

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00269

研究課題名(和文) マルチモーダル生態学的インタフェースのための可聴化基盤技術の開発

研究課題名(英文) Development of Fundamental Sonification Techniques for Multimodal Ecological Interface

研究代表者

堀口 由貴男 (Horiguchi, Yukio)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：50362455

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：「可聴化」は元来人が知覚できない関係情報を音響信号に変換し聴覚的に知覚させる技術である。その研究は1990年代から取り組まれているが、データから音へのマッピングに関して、体系的な設計の方法や指針はいまだ確立されていない。本研究では、時々刻々と変化する監視/操作対象システムの状態を非音声の音響信号によって伝達する可聴化技術について、データから音へのマッピングを比較し、音で表現される変量群の特性に応じた適切な聴覚表示設計の方法を解明することに取り組んだ。実験調査を通じて、可聴化の設計ならびに視覚表示との組合せに適した可聴化対象の選択に関する知見が得られた。

研究成果の概要(英文)："Sonification" is a kind of techniques to convey data relations that are originally not perceivable to humans by converting them to non-voice, acoustic signals. While many studies have been done around it since 1990s, no solid guidelines have been established regarding how to design mappings from data to sound. This research project aimed to study theories of designing effective sonification to acoustically represent the state of controlled systems that changes from moment to moment. Empirical studies that examined various data-to-sound mappings by experiments were conducted to find principles of sonification design considering properties of variables and their relations to be represented by artificial sounds. The studies revealed several points of effective sonification design including what type of tasks is preferable to be supported by sonifications to visual displays.

研究分野：人間機械系

キーワード：可聴化 聴覚表示 複合表示 ヒューマンインタフェース インタフェース設計

1. 研究開始当初の背景

「可聴化 (sonification)」は、元来人が知覚できない関係情報を音響信号に変換し聴覚的に知覚させる技術である。その研究は、欧米の研究者を中心に 1990 年代から取り組まれているが、データから音へのマッピングに関して、系統的な設計の方法や指針はいまだ確立されていない。

研究代表者は、作業者の状況認識を支援する情報呈示技術としての可聴化の開発に取り組む (科研費 21700134)、1 次元数値データの可聴化に関するいくつかの設計指針を導出した。これらの設計指針は基本的な操作タスクの一種であるトラッキングを用いた実験調査から得られ、

- 1) データ変数をどの音響パラメータに対応づけるか
 - 2) データ変数の変化を音響パラメータのどの方向の変化に対応づけるか
- という可聴化設計問題に対する一種のガイドを提供する。

一方で、マッピング先となる音響パラメータには未調査のものも存在するため、さらなる実験調査が必要とされた。また、多次元データの可聴化の設計について実験調査が必要とされた。

2. 研究の目的

本研究では、時々刻々と変化する監視 / 操作対象システムの状態を非音声の音響信号によって伝達する可聴化技術について、データから音への効果的なマッピングを精査し、音で表現される変量群の特性に応じた適切な聴覚表示設計の方法を解明することを目的に設定した。

そのために、変量間の関係についていくつかの類型を設定し、類型ごとにマッピング性能を比較評価することで、効果的な聴覚表示の性質について実験調査することにした。

また、支援対象となる認知的作業を分析し、得られた作業の制約構造に則って表示を設計する「生態学的インタフェース (ecological interface)」の設計理論を視覚表示を主とするものから聴覚表示が含まれる範囲まで拡張 (マルチモーダル化) することを目的として、視覚表示と聴覚表示の適性について実験調査することにした。

3. 研究の方法

(1) 設定した監視 / 操作タスクに対してデータから音へのマッピング方法を変えた複数の可聴化を設計し、実験協力者のタスクパフォーマンスを性能評価規準として各可聴化を比較した。基本的な監視 / 操作タスクには、大小判断タスクと補償トラッキングタスク、追跡トラッキングタスク、サーチャタスク

が使用された。

(2) 可聴化におけるデータのマッピング先となる音響パラメータとして、音の大きさ、高さ、テンポ、音色、およびそれらの組合せを比較した。可聴化音の生成には、純音と周波数変調 (frequency modulation; FM) 音、およびそれらの加算合成 (additive synthesis) を用いた。

(3) 多次元データの可聴化については、1 次元トラッキングタスクに別種のタスクを追加したり、システムの操作軸を増やしたりすることで、表示対象となる変量数を増加させたより複雑なタスクで実験調査を行った。

(4) 可視化と可聴化の組合せの適性について検証するために、トラッキングタスクとサーチャタスクを組み合わせたマルチタスク環境を用意し、各タスクのパフォーマンスを可聴化同士、および可視化と可聴化の間で比較した。

4. 研究成果

実験調査を通じて、以下に列挙する可聴化の設計ならびに視覚表示との組合せに適した聴覚表示対象の選択に関する知見が得られた。これらの知見を、情報を視覚表示および聴覚表示で複合表現する生態学的インタフェース設計に展開することが今後の課題である。

(1) 先行研究で得られた 1 次元数値データの可聴化法を加算合成により組み合わせる多次元データ可聴化について調査した。具体的には、各次元を表現する音の周波数 (高さ) の組合せに着目し、2 音間の周波数差とそれらが協和音程 (2 音の振動数比が単純) の関係にあるか否かを因子とする実験調査を行った。

調査の結果、不協和音程の関係にある、周波数差が大きい音の組合せを用いることが各データ次元を表す音の正確な聴き取りにとって効果的であることを確認した。図 1 は、同時に呈示された 2 音の周波数差と音程の協和 (consonant) / 不協和 (dissonant) 関係の違いが両音の聴き取りの正しさに与える影響をグラフ化したものである。加算合成により異なる可聴化音を重ねる場合、不協和音程を構成するように各音を設計することがそれらが可聴化する変量の監視において好ましいことがグラフから分かる。

一方で、協和音程か不協和音程かの選択は操作タスクのパフォーマンスに有意な影響をもたらさず、加算合成による効果的な可聴化のためには周波数差が大きい音の組合せをまず選ぶべきであることを確認した。図 2 は、参照量の変化に合わせて操作対象量を調節

する課題において、各量を可聴化する2音の周波数差と音程の協和/不協和関係の違いが操作課題の成績(操作誤差)に与える影響をグラフ化したものである。可聴化される変量が時々刻々値を変化させる状況では、協和音程か不協和音程かの違いは、操作タスクを支援する可聴化の効果的な設計因子ではないことがグラフから分かる。

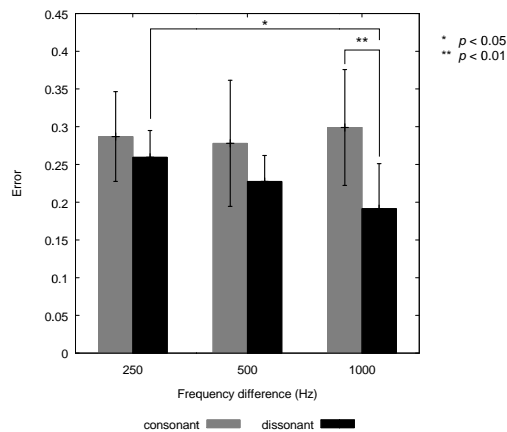


図1 同時呈示された2音の周波数差と音程の協和/不協和関係の違いによる両音の聴き取りの失敗率の変化

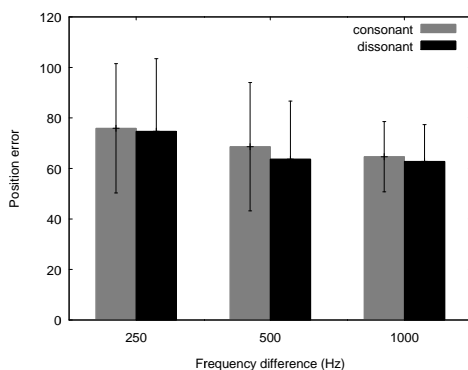
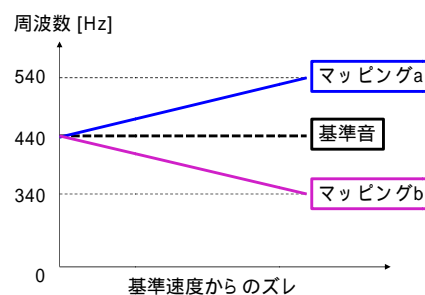


図2 参照量の変化に合わせて操作対象量を調節する課題における各量を可聴化する2音の周波数差と協和/不協和音程の違いの操作誤差への影響

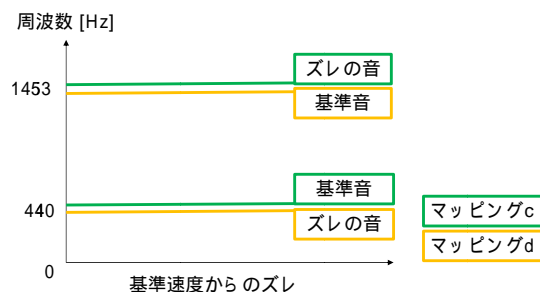
(2) 目標状態への近づき方に制約が存在するトラッキングタスク条件下でのシステム状態の可聴化法について調査した。先行研究での調査により、目標状態からの偏差を音の大きさで表現する可聴化が効果的であることが明らかになっている。この音に目標状態への効率的な近づき方を理想接近速度からの偏差として知らせる別の音を加算合成によって追加する場合、その伝達には規準音からの音の高さの変化を用いることが効果的であることを実験調査により確認した。

図3は、この調査で比較されたマッピングについて、理想接近速度からの偏差に対する速度可聴化音の周波数の変化のさせ方の違い

を模式的に示したものである。規準音とは、目標状態からの偏差を表現する、速度可聴化音とは別の可聴化である。マッピングaとbは速度偏差の大きさを可聴化音の高さに対応づけた。一方、マッピングcとdは速度偏差の大きさを可聴化音の大きさに対応づけたため、音の高さは変化しない。図4は、これらの可聴化法の効果を調査したトラッキングタスク課題の成功率のグラフである。規準音と速度可聴化音の高低に関係なく、音の高さの変化を用いて目標状態への近づき方の制約情報を表現することが有効であることが分かる。



(a) マッピング a, b



(b) マッピング c, d

図3 目標状態への近づき方の可聴化法に関する実験調査で比較された4つのマッピングにおける音の周波数の変化

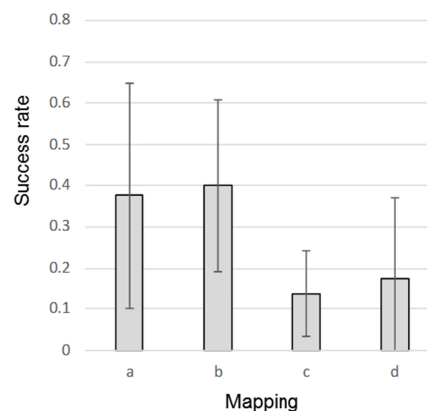


図4 目標状態への近づき方の可聴化法を変化させたときのトラッキングタスクの成功率

(3) 先行研究では扱われていなかった音色パラメータへのマッピングについて調査した。具体的には、音色をパラメトリックに変更できる FM 合成を利用して正負をもつ複数の変量を音で表現する多次元データ可聴化の設計について実験調査を行った。FM 合成では Carrier と Modulator という 2 つの発振器が音の合成に用いられ、Carrier/Modulator 周波数比 (C/M 比) と Modulator 振幅と Carrier 周波数の比 (modulation index; モジュレーションインデックス) が音色を変化させるパラメータである。調査の結果、モジュレーションインデックスを異なる変量の区別に、C/M 比を正負に対応づけるマッピング方法が効果的であることを確認した。さらに、そのようなマッピングにおいて、区別されなければならない要素音間で周波数スペクトルの分布形状を変化させられるために、高い Carrier 周波数に対して大きい値のモジュレーションインデックスを、低い Carrier 周波数に対して小さい値のモジュレーションインデックスを設定することがより効果的であることを確認した。

(4) 関数が最大値をとる座標を探索するサーチタスクをトラッキングタスクとともに用いて、複数タスクを同時にこなすマルチタスク環境への可聴化の適性を調査した。

それぞれのタスクについてデータのマッピング先となる音響パラメータを変更した複数の可聴化の性能を比較する実験調査の結果から、音の大きさで表現することが効果的なトラッキングタスクとは異なり、サーチタスク用には音の高さの変化で状態を伝達することが効果的であることを確認した。

図 5 は、1 次元トラッキングタスクにおける聴覚表示 (可聴化) および視覚表示の性能を平均トラッキング誤差で比較したものである。

音の大きさ (loudness) / 高さ (pitch) / テンポ (tempo) を目標状態からの偏差のマッピング先とする可聴化の中で音の大きさで表現するものが最も効果的だが、視覚表示 (vision) の性能には及ばないことが分かる。

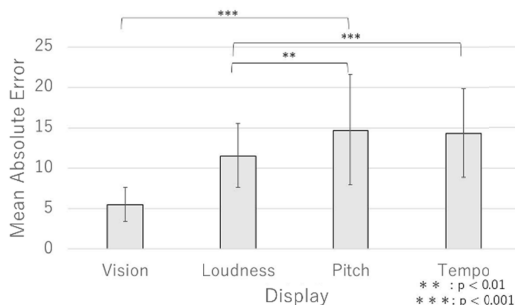
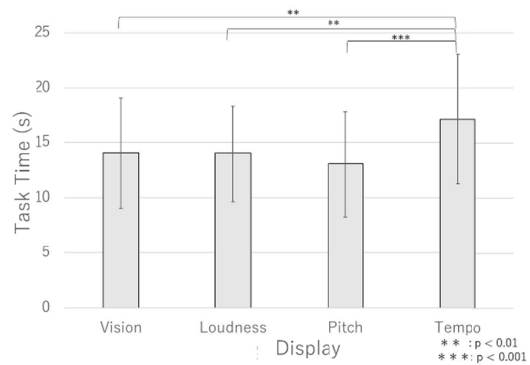


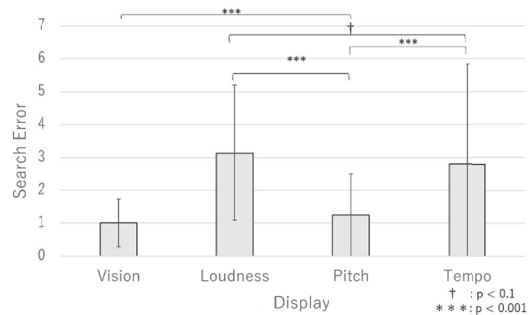
図 5 1 次元トラッキングタスクにおける聴覚表示および視覚表示の性能比較

(平均トラッキング誤差)

一方、図 6 は、1 次元サーチタスクにおける聴覚表示および視覚表示の性能をタスク達成時間と探索誤差で比較したものである。現座標の関数値を音の高さで表現する可聴化が最も効果的で、その性能は視覚表示とも同等であることが分かる。



(a) タスク達成時間



(b) 探索誤差

図 6 1 次元サーチタスクにおける聴覚表示および視覚表示の性能比較

これらのタスクを 2 つ同時に実行するマルチタスク条件での両タスクの聴覚表示のパフォーマンスを視覚表示のパフォーマンスと比較したところ、サーチタスクは、視覚表示を用いるよりも聴覚表示を用いる方が認知的負荷が小さく、他タスクとの並行処理において可聴化が効果的な情報呈示手段となることを確認した。

図 7 は、聴覚表示あるいは視覚表示を用いるトラッキングタスクについて、それを単独処理する場合と、視覚表示を用いる別のトラッキングタスク (+tracking) またはサーチタスク (+search) と並行処理する場合の、平均トラッキング誤差を比較したグラフである。グラフの横軸が単独処理時の誤差、縦軸が並行処理時の誤差を表す。マルチタスク条件下のトラッキングタスクでは、いずれもの可聴化も視覚表示に及ばないことが分かる。また、視覚サーチタスクとの組合せが聴覚トラッキングタスクのパフォーマンスをより大きく悪化させている。

一方、図8は、聴覚表示あるいは視覚表示を用いるサーチタスクについて、それを単独処理する場合と、視覚表示を用いる別のサーチタスク(+search)またはトラッキングタスク(+tracking)と並行処理する場合の、タスク終了時の探索誤差を比較したグラフである。マルチタスク条件下のサーチタスクには、音の高さの変化を利用した可聴化を情報呈示に用いることが最も効果的であることが分かる。また、単独処理と並行処理のパフォーマンス差が小さいことから、認知的負荷面での聴覚サーチタスクの優位性が示唆される。視覚情報処理との組合せの適性を考えた場合、音の高さ変化を利用してサーチタスクの可聴化は有効な方策であることを確認した。

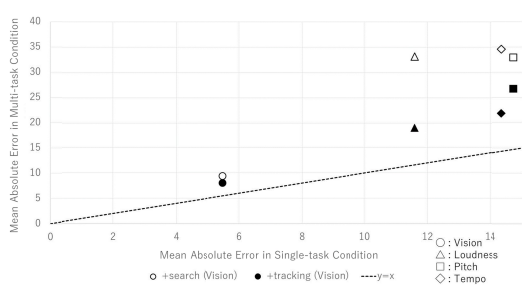


図7 トラッキングタスクを単独処理する場合と別の視覚タスクと並行処理する場合の平均トラッキング誤差の比較：横軸が単独処理時、縦軸が並行処理時。破線は単独処理と並行処理の性能が等しい場合を表す。



図8 サーチタスクを単独処理する場合と別の視覚タスクと並行処理する場合の探索誤差の比較：横軸が単独処理時、縦軸が並行処理時。破線は単独処理と並行処理の性能が等しい場合を表す。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 3件)

Y. Horiguchi, et al., Effectiveness of Choosing Dissonant Combination of Tones for Multivariate Data Sonification, The 16th International Conference on Human-Computer Interaction, 2016

堀口由貴男, ヒューマンマシンシステム設計に対するエコロジカルアプローチと作業分析, 第14回社会システム部

会研究会, 2017

堀口由貴男ほか, 加算合成による2次元データ可聴化法の検討 位置決めタスクを用いたパラメータマッピングの比較評価, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2017, 2017

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.syn.me.kyoto-u.ac.jp/horiguchi/research.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

堀口 由貴男 (HORIGUCHI, Yukio)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50362455