(図 4)。従来システムは、笑顔があると LED が光るものであり、笑顔のオンオフ状態の表示にとどまる。我々の提案では、笑顔を、情動表出を妨げない心地よい音で可聴化し、強い表情はしっかりとした音、淡い表情は柔らかい音というように、表情の変化が音で聞き取れる。様々な顔表情がマルチモーダル表現されることになった。視覚情報の処理が不得手な、視覚障害や知的障害をもつ人々を対象に、応用の可能性があると考えられる。

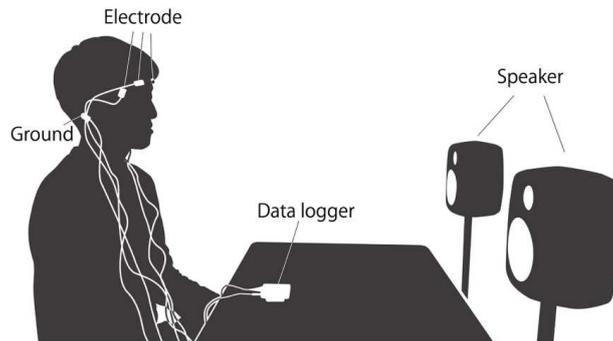


図 4: 笑顔可聴化システムの概要

目のまわりの表情筋(眼輪筋)の活動を筋電図で取得し、サポートベクターマシンで笑顔を判定した。笑顔と判定された時に、筋活動に対応させて泡がはじけるような音をリアルタイム合成し、笑うと泡の音になるシステムを構築した。筋活動が大きければ大きいほど、泡の音の数が大きくなり、音の高さも大きくなる。この研究では、ポジティブな感情の変化を邪魔せず、自然な表情表出を助けるような音デザインを目指した。表情表出の評価実験では、可聴化ありと可聴化なしの条件間で、筋活動の量的な差は見受けられなかったものの、主観評価ではポジティブな評価を得ている。

研究テーマ E: 身体性を統合した音楽情動コミュニケーションのモデル

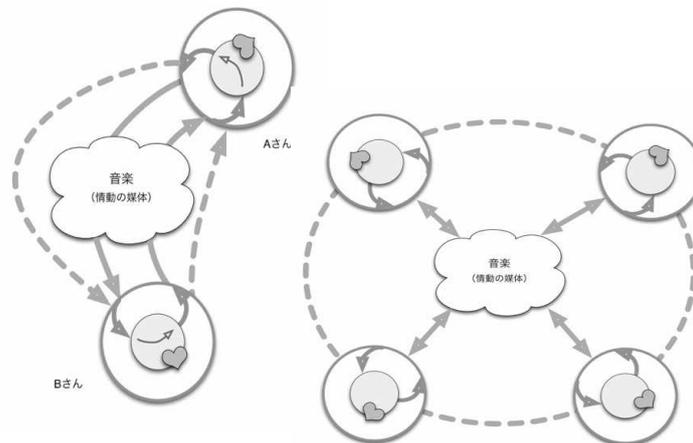


図 5: 音楽情動コミュニケーションのネットワークモデル

可聴化をはじめとする音のインタラクティブシステムでは、情動的な反応が見られることが多い。このような反応の根幹的なモデルとして、音楽情動の共有が挙げられる。本テーマでは、人々が音楽にのせて体をゆらしながら、音楽行動を楽しむようなシチュエーションにおける、音楽情動コミュニケーションのあり方を理論的に考察し、理論モデルの構築を行った。

従来の音楽情動の理論は、受動的・静的な聴取を扱ったものばかりだった、また、他者との情動のやり取りはほとんど考慮されていなかった。我々の提案では、他の人と一緒に、身体動作を伴う状態で、音楽を聞き、演奏するという能動的な音楽行動における音楽情動コミュニケーションの理論を作った。これは、わたしたちの日常の音楽活動に近い「やり取り」を中心にしたモデルであり、インタラクティブシステムなどにも応用可能な理論である(図5)。この成果は「認知科学」誌に掲載され、また、この論文によって日本認知科学会奨励賞を受賞した。

研究テーマF: データ可聴化の理論化

研究テーマ A-E を通じて、音色の知覚、データ構造の認知、視聴覚による情報認知の比較、バイオフィードバック、注意喚起、情動的反応、などの可聴音の認知と知覚に関する検討を行った。従来の可聴化は、大量のデータに関して、「そのまま音にする(けれどよくわからない)」「分析結果として抽出して、音にする」が主流だった。我々の取り組みを通じて、「ゲシュタルト認知」「注意」「情動」などの要因が検討され、データ構造を、聴覚上で認知される構造として再構成するための理論、枠組みが整備・構築されつつある。バラバラの音が「頭のなかで構造を取る」「頭のなかで統合・分析される」を実現した。このような新規的な枠組みは、未知数ではあるが、データ探索に適している、直観的なフレームワークだと考える。同時に、音楽心理学で展開されている「すでに作曲された音楽」の認知知覚に関する知見や、心理実験の手法が再検討され、インタラクティブシステムなどの開発に応用しやすい形に整備されつつある。

これらの取り組みをまとめた講演によって、Japan-America Frontiers of Engineering Symposium で Best speaker award を受賞した。また、データ可聴化の様々な理論的課題を俯瞰する二日間の国際ワークショップを2015年9月に筑波大学で実施した。ワークショップには60名が参加した。これらのトピックを一望できるよう、アブストラクトブックを作成した。

脳波音楽プロジェクト

脳波音楽の作品 “it's almost a song...” の製作プロジェクトに共同研究で参加した。従来の脳波(EEG)で作られる音楽は、脳波をそのまま音にするだけのものが殆どであった。また、ビジュアル面での完成度、インストラクション、ストーリー性も低かった。本プロジェクトでは、寺澤は音色合成、聴覚ゲシュタルト生成などで貢献した。他に、岡ノ谷 ERATO から最新の BMI 技術が提供され、東京芸術大学先端芸術表現学科から映像生成、作曲システム、インタラクティブデザインなどが提供され、没入感が高く、芸術作品として総合的に完成度の高い作品に仕上がった。コンピュータ音楽系のトップカンファレンスのコンサート(審査付き)に採択されたほか、世界各地での著名な会場での上演が行われた。東京芸術大学奏楽堂、ドイツ ZKM、International Conference on Music and Emotion(オーストラリア)、International Conference on New Instruments for Musical Expression(韓国)などのコンサート発表、また International Computer Music Conference(ギリシャ)、六本木アートナイトでのインスタレーション発表が行われた。

3. 今後の展開

さきがけ研究をスタート地点として、それぞれのテーマに適した多方面への展開を行っていく予定である。例えば、脳波の可聴化では、より大人数の参加者を想定した音デザインに取り組み、作品発表につなげたい。また、他のテーマでは、障害者・高齢者支援に適切なものもあり、応用可能性を探っていきたい。心電図の可聴化では、特許出願を行ったので、企業と連携した研究開発を行いたい。可聴化の理論は、現在、複数の論文で様々なトピックがバラバラに検討されている段階であるので、これらを体系的にまとめた論文を出版したい。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

従来のデータ可聴化研究で得られた可聴音は、「分析しなすぎのため、データの存在感があるが、意味がわからない音」「分析しすぎて、意味はわかるがデータの全体像や詳細が失われた味気ない音」の両極端であった。音による情報理解のメカニズムが不明、あるいは評価や理論がない研究も多かった。そのような中、本プロジェクトでは、基礎研究「音の作り方、音の認知のされ方の理論」と応用研究「音をつけて評価する」を同時に推進し、「どうしてこのように聞こえるのか」「どうしたら聞こえるようにできるのか」を明らかにしつつ、情報の構造が、聴取によって理解が促されるような例を作ることができた。また、生体データに絞ったことで、応用可能性が逆に広がっていった。

基礎研究「音の作り方と認知の理論」では、聴覚心理学や音楽情動などをベースにした理論と、音合成の方法論ができつつある。応用研究「音をつけて評価する」では、音をつけることによるメリット(障害者支援、認知、情動)の評価(客観、主観)が行えた。これらにより、「意味がわかり、データの様子が手に取るように伝わる音」を達成し、また、可聴音の聴取による情報理解について、機序とエビデンスを明確にするアプローチを定着させた。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

本研究は、生命動態情報の可聴化により、視覚に頼りがちな生命動態の観察に新たなメディアをもたらそうとするものである。申請当初は、線虫の動きを可聴化する小規模な実験を行っていたが、さきがけの期間中に、脳波、運動、心電図、笑顔などに可聴化の対象が広がった。工学的にも、脳波や心電図の可聴化は、視覚による観察を補佐するレベルに達している。一方で、データ可聴化の研究は、それ自体、理論的に体系化されている段階ではない。そこで、音楽心理学を含め、音の構造認知や知覚、情動反応に関わる基礎研究を英文論文にまとめ、国際会議でBest Speaker Awardを受賞している。こうした基礎研究は、聴覚を通じて音データを再構成する認知過程の解明に資するものである。また、理論的課題を俯瞰する国際ワークショップを開催し、学術コミュニティの形成に寄与したことも高く評価できる。

本研究は、その成果として優れた作品をも生み出している。実際に脳波音楽の作品製作

プロジェクトに参画し、音色合成、聴覚ゲシュタルト生成などで貢献した。この作品は音楽と映像を融合した芸術性が評価され、コンピュータ音楽の国際会議に採択されると共に、世界各地での著名な会場で上演されている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Hiroko Terasawa, Jonathan Berger, and Shoji Makino. "In Search of a Perceptual Metric for Timbre: Dissimilarity Judgments among Synthetic Sounds with MFCC-derived Spectral Envelopes" Journal of Audio Engineering Society, vol. 60, No. 9, pp. 674-685. (2012)
2. 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" 認知科学, Vol.20, No.1, p.112-129. (2013)
3. Takayuki Hamano, Tomasz Rutkowski, Hiroko Terasawa, Kazuo Okanoya, and Kiyoshi Furukawa: "Generating an Integrated Musical Expression with a Brain-Computer Interface" Proceedings of International Conference on New Interface for Musical Expression (NIME2013), pp. 49-54. Daejeon, Korea. (2013)
4. Hiroko Terasawa, Josef Parvizi, and Chris Chafe: "Sonifying ECoG Seizure Data with Overtone Mapping: a Strategy for Creating Auditory Gestalt from Correlated Multichannel Data." Proceedings of the International Conference on Auditory Display 2012 (ICAD2012), pp. 129-134. Georgia, USA. (2012)
5. Hiroko Terasawa, Yota Morimoto, Masaki Matsubara, Akira Sato, Makoto Ohara, Masatoshi Kawarasaki: "Guiding auditory attention toward the subtle components in electrocardiography sonification" Proceedings of International Conference on Auditory Display 2015 (ICAD2015), pp. 231-235, Graz, Austria. (2015)

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 1 件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

論文誌

1. Masaki Matsubara, Takahiro Oba, Hideki Kadone, Hiroko Terasawa, Kenji Suzuki, and Masaki Iguchi: "Wearable Auditory Biofeedback Device for Blind and Sighted Individuals" IEEE Multimedia Magazine, Issue No.01 - Jan.-Mar. (2015 vol.22), pp. 68-73.

国際会議

1. Yuki Nakayama, Yuji Takano, Masaki Matsubara, Kenji Suzuki, Hiroko Terasawa: "Real-time smile sonification using surface EMG signal and the evaluation of its usability" Proceedings of International Conference on Auditory Display 2015 (ICAD2015), pp. 152-156, Graz, Austria.

(2015)

2. Takayuki Hamano, Hidefumi Ohmura, Ryu Nakagawa, Hiroko Terasawa, Reiko Hoshi-Shiba, Kazuo Okanoya, Kiyoshi Furukawa: "Creating a Place as a Medium for Musical Communication Using Multiple Electroencephalography" Proceedings of the 40th International Computer Music Conference, pp.637-642, Athens, Greece. (2014)
3. Teruaki Kaniwa, Hiroko Terasawa, Masaki Matsubara, Tomasz Rutkowski, Shoji Makino: "Electroencephalogram Steady State Response Sonification Focused on the Spatial and Temporal Properties" Proceedings of International Conference on Auditory Display 2014, pp. 1-7, New York, USA. (2014)
4. Masaki Matsubara, Hideki Kadone, Masaki Iguchi, Hiroko Terasawa, and Kenji Suzuki: "The Effectiveness of Auditory Biofeedback on a Tracking Task for Ankle Joint Movements in Rehabilitation" Proceedings of iSon 2013, pp. 81-86. Erlangen, Germany. (2013)
5. Masaki Iguchi, Masaki Matsubara, Hideki Kadone, Hiroko Terasawa, Kenji Suzuki: "How is auditory EMG biofeedback effective for blind people?" Proceedings of International Conference on Auditory Display 2013 (ICAD2013), pp. 307-310. (2013)
6. Teruaki Kaniwa, Hiroko Terasawa, Masaki Matsubara, Tomasz M. Rutkowski, and Shoji Makino: "EEG Steady-State Synchrony Patterns Sonification." Proceedings of APSIPA Annual Summit and Conference, OS.6-BioSPS.1.5, pp. 1-6. California, USA. (2012)
7. Masaki Matsubara, Hiroko Terasawa, Hideki Kadone, Kenji Suzuki, Shoji Makino: "Sonification of muscular activity in human movements using the temporal patterns in EMG." Proceedings of APSIPA Annual Summit and Conference, OS.6-BioSPS.1.2, pp. 1-5. California, USA. (2012)

受賞

1. 日本認知科学会奨励賞 (2014/09/16)
2. Best Speaker Award, Japan-America Frontier of Engineering Symposium (2014/06/11)

招待講演

1. Hiroko Terasawa: "Augmenting Signals against Noises: Understanding Human Body with Data Sonification" Japan-America Frontiers of Engineering Symposium. Tokyo, Japan. (2014.06)
2. 寺澤洋子: "生命のうごきを聴く:データ可聴化と音響合成のフロンティア" 日本ソフトウェア科学会 Future Technology Design (2014.09)
3. 寺澤洋子: "音楽情動コミュニケーションのメカニズム" 認知科学会芸術と情動分科会 (2013.07)
4. 寺澤洋子: "データ可聴化における情報の提示と理解" 日本音響学会春季研究発表会 (2013.03)
5. Hiroko Terasawa: "Toward an effective use of timbre in data sonification" Acoustics 2012 Hong Kong. J. Acoustical Society of America, Vol. 131, Issue 4, p. 3433. (2012)
6. 寺澤洋子: "データ可聴化による情報の表現と理解" ヒューマンインタフェース学会コミュニケーション支援専門研究委員会第7回研究談話会 (2012.03)

作品発表

“It’s almost a song...” a project by Kiyoshi Furukawa, Takayuki Hamano, Hidefumi Ohmura, Ryu Nakagawa, Reiko Hoshi-Shiba, Hiroko Terasawa, Tomasz Rutkowski.

- International Conference on Music and Emotion (Australia, 2011)
- 東京藝術大学 芸術大学交流演奏会（東京, 2012）
- International Conference on New Instruments for Musical Expression (Korea, 2013)
- International Computer Music Conference (Greece, 2014)
- 六本木アートナイト（東京, 2015）

ワークショップ開催

- International Workshop on Time Series Data Sonification (in conjunction with Tsukuba Global Science Week), 29–30 September, 2015. つくば国際会議場
<http://slis.tsukuba.ac.jp/lspc/events/TSDS2015.html>