

研究報告

インタラクティブな可聴化システムの検討のための
動作分析への可聴化の応用における現状の考察

**A SURVEY OF APPLYING MOTION ANALYSIS INTO SONIFICATION
TOWARDS INTERACTIVE SONIFICATION**

高野 衛, 安藤大地, 笠原信一

Mamoru Takano, Daichi Ando, Shinnich Kasahara

首都大学東京

Tokyo Metropolitan University

概要

ある運動技能を体得する過程において、動作の修正や正誤の判断などの試行錯誤を繰り返し行う必要がある。身体感覚のみでは判断が難しい動作情報を理解する場合、それらを五感で知覚可能な状態でフィードバックすることが有効である。動作情報を音響情報に変換しフィードバックすることにより、動作の正誤の判断が円滑に行える。可聴化はデータが持つ特性や関連性の理解を助ける知覚化手法である。可聴化は時系列特性を持ったデータに有効であり、リアルタイムによる情報の提示やインタラクティブなデータ構造の分析を可能にする。動作分析に可聴化を応用することでリアルタイムでの情報のフィードバックが可能になり、身体感覚のみでは知覚が困難な情報の理解や分析が行える。ここではセンシングや画像情報による身体情報の取得やインタラクティブなシステムを用いた可聴化研究を調査し、その有効性や現状の課題を考察していく。さらに、可聴化の持つ特性を考慮した、ユーザーとのインタラクティブなやり取りが可能な身体情報の可聴化システムを検討する。

1. 可聴化研究の現状

データの構造を円滑に理解するための手法として、データを五感で知覚可能な情報に変換する知覚化手法がある。非言語音を用いた知覚化手法である可聴化は「ソニフィケーション」と呼ばれ、入力されたデータを音響情報に変換することによって不可視だった特性や関連性を探索するために用いられている。可聴化が用いられる分野は「アラーム」「動向分析」「医療」「芸術作品」などであり、現段階では様々なデータを聴覚情報として認識を可能にするための可聴化手法の研究が行われている [1]。

可聴化を用いることによる有効性としては、ユーザーの注視を必要とせずリアルタイムでの情報の提示ができることや、聴覚の時間分解能が高いことから並列的に複数のデータの特徴や時系列構造を聴取することが可能になるという点が挙げられる。

1.1. 可聴化を用いた動作分析の有効性

人間は日常的に聴覚フィードバックによる動作情報の判断をしている。ある運動技能を体得する過程において実行された動作情報と感覚フィードバックの循環的な制御を繰り返すことで動作の正誤を理解し動作を修正していく。しかし、未経験の運動においては身体感覚のみでは知覚が困難な動作情報が含まれているため、修正箇所や正しい動作の判断ができず練習回数が増えてしまう。身体情報は表層部分から得られる「皮膚感覚」と筋肉や関節などから得られる「深部感覚」に大きく2つに分類される。深部感覚は体の位置や姿勢に関する情報や、協調運動に関する情報に関連があるが、深部感覚は意識化では認識することが困難なものが大半である。そこで動作情報を可聴化しフィードバックすることにより動作の修正箇所や正しい動作を理解を支援し、運動技能の体得やパフォーマンスの向上が可能となる。身体制御に可聴化を用いた研究では、聴覚フィードバックによる効果の持続とパフォーマンスの向上を示す事例が幾つか見られる。

Ronsse らの感覚フィードバック研究において、視覚フィードバックと聴覚フィードバックによる動作への影響が検証されている [2]。訓練から1日間を経た後のフィードバック無しでの実験では、視覚フィードバックを用いたグループの動作はフィードバック情報に依存していることが示された。一方で、聴覚フィードバックを用いたグループはフィードバック情報の影

響の持続が見られた。聴覚フィードバックを用いることによって、長期的な学習効果の持続が確認されている。長谷川らは姿勢バランスの視覚フィードバックと聴覚フィードバックによる制御を行っている [3]。彼らは Heuer らの断続的フィードバックの有効性を示した研究を背景として、感覚フィードバックの姿勢バランスへの応用を行った [4]。この研究では視覚フィードバックは効果の持続は見られなかった。一方で、聴覚フィードバックでは直後のパフォーマンスの向上とともに 1 日後の実験での効果の持続が示されている。

以上のような研究から身体情報の可聴化を用いることによって、運動学習の支援やパフォーマンスの向上などの効果が示されている。運動学習における聴覚フィードバックの有効性を示す研究が行われている一方で、様々なデバイスやソフトウェアを用いた効果的なデータの変換や動作分析の検討を目的とした可聴化手法の研究が行われている。以下では運動学習に有効と思われる研究に焦点を当て、可聴化を用いたユーザーとのインタラクティブなデータ探索における可聴化とセンサーデバイスを用いた可聴化研究の調査を行い、その手法や有効性の考察を行う。

2. 可聴化を用いた動作分析の現状

現在の可聴化研究はある情報に対してどのような提示手法が効果的かを検証し、有効な手法を探求する段階にある。主な可聴化の手法としては、データの値を音響情報に変換する「Audification」や、複数のデータの値や変数をいくつかの音響特性情報にマッピングする「Parameter Mapping Sonification」がある。これらはデータと音響に関するマッピングや変換方法が固定化されている手法である。

一方で動的にデータと音響の関係を制御する「Model-Based Sonification(以下 MBS)」という手法がある。これはデータの値や変数によってシステムが音響情報との関連付けを動的に設定し、ユーザーの操作によってデータの特性や構造を音響情報によって返す手法である。システムとユーザーの双方向的なやり取りを通じてた可聴化手法であり、静的または動的データの特性を探索する目的や、ユーザーからの入力をデータをして用いて音響情報をフィードバックする目的で用いられる。Hermann の著書 *Sonification Handbook* において MBS の定義や応用例が示されている [5]。ユーザーが入力情報と音響情報の関連性を円滑に理解するためには、MBS のような動的な探索型の可聴化が有効である。以下ではインタラクティブなシステムを用いた可聴化研究の事例を調査し、手法や有効性を考察していく。

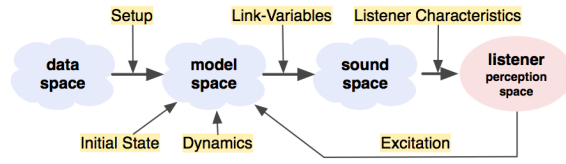


図 1. Model-Based-Sonification の構造 [5]

2.1. インタラクションを用いた可聴化手法

MBS のような探索型の可聴化を行う際には、ユーザーとの対話形式をとるためパラメーターや変換手法を操作するインターフェースが用いられる。パラメータの調整やマッピングの変更などをインターフェースを通じて行うことで、データの特性や関連性を多角的に分析することが可能となる。動作分析において教師データや自身のデータを記録し、それらの比較を行うことで動作情報の差異や改善点の考察が行える。可聴化を動作分析に応用する場合、ユーザーによる動作情報と音響情報の調節や教師データとのリアルタイムでの比較や検討が有効である。ここではインタラクティブなシステムの活用と教師データや記録データによる動作比較を行っている研究事例を考察する。

カリフォルニア大学の Smith らの研究では携帯端末を用いた音響情報の制御を行い、教師データとのリアルタイムでの動作比較のためのシステムを制作した [6]。このシステムではユーザーの動作はカメラでキャプチャーされ、音による動作のフィードバックが行われる。ここでは TouchOsc を用いた音響情報の設定が可能となっており、ユーザーの判断によって音源の変更やパラメータの調整が行うことができる。さらにこのシステムでは 3次元のモーションパス情報を用いて、ユーザーの動作情報と教師データとの空間的および時間的な差異の比較が行われている。この研究では、ユーザーの動きを教師データと一致させるために音響情報へのマッピング手法の検討をしを行い、最終的には教師データのモーションパス情報に沿った動きを基準音として可聴化するシステムとなっている。

ノルウェーの Jensenius らの研究では映像情報を変換した音響情報の調整を Max6 を用いて行っている [7]。Jensenius らの制作したシステム「Sonomotigram」では映像のフレーム差分から得られた画像を逆 FFT 変換し動作の可聴化を行っている。この手法では、差分から得られた画像と、音を可視化したスペクトログラムとの類似性に基づいて、動作情報の可聴化手法を検討している。Max6 を用いた映像処理と可聴化が行われており、動作の検出を行いながらリアルタイムで出力される画像のパラメータを調整することが可能になっている。このシステムでは動作情報をスペクトログラ

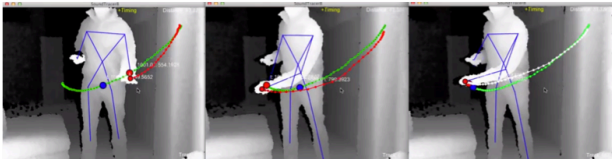
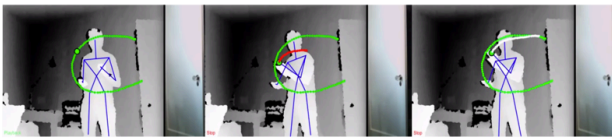


図 2. 教師のパス情報とカメラによる動作情報の取得を用いた可聴化システム [6]



図 3. 映像のフレーム差分からスペクトログラムを生成を行う可聴化 [7]

ムとして保存することで、再生位置や速度などの変更から複数の時間軸上での動作の考察が可能である。

ドイツの Hermann らの研究では、腕と足の動きを伴うスポーツの動作についての可聴化を行っている [8]。この研究ではランニングやエアロビクスなどの身体の各部位が関連して行う協調運動を関節計を用いて測定を行っている。さらにこの研究ではユーザーによる動作の確認が可能なインターフェースを導入している。これによって教師データや自身の動作の時間的な推移や音との結び付きを映像とともに確認が可能となっている。ユーザーによるパラメータの調整においては有効なインターフェースである。システムのインターフェースと可聴化には SuperCollider を用いた設計が行われている。Jensenius らのシステムと同様に教師データや保存されたデータの再生速度や音響情報を変更することが可能となっている。



図 4. SuperCollider によるインターフェースを用いた動作情報の可聴化 [8]

2.2. インタラクション手法の考察

以上のようにインターフェースやソフトウェアを用いたユーザーとシステムの双方向的なやり取りを通じ、動的な音響情報の設定や教師データとの比較など可聴化手法の検討が行われている。動作分析の可聴化においてインタラクティブな手法を取り入れることで、操作を通じて動作情報と音響情報の関連性について認識がしやすくなる。複数の情報をどのように聴取するかをユーザーが選択することで、分析範囲を調整しデータを扱うことが可能となる。

2.3. データトラッキングを用いた動作情報の可聴化手法

ここでは可聴化を用いた身体情報の分析手法を調査し、センサーデバイスのデータと音響の関連付けや有効性を考察していく。

NTT の 柏野 らによる研究ではウェアラブル・センサーを用いた身体情報の測定を行い、加速度や筋電位

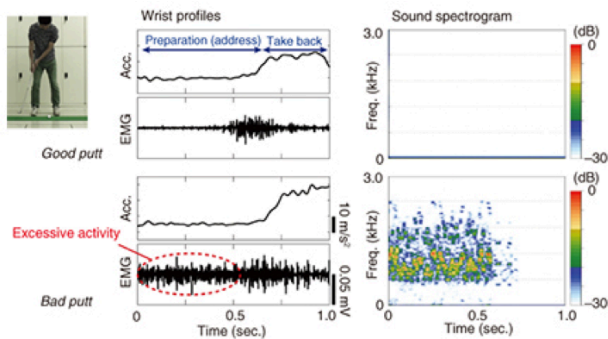


図 5. 筋電センサーを用いた力みの可聴化 [9]

を用いた可聴化による動作分析を行っている [9]。この研究では筋電位を用いたピッチングやスイングの可聴化が行われている。プロの投球では筋活動の明確な動的な繋がりがあり、アマチュアには明確な繋がりが感じられない。プロのピッチングでは筋電位の下部から上部へと滑らかな推移が見られたため、リズム感を強調するために和音による楽器的な可聴化が行われている。さらに精神的圧力によって生じる過度な筋活動の可聴化を行っている。静止状態時の筋電位 (EMG) によって動作前の無駄な力みを検知し、過度の筋活動の可聴化によって警告的なノイズ音を提示している。

オーストリアの Vogt らの研究ではモーションキャプチャーを用いた身体情報の可聴化を行っている [10]。この研究では理学療法やあらゆる動作の訓練などを対象としている。提示する音響はユーザーの選択を反映したものや、可動域からの逸脱や意図しない動作を気付かせる隠喩的な音、さらに音楽や音声などが用いられている。この研究では被験者が知覚する音を被験者自身で選択を行うシステムを採用している。ユーザー毎に知覚する音情報には差異があるため、自身の身体と提示される音響情報をマッチングする必要があるためである。Vogt らのシステムでは触覚情報を喚起するような環境音などを選択することが可能になっており、可聴化を仮想現実的な用途で用いている。システムの試験は整形外科のリハビリへの用途を目的とし、腕の側面の動きや内転運動における可聴化システムを用いた幾つかの訓練を実施し有効性を示している。

2.4. データトラッキング手法の考察

センサーデバイスを用いた可聴化の多くは、システムとユーザー間でのやり取りがループした状態で行われている。外部のコンピュータを用いずにセンサーデバイスと音響出力装置のみで行われている研究もある [11]。このようなセンサーデバイスを用いたフィードバック手法では瞬間的な情報の理解が可能となり、不適切な動作の検知や改善などが迅速に行うことができる。

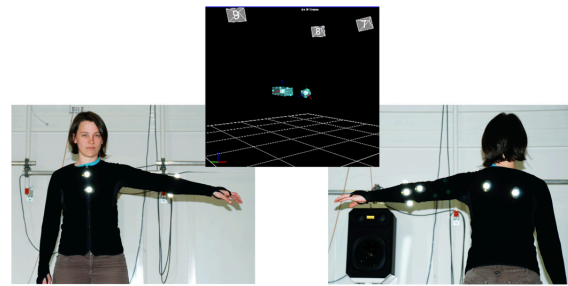


図 6. モーションキャプチャーを用いた可聴化による動作分析 [10]

3. 可聴化研究の課題点

現在までに行われている可聴化研究にはある課題が見られる。それは可聴化システムの汎用性がないことである。可聴化を用いたデータ分析や研究では、対象をひとつに限定しているため、その他の対象には応用が効かないシステムを開発していることが多い。可聴化研究ではある対象における未知情報が存在していることを前提として、具体的な未知情報の取得を目的としたシステムが作ることが一般的である。出力される情報が毎回異なるとその手法の信頼性が低くなってしまふ。そのような結果を防ぐために入力から出力までのシステムが固定化された手法の開発が行われているが、他の対象に応用する際には一から設計をする必要がある。

システムの固定化の原因はデータを音へ変換する際の音源やマッピングの選択が恣意的に行われていることにある。可聴化の変換方法はいくつか考えられるが、限定的な変換しか行われなため汎用性の無いシステムになってしまう。この点に関しては MBS のような動的にデータと音響情報の関連付けを行う手法を用いることで改善されると思われる。動作分析に可聴化を応用し身体情報の理解や運動学習の支援を目的とした場合、入出力のシステムが固定化された手法では対象の運動技能によっては有効とは限らないことが生じる可能性がある。動的にユーザーが入出力の値を調整するシステムを用いることで、運動技能におけるユーザーの動作の修正箇所や正誤情報について探索することが可能になり運動学習の向上に繋がるとと思われる。

以上のような課題点から考えられることは、再利用可能な可聴化システムの必要性である。さらに、あまり広範囲に応用が可能なシステムでは未知の情報の発見は得づらいと思われる。これらの先行研究から見られた可聴化の課題点や有効性を踏まえ、以下では可聴化の動的なシステムについての検討を行う。

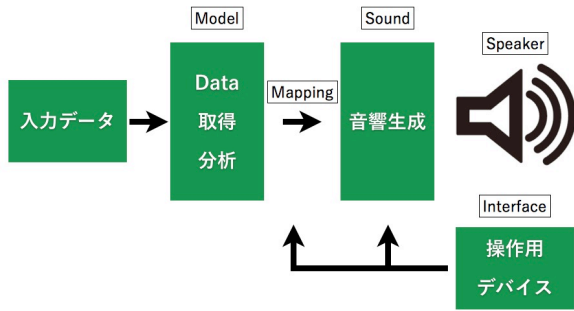


図 7. インターフェースを用いた可聴化システムの全体像

4. 動作分析における可聴化システムの考案

前述の研究における可聴化の有効性や課題点を踏まえ、ここでは動作分析における可聴化システムの検討を行う。身体情報の可聴化を行う場合に、3.1 で示した NTT 柏野らが行った教師データとの比較や 2.3 で示した Hermann らが行ったインターフェースを用いたパラメータのコントロールが有効である。ユーザー毎の身体情報の差異や、対象動作の違いによって取得データの数や形式が異なってくる場合がある。そこでデータ解析やマッピング、音響処理などの個々のシステムが異なるデータに柔軟に対処が可能なシステムが求められる。可聴化研究では固定化された音響処理による実験が多く、他の分野におけるシステムの再利用が可能が困難である。

ユーザーによる値の調整やマッピングの判定などをインターフェースを通して行うことによって、柔軟な身体情報における可聴化のシステムの開発を検討する。

4.1. 音源の自動生成システム

音響に関しては入力データの数に応じて音源を自動的に生成しマッピングを行い、ユーザーの判断による音響情報の調整が可能なシステムを検討する。生成する音に関しては対象とする動作に柔軟に対応するために、複数の音源を用意しユーザーや分析者によって適宜選択を行えるようにする。OSC では倍音を含まない「純音」や倍音を「整数倍音」と「非正数倍音」などを生成することが考えられる。さらに、オーディオファイルを音源として用いることも考えられる。1.1 の Heuer らの研究から提示される音響情報は断続的なフィードバックが有効なため、動きの大きさや加速度に応じて音量や再生をコントロールする手法を検討する。複数の身体部位の情報を個別に判断するために、個々の音響情報に何らかの差異を設定する必要がある。ここでは 3.2 の Vogt らの研究のように身体情報を手足や胴、腰などの複数の質点を持つ胴体リンクモデルとして簡

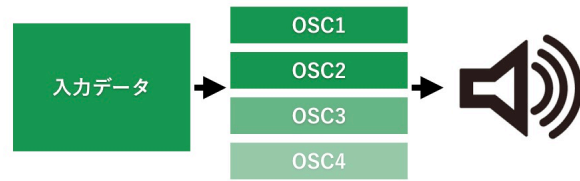


図 8. 入力データに応じた音源の自動生成

略化して動作分析を行う。個々の胴体の情報からそれぞれの音響情報を判別するためには、周波数や音量などの要素に差異を設定することが有効と考えられる。周波数に差異をつけることで、音程による身体情報と音響情報の関連付けが可能となる。動作中に同時に各部位の音響情報が同時に再生される場合を考慮し、各部位の差異が正確に判断可能な適切な音程差を検討する。

4.2. 教師データや個人データの記録と比較

これまで示してきたように運動支援や分析を行う場合には、教師データを用いた比較が有効である。ここではシステム内に教師データや個人データを記録する領域を設定し、可聴化によるリアルタイムでの動作の比較や不適切な動作の改善を行う。リアルタイムでの教師データとユーザーの動作情報の比較を行う場合、両者のデータの差異を音響情報として提示する、もしくは両者のデータを音響情報として同時に提示した比較方法などが考えられる。どの手法が動作の改善や学習進度に良い影響を及ぼすかは、個人データを記録するシステムを用いての検討を行っていく。

5. おわりに

ここでは動作分析への可聴化の応用の現状を考察し、データと音の関連性における適切な変換を考慮し可聴化の有用性を活かした分析方法を検討を行った。システムとユーザーがインタラクティブに関連する可聴化システムを用いることで、動的にデータと音響情報の関係を決定し対話的な情報の探索や理解が可能となることが考察された。インタラクティブな可聴化システムには静的データの探索とユーザーの入力情報のフィードバックとしての用途があり、身体情報へ応用することで動作をリアルタイムに把握し制御することが可能になる。

これはスポーツのほか、演奏やダンス・パフォーマンスなどの制御や支援に用いることができる。動作以外にも、瞬時に動向を把握する手法として、時系列変化の特性を持った様々なデータに応用が可能である。音響情報のフィードバックの提示目的としては、「不適切な情報の検知」や「一連の情報の把握」などを直感

的に理解することにある。さらに、動作データを記録することで可聴化を用いた学習過程の進捗や個人の特徴などの把握も可能である。

今後は聴覚フィードバックの持つ動作分析や運動支援への有効性を活かした、インタラクティブな可聴化手法を実現するためのシステムを検討していく。身体情報を可聴化し、教師データを用いた正しい動作の認識や自身の動作情報の正確な把握の支援を目的としていく。音響情報やマッピングの調節をインターフェースを通し行うことで、ユーザーの身体特性や対象動作に適した身体情報の可聴化が行える。

6. 参考文献

- [1] 丸井淳史, “音のためのインターフェース, 音によるインターフェース—楽器用エフェクタおよびソニフィケーション研究—”, 精密工学会誌 vol 79, pp.502-505, 2013
- [2] Ronsse R, Puttemans, Veerle Puttemans, James P. Coxon, Daniel J. Goble, Johan Wagemans, Nicole Wenderoth, Stephan P, Swinnen, “Motor Learning with Augmented Feedback: Modality-Dependent Behavioral and Neural Consequences”. *Cerebral Cortex*, 2011, Vol21, pp. 1283-1294, 2011.
- [3] 長谷川直哉, 萬井太規, 武田賢太, 佐久間萌, 笠原敏史, 浅賀忠義, “視覚フィードバックと聴覚フィードバックによる 動的バランスの学習効果の違い”, 理学療法学 第 42 巻第 6 号, pp.474-479, 2015.
- [4] Heuer H, Hegele M, “Constraints On Visuo-Motor Adaptation Depend on The Type of Visual Feedback during Practice”, *Exp Brain Res*. 2008; 185, pp.101-110, 2007.
- [5] Hermann, T., Hunt, A. and Neuhoff, J. G., *The Sonification Handbook*, pp.399-425, 2011.
- [6] Kevin M. Smith, David Claveau, “The Sonification and Learning of Human Motion”, *Proceedings of the International Community for Auditory Display (ICAD) 2014*, 2014.
- [7] Alexander Refsum Jensenius, Rolf Inge Godøy, “Sonifying The Shape Of Human Body Motion Using Motiongrams”, *Empirical Musicology Review Vol.8, No.2*, pp.73-83, 2013.
- [8] Thomas Hermann and Sebastian Zehe, “Sonified Aerobics – Interactive Sonification Of Coordinated Body Movements”, *Proceedings of the International Community for Auditory Display (ICAD) 2011*, 2011
- [9] Toshitaka Kimura, Takemi Mochida, Tetsuya Ijiri, and Makio Kashino, “Body-mind Sonification to Improve Players Actions in Sports”, https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201601ra1_s.html, 2015. (2016.6.2 取得)
- [10] Katharina Vogt, David Pirró, Ingo Kobenz, Robert Höldrich, Gerhard Eckel, “Physiosonic - Movement Sonification As Auditory Feedback”, *Proceedings of the International Community for Auditory Display (ICAD) 2009*, 2009.
- [11] Thomas Hermann and Tobias Großhauser, “Wearable Setup For Gesture And Motion Based Closed Loop Audio Interaction”, *Proceedings of the International Community for Auditory Display (ICAD) 2011*, 2011.

7. 著者プロフィール

高野 衛 (Mamoru Takano)

首都大学東京システムデザイン研究科博士課程後期所属。大学時代より現在にかけてコンピュータを用いた音響作品や映像作品の制作を行っている。2009年に玉川大学 メディア・アーツ学科に入学。音響プログラミングや作曲をジョナサン・リー、キャシー・コックス、高岡明に師事する。同年、国立音楽大学大学院作曲専攻コンピュータ音楽学科に入学し、作曲と音響プログラミングを今井慎太郎に師事する。学科主催のコンサート“Sonic Interaction”にて演奏作品とアコースマティック作品を発表している。2012年オーディオ・ヴィジュアル作品“Unvision”を“インターカレッジ・コンピュータ音楽コンサート”にて発表。翌年、同作品を玉川大学メディアアーツ学科卒業展示“Contemporary Computer Music Concert 2013”へ出品。