

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（特設分野研究）

研究期間：2019～2023

課題番号：19KT0030

研究課題名（和文）合奏の個性を形作る時間的協調ダイナミクスの解明

研究課題名（英文）Elucidating temporal coordination dynamics that form individualities of ensemble performances

研究代表者

岡野 真裕（Okano, Masahiro）

神戸大学・人間発達環境学研究科・助教

研究者番号：90809956

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：「2人組で同期しながら一定のリズムを維持するタッピング課題ではテンポが速くなりやすい」という現象に関して、（1）加速の程度を制御する方法の検証実験、（2）数理モデルの理論的解析、（3）数理モデルに基づいたタイミングゆらぎ付とプログラムの検証実験を実施した。（1）では、ビートのまとまりを大きく捉えると加速がより顕著になることがわかった。（2）では、実際のタッピングデータに基づいてモデルパラメータを推定する方法が開発できた。（3）では、アンサンブル経験のある人が、モデルに基づくゆらぎとランダムなゆらぎとを、ある程度区別できる可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の以前には、2人組の間での同期のためのタイミング調節が加速の一因であることが示唆されるに留まっていた。（1）と（2）により、同期のずれにつながるタイミングのばらつきが大きさが加速度合いに寄与することが実証され、現象の仕組みの理解が進んだ。また（2）により、個々の参加者のタイミング修正における個性をモデルパラメータで表せるようになり、「ペアの相性」の研究を進めるための基礎になることが期待される。（3）は、我々の数理モデルに、打ち込みの電子音楽にゆらぎを与えるプログラムの原型としての価値が一定程度あることを示唆すると共に、「人間らしいゆらぎと協調とはどんなものか」を考えるための基礎になる。

研究成果の概要（英文）：Concerning the phenomenon that “the tapping tempo tends to increase in a tapping task in which pairs of players maintain a constant rhythm while synchronizing,” we conducted (1) an experiment that tested a method to control the degree of acceleration, (2) a theoretical analysis of a mathematical model, and (3) an experiment that tested a program to add timing fluctuation based on the mathematical model. In (1), it was found that the acceleration became more pronounced when the group of beats was captured in a larger size. In (2), we developed a method for estimating model parameters based on actual tapping data. In (3), it was suggested that people with experiences of ensemble performance can distinguish between model-based fluctuations and random fluctuations to some extent.

研究分野：認知行動科学

キーワード：リズム ゆらぎ 合奏 対人間協調 結合振動子 協調ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

我々はこれまでに、合奏の時間的協調に関する基礎研究として、2人組リズム維持課題を用いた研究を行ってきた。その結果、同期のための相互タイミング調節を通じた加速や、長・短の時間スケール（10～30秒程度が境）で異なる協調・動揺パターンを示す複合的ダイナミクスが認められた。数理モデル（図1）による検討でも、モデル係数の変化に応じて、長・短の各時間スケールにおける相関構造を再現できた。このように、同課題におけるペア毎の個性を、相互タイミング調節モデルのパラメータダイナミクスとして表現することが出来た。

合奏の演奏者間協調の研究は、ヒトの社会性の基盤の研究等との関連から様々な分野で着目され、増えてきている。しかし合奏の協調の解析と、演奏者個人のタイミング調節の振る舞いは、これまで個別に検討されてきており、両者を統合できる知見が必要であった。

$$\begin{cases} \frac{d\theta_i(t)}{dt} = \omega_i(t) + Z(\theta_i(t))p_i(t) + \sigma_i\xi_i(t) \\ \frac{d\omega_i(t)}{dt} = Y(\theta_i(t))p_i(t) - k_i p_i(t)(\omega_i(t) - \omega_i(0)) \\ p_1(t) = \sum_{\ell} \delta(t - \tau_{\ell}^{(2)}) \\ p_2(t) = \sum_{\ell} \delta(t - \tau_{\ell}^{(1)}) \end{cases}$$

図1 我々が提案した2人組リズム維持課題の数理モデル (Okano et al., 2019, *Physica A*)。タップのずれに応じて位相とタップ間隔を修正する反応をモデル化している。

2. 研究の目的

我々の数理モデルの工学的応用や社会実装も視野に入れ、4つの課題を通して上記の問いにアプローチすることが当初の目的であった（研究1：モデルに基づいたバーチャルパートナーシステムの開発、研究2：モデルパラメータ推定法の確立、研究3：実際のヒトのパラメータの収集と影響因子の特定、研究4：数理モデルを用いたHumanizerプログラムの開発と聴取印象評価実験）。

3. 研究の方法

【研究1】

図1の数理モデルに基づいたバーチャルパートナーシステムを、webブラウザ上で動作するPCアプリケーションとして、JavaScriptを用いて実装することを試みた。

【研究2】

数理モデルと実際の計測データの関係を状態空間モデルの枠組みで書き直し、マルコフ連鎖モンテカルロ法によるベイズ推定を行うことで、モデルパラメータの推定を試みた。モデルは次のように書き直された：

(i) 観測モデル

$$s_i = t_i + \sigma_{\epsilon}\epsilon_i \quad (1)$$

(ii) 状態モデル

$$t_{i+1} = t_i + T_i + Z(\Delta\theta_i) + \sigma_{\xi}\xi_i \quad (2)$$

$$T_{i+1} = T_i + Y(\Delta\theta_i) + k(T_{\text{init}} - T_i) + \sigma_{\eta}\eta_i \quad (3)$$

ここで、 $i = 1, 2, 3, \dots$ は時間のインデックスである。 t_i, T_i が状態変数であり、前者は参加者がタップを意図した時刻、後者はテンポである。 $\epsilon_i, \xi_i, \eta_i$ は時刻ごとに独立なノイズで標準正規分布に従い、 $\sigma_{\epsilon}, \sigma_{\xi}, \sigma_{\eta}$ はノイズの強度を表すパラメータである。 T_{init} はテンポの初期値であり、 k はテンポを初期値に戻そうとする効果の強さを表すパラメータである。関数 $Z(\Delta\theta), Y(\Delta\theta)$ はタイミングとテンポの修正量を表し、 $\Delta\theta$ は2人の参加者のタップの位相差である。関数 $Z(\Delta\theta), Y(\Delta\theta)$ は以下のような関数系を持つと仮定し、パラメータ $z_0, z_1, z_2, y_0, y_1, y_2$ が導入された（このとき、 $Z^{(\ell)}(0) = z_{\ell}, Y^{(\ell)}(0) = y_{\ell}$ ($\ell = 0, 1, 2$) が成り立つ）。

$$Z(\Delta\theta) = z_0 + z_1 \sin(\Delta\theta) + z_2(1 - \cos(\Delta\theta)) \quad (4)$$

$$Y(\Delta\theta) = y_0 + y_1 \sin(\Delta\theta) + y_2(1 - \cos(\Delta\theta)) \quad (5)$$

【研究3】

「ビートのまとまりを大きく捉える」という方略が、2人組リズム維持課題におけるテンポの加速にどのような影響を及ぼすかについて、行動科学実験により検証した。24人（12ペア）参加者が4つの条件（ソロ条件、ペア1/1条件、ペア1/4条件、ペア1/8条件：後述）でリズム維持課題を実施した。1試行は220秒で、参加者は最初に目標テンポ（100 bpm）を示すメトロノームを8拍開いてから、20拍をメトロノームと同期してタップし、残りの時間はメトロノーム無しで目標テンポを維持してタップを続けるよう教示された。ペアの3条件では、目標テンポに加えてパートナーとのシンクロも維持するよう教示された。1/1、1/4、1/8の各条件での教示は次のようなものであった：

(1/1 条件) 全てのタップで、できるだけ2人のタイミングが合うよう頑張ってください。
(1/4 条件) 4回のタップをひとまとまりとして、その頭の1回が合えば、残りの3回はあまり気にしなくて構いません。
(1/8 条件) 8回のタップをひとまとまりとして、その頭の1回が合えば、残りの7回はあまり気にしなくて構いません。

【研究 4】

MIDI 形式の音符系列データに、モデルで生成したタイミングのゆらぎを付与し、WAV 形式で書き出すプログラム (humanizer) を MATLAB で作成した。また、等間隔の 2 人組のドラムタッピング系列にこのプログラムを用いてタイミングのゆらぎを付与した音声ファイル (human 刺激) に加え、等間隔の 2 人組のドラムタッピング系列にランダムなタイミングのゆらぎを付与した音声ファイル (random 刺激) を用意し、これらの聞き分けが可能かをオンライン聴取実験により検証した。

モデルパラメータ設定のバリエーションとしては、式(5)における y_1 について 3 種類 ($y_1 = 0.5, y_1 = 1.0, y_1 = 1.5 : y_1 = 1.5$) を検討した (他の変数は固定値)。これは、パートナー間の協調の特徴量と言える相互相関構造に最も影響を与えるのが、テンポの修正量を表す y_1 だったためである。Okano et al. (2019) で報告された平均的な結果に近い相互相関構造を示すのが $y_1 = 1.5$ であったことと、数値シミュレーションにおいて y_1 をこれ以上の値にすると相互相関構造が実際のタッピングデータと乖離する傾向が認められたことから、 $y_1 = 1.5$ が「強め」のテンポ修正量にあたりと判断し、「中程度」「弱め」として $y_1 = 1.0, y_1 = 0.5$ をそれぞれ設定した。Random 刺激は、human 刺激を元にして、パートナー間のずれの平均値と標準偏差が保存されるように制約をかけ、相互相関構造がランダムになるよう並べ替えて作成した。

実験にはのべ 450 人が参加した。参加者は、1 つの音声刺激を聴いて都度、そのとき聴いた音声刺激が human 刺激だったかそうでなかったかを、3 秒以内に判断するよう求められた (全 36 試行)。参加者は実験の終わりに、音楽経験について尋ねる質問 (合奏への習慣的な参加経験およびゴールドスミス音楽洗練度指標日本語版; Sadakata et al., 2022) にも回答を求められた。

4. 研究成果

【研究 1】

Web ブラウザ上で①ビープ音を鳴らし、②発音タイミングとキープレスの時間差をモデルに入力し、③次に鳴るビープ音のタイミングを決め、①' 再びビープ音を鳴らし… (以下くり返し) という仕組みと、並行してビープ音の発音タイミングとキープレスのタイミングを記録する仕組み、これらのタイミングデータを CSV ファイルとしてダウンロードできる仕組みを作るところまでは成功した (図 2)。ただ、オンライン実験アプリとして利用するには、パソコンの処理の遅延やそのばらつきへの対策が課題として残った。

Press the ENTER key to start, and press the SPACE key to tap.

[Download a CSV file.](#)

Parameters:

a: b: k:

Computer's tap time:

```
0,1005,2020,3018,4016,5002,5992,6980,7951,8911,9862,10799,11979,12908,13979,15032,16081,17135,18179,19238,20281,21324,22366,23384,24415,25429,26454,27482,28507,29515,30511,31535,32538,33532,34529,35540,36533,37530,38522,39521,40533,41528,42521,43498,44485,45451,46399,47380,48326,49305,50310,51310,52317,53326,54324,55330,56324,57336,58333,59329
```

Your tap time:

```
89,1018,2034,3045,4005,5021,5974,6885,7750,8606,9462,10301,11341,12997,13934,14982,16094,17102,18197,19278,20294,21318,22398,23374,24414,25501,26486,27509,28510,29558,30541,31534,32574,33574,34541,35565,36558,37597,38617,39605,40585,41577,42609,43530,44486,45382,46361,47265,48269,49338,50290,51358,52321,53310,54310,55350,56366,57318,58358,59394,60330
```

図 2 バーチャルパートナー実験アプリのプロトタイプのスクリンショット

これらの結果から、合奏への習慣的な参加経験がない者には聞き分けが難しいものの、我々のモデルをベースにした humanizer は、ランダムなゆらぎを付与しただけの humanizer とは異なる聴取印象を与えうることが示唆された。また、音楽洗練度指標では測りきれない、合奏経験者に特有な音楽的能力が存在する可能性が示唆された。

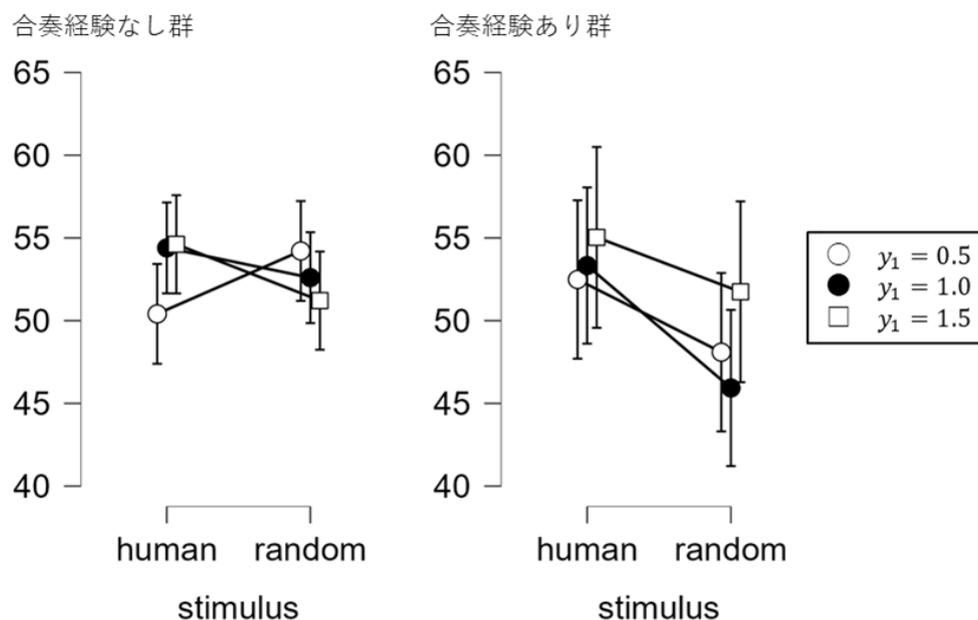


図 4 刺激が「human」だと判断された割合（平均値±95%信頼区間）

【まとめ】

これら一連の研究により、2人組リズム維持課題のパフォーマンスに影響する新たな要因の1つが明らかになった（研究2）とともに、他の様々な要因がどのように同パフォーマンスに影響してくるかを調べるための素地が整った（研究3）。研究1で残った処理遅延やばらつきの課題が解決できれば、オンラインでの行動実験を通して、多くの参加者のパラメータを対面より効率よく集められる可能性がある。さらに研究4は、我々のモデルが合奏に対応した humanizer の基礎としての価値を持つことに加え、人々の音楽的能力を調査するためのツールとしての利用価値も持つ可能性も示唆した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡野真裕
2. 発表標題 ビートのチャンキングが2人組リズム維持課題のテンポ逸脱に及ぼす影響.
3. 学会等名 日本音楽知覚認知学会2019年度秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡野真裕
2. 発表標題 演奏科学の最近のトピック～「リズム」「協調」を中心に～（【特別企画】Music Science Frontiers: ICMP 16th in TOKYOの講演企画に向けて において話題提供およびパネルディスカッションに参加）
3. 学会等名 日本音楽知覚認知学会2019年度秋季研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木駿太、紅林亘、岡野真裕、進矢正宏、工藤和俊、中村雅之、齊藤玄敏
2. 発表標題 協調タッピング課題の数理モデリングとパラメータ推定
3. 学会等名 情報処理学会 第139回音楽情報科学研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 鈴木駿太、紅林亘、岡野真裕、進矢正宏、工藤和俊、中村雅之、齊藤玄敏
2. 発表標題 ヒトのリズム協調機構を解明するためのデータ分析手法の開発
3. 学会等名 日本機械学会 第54回 東北学生会 卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	紅林 亘 (Kurabayashi Wataru) (70761211)	弘前大学・大学院理工学研究科・助教 (11101)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	橘 亮輔 (Tachibana Ryosuke)	産業技術総合研究所・人間情報インタラクション研究部門・主任研究員 (82626)	
研究協力者	近藤 聡太郎 (Kondoh Sotaro)	慶應義塾大学・環境情報学部・日本学術振興会特別研究員PD (32612)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------