

[研究助成 (A)]

やわらかい予期の臨界的不安定性が導く人間と機械の リズム同調システムの開発

2251014

研究代表者
(助成金受領者)

茨城大学 応用理工学野

教授 笹 井 一 人

共同研究者

香川大学 創造理工学部

准教授 松 井 哲 也

茨城大学 大学院理工学研究科 博士前期課程2年

永 井 友 貴

[研究の目的]

幼い子供でも誰かと合わせて音楽を奏でることはできるのに、メトロノームに合わせて続けることは熟練を要する。これは、機械が固く安定な構造を基盤とするのに対して、人間が柔らかく不安定な構造を基盤としていることに起因する、人間と機械の調和を阻むギャップである。近年のリアルタイム伴奏システム等では機械学習による予測と人為的ノイズの付加によりこの柔らかさを近似的に実現しているにすぎず、人間の不安定性を「ノイズ」ではなく「予測不可能性を受け入れて可能性を拡張する」原理として正面から表現する制御則は未だ確立されていない。申請者らはこれまで、不完全情報ゲームにおいて、郡司らの提唱したベイズ・逆ベイズ(BIB)推論を適用する研究を行ってきた。BIB推論は、事前分布の構造そのものを観測データに応じて書き換える「逆ベイズステップ」を通常のベイズ推論に組み合わせた推論モデルであり、ジャンケンゲームを用いた申請者の先行研究では、BIB推論と対戦する人間の手の出し方にベキ分布(臨界性の指標)が現れることが確認されている。ベキ分布は安定と不安定のいずれでもない臨界状態に固有の統計的性質であり、BIBが人間との協調を臨界性経由で実現している可能性を示唆していた。

本研究の目的は、このBIB推論を時間的協

調課題に拡張した「やわらかい予期モデル」を機械側アルゴリズムとして実装し、人間と機械のリアルタイムなりズム同調系(協調タッピング系)におけるその挙動を、人間同士の協調と直接比較することで定量的に明らかにすることである。具体的には、(i)十分なサンプル数を確保した本実験プロトコルの確立、(ii)3種の予期メカニズム(決定論的Kuramoto型、硬い予期のベイズ型、やわらかい予期のBIB型)の協調挙動の比較、(iii)やわらかい予期が生み出す動的状態を、臨界性の観点を含む多面的指標で評価すること、を本助成期間内のサブ目標とした。これらを通じて、現代から将来にかけてより高度化する機械と人間との調和的關係を構築する基盤的知見を得ることを目指した。

[研究の内容、成果]

1. 関連研究と本研究の位置づけ

本研究は感覚運動同期(SMS: Sensorimotor Synchronization)研究、Kuramoto型結合振動子モデル、ベイズ/逆ベイズ/BIB推論、Fristonの能動的推論および自由エネルギー原理、ならびに中島・三宅らの協調タッピングモデルを理論的基盤とする。Reppら(2005)の長い系譜が示すように、同期タッピング・交互タッピング・協調タッピングは音楽演奏や対話など対人的時間協調の基盤現象であり、Kuramoto

型結合振動子は相手位相への引込みを記述する代表的決定論的モデルとして広く用いられてきた。

中島・三宅らは協調タッピングにおいて、SE- δ ITI 相関と δ SE- δ ITI 相関に基づく二種類のタイミング制御機構を発見した点で重要である。しかし彼らのモデルは定常過程を前提としており、人間-人間協調に内在する非定常性や個人差を十分には説明できない。本研究はその枠組みを継承しつつ、信念自体が観測に応じて書き換わる「やわらかい予期」を導入することで非定常適応過程を取り込む点に独自性がある。また Matsui & Sasai (2026, Discover AI) は人間-エージェント相互作用を Gunji の知能三類型 (AI 型/NI 型/NBI 型) に基づき体系化し、予測不可能な「外部」を積極的に取り込む NBI (Natural-Born Intelligence) 型 HAI の理論的枠組みを提示した。

本研究はその NBI 型 HAI の工学的具体実装に位置づけられる。検証する 4 つの仮説は次のとおりである：(1) 確率的推論は Kuramoto 型を上回る、(2) BIB はベイズより非定常適応能力に優れる、(3) モデルの予期特性は実際の行動指標に反映される、(4) 音楽・ダンス経験が協調性能に影響する。

2. やわらかい予期モデル (第 3 章)

本研究では 3 種の機械側アルゴリズムを「予期の硬さ」軸上に整列して比較する。第一の Kuramoto モデルは決定論的法則 $ITI_{next} = ITI_0 - K \cdot SE$ ($ITI_0 = 600$ ms, 結合定数 $K = 0.5$) に従い、確率分布や信念を一切もたない最も「硬い」予期である。

第二のベイズモデルは、対数正規事前分布とガウス尤度、学習率 $\alpha = 0.3$ によるベイズ更新で事後分布から次 ITI をサンプリングする。確率的推論を行う一方、事前分布の構造 (仮説空間の枠) は終始固定されており「硬い予期」に分類される。第三の BIB (Bayesian-Inverse Bayesian) モデルは、ベイズモデルと完全に同

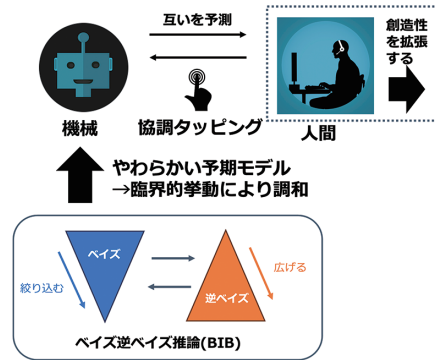


図 1 やわらかい予期モデル (BIB 推論) の概念図。ベイズ更新 (絞り込む) と逆ベイズ更新 (広げる) の二段階で、信念自体が観測に応じて書き換わる。

一の構造の上に、確率 $\beta = 0.2$ で事後確率が最低の仮説 h_{min} を直近 $L = 7$ サイクルの経験的カーネルで置換する逆ベイズステップを追加する。これにより仮説空間自体が観測データに応じて動的に再構成される「やわらかい予期」が実現される。記憶長 $L = 7$ は H-H 実験から推定された SE 自己相関の有効長と H-C 実験のリアルタイム応答性の両方を考慮して決定した。

3. 実験方法

茨城大学倫理委員会の承認 (プロトコル 25T1600, 2025 年 11 月 20 日承認) のもと、Mac Studio (M4 Max) ワークステーション、低レイテンシ音響インタフェース Focusrite Scarlett 4i4 (測定出力レイテンシ 6.8 ms, エンドツーエンド往復遅延 10 ms 未満)、密閉型ヘッドフォン audio-technica ATH-SX1a, サンワサプライ 400-SKB075 USB テンキーによるサブミリ秒精度入力環境を MATLAB R2025b + Psychtoolbox-3 上に構築した。両プレイヤーは目隠しを着用し、互いのタップ音のみがクロスフィードバックされる構成とすることで、視覚情報を排した純粋な聴覚的時間協調を実現した。

実験課題は Stage 1 (同期フェーズ: 60 サイクル・ISI = 600 ms メトロノームによる内的拍形成) と Stage 2 (交互タッピング協調フェーズ: 280 サイクル) の二段階構成とした。被験者は H-H 7 組 14 名 (男性 5 名・女性 9 名, 平均年



図2 H-H 実験の実験風景。二人の実験参加者がアイマスクを着用し、ヘッドフォンを通じて相手のタッピング音を聴きながら交互タッピングを行う。実験システムの全体構成：Mac Studio + 低レイテンシ音響インタフェース + 密閉型ヘッドホンによりクロスフィードバック構成を実現。

齢 21.9 ± 1.4 歳), H-C 18 名 $\times$ 3 モデル = 54 セッション。各セッションの開始 30 サイクルを過渡応答として除外し, 250 サイクル $\times$ 2 プレイヤー = 500 データ点/ペアを解析対象とした。

特徴量はタップ周期 ITI (Inter-Tap Interval) と同期誤差 SE (Synchronization Error)。解析は外れ値処理 (3 σ 法), 記述統計, 対数正規/ガンマ/正規分布のフィッティング比較 (AIC 基準), 自己相関関数と積分相関時間 τ_{ICT} , KS (Kolmogorov-Smirnov) 距離, ADF (Augmented Dickey-Fuller) 定常性検定, Granger 因果性検定, AR (1) プレイヤー対称モデルによるリーダー・フォロワー分析, DFA, Allan 分散, Goh-Barabasi バースト性, 打ち切りべき分布の最尤適合を実施した。

4. 結果

■人間-人間 (H-H 条件)

H-H 実験では 7 組 $\times$ 280 サイクルから合計 3,920 タップを取得した。ペア間 ITI 平均は 568 ~ 838 ms と幅広く, プール ITI 平均は 664.6 ± 125.0 ms (変動係数 CV = 0.188) と Stage 1 の ISI = 600 ms より約 10% 遅いテンポに収束した。ITI 分布は対数正規が正規より $\Delta AIC = 452.7$, ガンマより $\Delta AIC = 109.2$ で圧

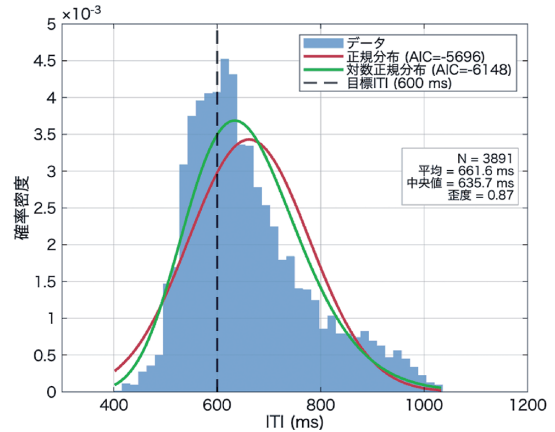


図3 H-H 実験における ITI 分布と理論分布のフィッティング。実測ヒストグラム (青) に対し対数正規 (緑) が正規 (赤) より良好に適合 ($\Delta AIC = 452.7$)。

倒的に優越し, Weber-Fechner 型の比率符号化と整合する重要な統計的性質を示した。この結果は本研究のベイズ/BIB モデルが対数正規事前分布を用いる経験的根拠を提供する。

SE 平均は -0.06 ms と実質ゼロで, 正/負 SE は 49.9/50.1% とほぼ完全に均等に分布した (対称性の高い相互補償)。全 7 組で双方向の Granger 因果が有意 ($p < 0.001$) に検出され, 相互適応の存在を強く支持した。AR (1) プレイヤー対称モデルによる役割分析では, 14 名中 14 名で自己係数 α_{Self} が相手係数 α_{Pair} を上回り, 全 7 ペアが「リーダー-リーダー (相互自己優位)」型と分類された (二項検定 $p = 1.2 \times 10^{-4}$)。これは Konvalinka et al. (2010) が報告した「ハイパーフォロワー仮説」を本プロトコルにおいて反証する結果である。

ADF 検定では SE 時系列は 7/7 ペアで非定常, ITI 時系列は 4/7 で定常という顕著な非対称性が観察され, 申請時に想定したシステムの「やわらかさ」を反映する興味深い性質が確認された。

■H-C 主実験: BIB が H-H を最良再現

H-C 実験では 18 名の参加者が Kuramoto/ベイズ/BIB の 3 種計算パートナーと 280 サイクルずつ協調タッピングを行い, ラテン方格配置 (6 順序パターン $\times$ 3 名) により 54 セッショ

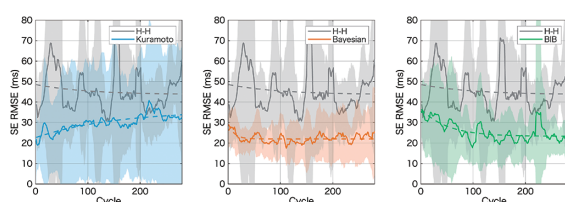


図4 H-H（グレー）と3モデル（Kuramoto／Bayes／BIB）の学習曲線比較。BIBが最も人間-人間に近い適応プロファイルを示す。

ン・約 30,240 タップを取得した。従来の同期精度指標である SE RMSE に対する Friedman 検定では3モデル間に統計的有意差は検出されなかった ($\chi^2 = 1.33$, $p = 0.51$, Kendall's $W = 0.04$)。すなわち古典指標の枠組みではモデルの差を区別できない。

一方、H-H を参照基底とする以下の3つの独立指標すべてにおいて、BIB が他二モデルを上回り H-H に最も近接した：SE 平均バイアスは Kuramoto -9.95 / Bayes -4.04 / BIB -1.39 ms (H-H -0.06)，SE 分布の KS 距離 D は Kuramoto 0.147 / Bayes 0.176 / BIB 0.142 ，積分相関時間 τ_{ICT} は Kuramoto 3.30 / Bayes 5.63 / BIB 8.92 (H-H 14.46 ，BIB は H-H の 62% の時間相関長を保持)。注目すべきことに、この優位性の順序「BIB > Bayes > Kuramoto」は3モデルを「予期構造をデータが書き換えうる度合い」で並べた順序と完全に一致しており、やわらかい予期の度合いが直接 H-H 再現性に対応することを示した。

5. 考察

申請時に最有力候補として位置づけていた「 $1/f$ 臨界協調」仮説は、本研究の系統的検証により否定された。全 68 セッション (H-H 14 名 + 3 モデル各 18 セッション) に対し、5つの独立な長距離記憶・ヘビーテール・間欠性指標— (i) Welch 法による PSD スロープ β ，(ii) DFA 指数 α_{DFA} ，(iii) Allan 分散の対数勾配 μ ，(iv) Goh-Barabasi バースト性指数 B ，(v) 打ち切りべき分布の最尤適合率—を適用したところ、いずれの指標も臨界目標値に到達せず、

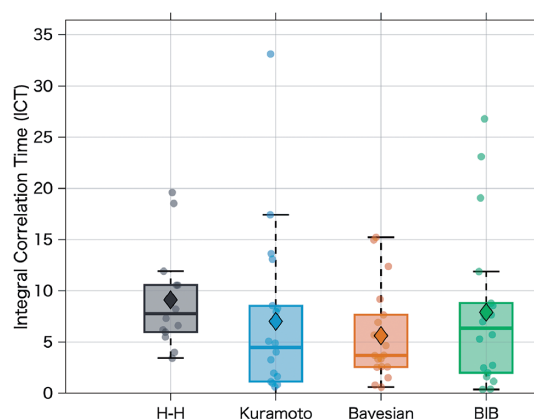


図5 SE 自己相関関数の積分相関時間 (ICT) の比較。H-H (14.46) に対し BIB (8.92) が最も近く、Bayes (5.63)・Kuramoto (3.30) を上回る

4 条件間の Kruskal-Wallis omnibus 検定はいずれも有意ではなかった (β : $p = 0.45$, α_{DFA} : $p = 0.54$, μ : $p = 0.63$, B : $p = 0.49$)。先行のジャンケンゲーム研究で観察されたべき分布的臨界性は、本タッピング課題の時間スケールでは現れないことが明らかになった。

代わりに浮上した本質は「分布形状・時間相関・対称性の多面的再現」である。BIB モデルの優位性は、逆ベイズ更新による (i) 低確率仮説の経験的カーネル置換、(ii) H-H 由来の記憶長パラメータ $L = 7$ ，(iii) 対数正規事前分布、の三要素に帰属する。これらの組合せにより、機械側が固定された予測則に拘束されることなく、人間と同じぐらい不安定に揺らぎながらも破綻せずに協調する「臨界的協調」を実現したと解釈できる。さらに「人間らしさ」は単一指標では評価できず、Sample Entropy では Kuramoto が H-H に近いなど、指標ごとに最良モデルが異なる多面的な特性であることが示された。RMSE 単独では捉えられない「分布・相関・バイアス」のパターンこそが、人間-機械協調の本質的な評価軸であることを本研究は示唆する。

6. 結論と今後の展望

本研究の貢献は次の3点に集約される：(1) 長期 (280 サイクル) データによる協調適応過

程の定量化と、ITI 対数正規性・SE 対称性・双方向 Granger 因果という再現性ある H-H 参照基底の確立、(2)「予期の硬さ」軸上での 3 モデル比較による BIB モデルの H-H 再現性能の統計的実証 (SE バイアス・KS 距離・ τ_{ICT} の 3 指標すべてで BIB が最良)、(3)「人間らしさ」を多面的に評価する分析フレームワーク (分布形状×相関構造×時間複雑性) の構築。

学術的意義としては、人間 - 機械協調研究に「予期の柔らかさ」という新たな設計軸を導入し、Gunji の自然生まれ知能 (NBI) 理論の最初の工学的具体実装として NBI 型 HAI への展開可能性を示した点が挙げられる。技術的には、ノイズ付加ではなく信念構造の動的書き換えによって人間的不安定性を表現する制御則を提示した。

今後の展望として、(a) β (逆ベイズ確率) と L (記憶長) のオンライン適応化、(b) 楽器演奏・対話・運転支援・遠隔協調操作等の実応

用への展開、(c) Friston の能動的推論および自由エネルギー原理との理論的統合、(d) より長期・大規模なサンプルでの $1/f$ 臨界性の再検証、(e) 視覚モダリティを含むマルチモーダル協調への拡張、を計画している。

[成果の発表, 論文など]

Matsui, T., Sasai, K.: Trilemma of human-agent interaction. *Discover Artificial Intelligence*, 6, 4 (2026). DOI: 10.1007/s44163-025-00706-x.

永井友貴: BIB 推論に基づくやわらかい予期モデルの協調タッピング課題への適用, 令和 7 年度 茨城大学大学院理工学研究科 修士論文 (2026 年 2 月).

笹井一人: 天然社会と新世代のヒューマン・エージェントインタラクション, 第 4 回「新世代のネットワーク・エージェント構想」研究会 (2025).

笹井一人: 協力ゲームにおける時間の非同期性, 第 18 回内部観測研究会・第 39 回 SICE-SI 共創システム部会研究会 (2025).

永井友貴, 笹井一人: 拡張ベイズ推論アルゴリズムを用いた協調タッピング課題の分析, 第 25 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2024), pp. 620-624.