

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

○永井 友貴（茨城大学）, 笹井 一人（茨城大学）

Analysis of Cooperative Tapping Tasks Using Extended Bayesian Inference Algorithm

○ Yuki NAGAI (Ibaraki Univ.), and Kazuto SASAI (Ibaraki Univ.)

Abstract: This study investigates the timing control mechanisms in human communication through an alternate cooperative tapping task, with a particular focus on developing models capable of accurately representing non-stationary states. We implemented and compared three models: the Synchronization Error Averaging (SEA) model, the Bayesian model, and the Bayesian Inverse Bayesian (BIB) inference model. Experiments involving human participants interacting with these models in an alternate cooperative tapping task were conducted. Results revealed that all models exhibited phase inversion of Synchronization Error (SE), a characteristic observed in human-to-human tapping. Notably, the Bayesian and BIB inference models demonstrated a negative correlation between the preceding SE and Inter Tap-onset Interval variation (ITIV), suggesting a closer approximation to human timing control mechanisms compared to the SEA model. Furthermore, these models showed larger ITI amplitudes than the SEA model, indicating a more dynamic response to timing adjustments. Our findings provide valuable insights into human timing control processes and offer a foundation for developing more natural human-machine interaction systems. This research contributes to the broader understanding of communication timing in both human-human and human-machine contexts, paving the way for more sophisticated and adaptive interactive systems.

1. 緒言

人間のタイミングを合わせる能力は、コミュニケーションにおいて極めて重要な役割を果たしている。例えば、対話における適切な発話タイミングの制御¹⁾や、相手の発話に合わせた傾きのタイミング調整²⁾などが挙げられる。この能力は人間同士のコミュニケーションにとどまらず、人間と機械のインタラクションにおいても重要である。歩行支援ロボットの開発では、人間の歩行リズムに合わせたアシストのタイミング制御が不可欠となる³⁾。このように、人間のタイミング制御能力の理解は、人間生活を営む社会をより一層豊かにするシステムの構築に直接的に寄与する。

人間社会により適したシステムを構築するためには、人間自体の深い理解が不可欠である。特に、タイミングを合わせる能力のメカニズムを解明することは、人間らしい振る舞いを示すシステムの開発につながる重要な課題である。この能力を科学的に測定し、分析するための実験手法として、タッピング課題⁴⁾が広く用いられてきた。

タッピング課題は、一定のリズムに合わせて指でタップを行う比較的単純な課題である。特に、人間同士で行うタッピング課題を協調タッピング課題と呼び、これは双方向的なタイミング共有過程を調べる実験として注目されている⁵⁾。協調タッピング課題では、一方のタップが他方にとっての刺激となるような設定となっており、人間の対面コミュニケーションにおいて重要な「間（ま）」の共有の解明につながると考えられている⁶⁾。

協調タッピング課題の安定な定常過程については、すでに中島らによって相関解析に基づいて二重化されたモデルが示されている⁷⁾。一つ目のモデルは、ITI（タップ間間隔）が直前のSE（同期誤差）から影響を受けるというものである。二つ目のモデルは、ITIがSEの履歴の総和から影響を受けるというものであり、これは初期ITIにSEの履歴を加えることで現在のITIが求められるという記憶的過程と解釈できる。

しかし、人間同士の協調タッピング課題においては、突然安定性が崩れる場面、すなわち非定常状態が存在することが知られている⁷⁾。この非定常状態は、コミュニケーションにおける創造的な逸脱や予測不可能な変化を反映している可能性があり、人間らしさを理解する上で極めて重要な要素である。

既存のモデルは、安定な定常過程のみをモデル化しており、非定常な時間変動成分や被験者の個体差をノイズとしてしか評価できないという本質的な限界がある。そのため、人間のタイミング制御機構の全体像を捉えるためには、この非定常状態を適切に表現できる新たなアプローチが必要となっている。

そこで本研究では、この非定常状態をBIB推論（ベイズ-逆ベイズ推論）⁸⁾を用いて表現することを試みる。BIB推論は、郡司らによって提案された人間の創造性を加味した推論モデルであり、非定常化における意思決定プロセスを反映できる特徴を持っている。この手法は、生物の群れの行動や人間の歩行パターンなど、生物的な振る舞いについて一定の説明性を有しており⁹⁾、さらにジャンケンゲームやチキンレースゲーム¹⁰⁾などの人間同士の相互作用を伴う状況においても、人間らしい振る舞いを再現できることが示されている。

BIB推論を協調タッピング課題に適用することで、従来のモデルでは捉えきれなかった非定常状態を表現し、人間のタイミング制御機構に関する新たな知見を得ることを目指す。このアプローチが成功すれば、より人間的な協調タッピングモデルが構築され、コミュニケーションにおけるタイミング共有の本質的な理解が深まることが期待される。さらに、この研究成果は、人間と機械のより自然なインタラクションを実現するシステムの開発や、創造的なコミュニケーションを支援する技術の創出など、幅広い応用可能性を持つものと考えられる。

以上のように、本研究は人間のタイミング制御能力の解明を通じて、人間社会をより豊かにするシステムの構築に貢献することを目指すものである。

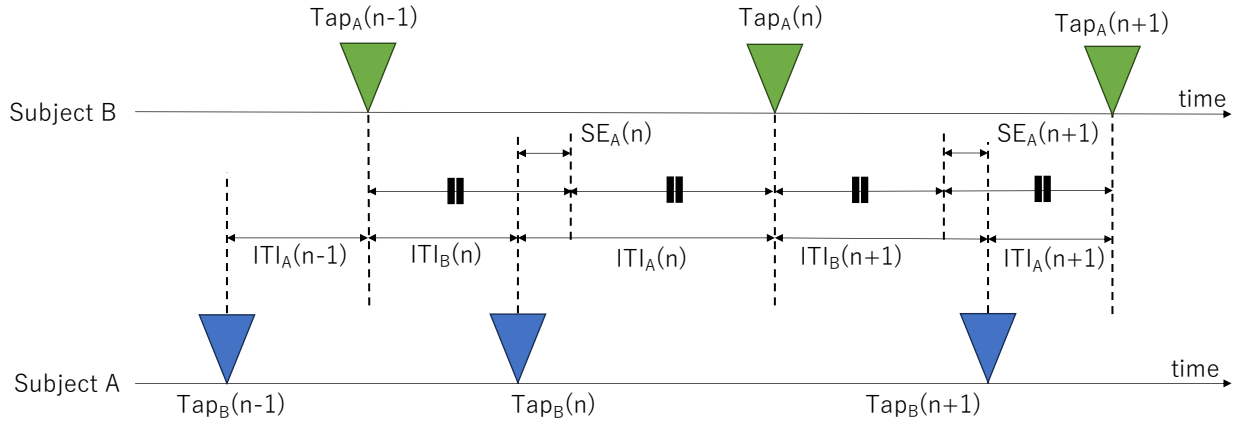


Fig. 1 交互タッピング課題における時間的關係

2. 実験手法

2.1 タスク

本研究では、交互タッピング課題を用いて実験を行う。実験の手順は以下の通りである。まず、被験者に刺激音を提示し、連続する刺激音のちょうど中間の時刻に合わせてボタンを押すよう指示する。実験は2つのステージから構成される。Stage1では、最初の10Tapにおいて周期1000msの一定周期のリズム音刺激 (ISI: Inter Stimulus-onset Interval) を被験者に与える。これは、課題のみでは被験者のタップが徐々に加速し、最終的にはタップが止まってしまう可能性があるためである。Stage2は11Tap目から開始され、一定周期の音刺激が消え、被験者とアルゴリズムの相互作用のフェーズに入る。Tap回数については、Stage1の10Tapに続く120Tapのデータを取得する。ただし、不安定な挙動を示す相互作用開始直後の10Tapとラストの10Tapを除いた100Tap分を有効データとして解析に用いる。ボタン押し動作は右手人差し指でスペースキーを押下して行う。また、右手人差し指以外の体の部位を使ってリズムを取ることを禁止する。

2.2 被験者

本研究の被験者は、健常な20代の男性6名にボランティアで依頼した。被験者はいずれも右利きであり、提示される音刺激を聞き取るにあたって聴覚的障害はなかった。

2.3 実験システム

実験環境として、刺激の提示と反応の記録は自作のプログラムにより制御される。使用するPCはApple社製のiMac (2019年モデル) であり、刺激の提示にはaudio-technica社製のヘッドフォン (ATH-770XCOM) を用いる。システムの実装にあたっては、プログラミング言語としてPythonを採用し、開発環境にはPsychoPy

を使用する。タッピングアルゴリズムとしては、SEAモデル、ベイズモデル、及びBIBモデルの3種類を実装する。これらのアルゴリズムは、音刺激の刺激間隔 (ITI) を決定するために用いられる。

2.4 特徴量

本研究では、交互タッピング課題における特徴量として、非同期量 (SE: Synchronization Error) とタップ周期 (ITI: Inter Tap-onset Interval) を用いる。これらの特徴量は、記録された n 番目のボタン押し時刻 $Tap(n)$ を基に計算される。非同期量 SE は、一方の連続するタップの中間時刻が他方のタップとどれだけ離れているかを示す値である。SE が0の場合、両者が完全な逆位相で交互タッピングできていることを意味する。SE が負の値の場合はタップが早く、正の値の場合は遅いことを示す。タップ周期 ITI は、連続する同一被験者のタップ間の時間間隔であり、以下の式で定義される。(Fig.1)

$$SE_A(n) = Tap_B(n) - \frac{Tap_A(n-1) + Tap_A(n)}{2}$$

$$ITI_A(n) = Tap_A(n) - Tap_B(n)$$

さらに、本研究では SE と ITI の変化量 (δSE と δITI) も特徴量として導入する。これらは以下のように定義される。

$$\delta SE(n) = SE(n) - SE(n-1)$$

$$\delta ITI(n) = ITI(n) - ITI(n-1)$$

2.5 bot

タッピングアルゴリズムの実装について説明する。実装言語はPython、開発環境はPsychoPyを使用した。音刺激のITIを決定するアルゴリズムとして、SEAモデル、ベイズモデル、BIBモデルの3種類を用意した。

2.5.1 SEA モデル

SEA モデル (Synchronization Error Averaging) は、過去の刺激音の非同期量 (SE) の平均を用いて、次の音刺激のタップ周期 (ITI) を決定するモデルである。このモデルの特徴は、過去の非同期量の総和を考慮してタップ周期を調整することにある。具体的な計算方法は以下のとおりである。まず、時刻 Tap(n) までに発生した全ての非同期量 SE の平均を算出する。次に、この平均値を初期の ISI (刺激間隔) の半分の値から引く。この結果得られた値を、新たな正規分布の平均として使用する。最後に、この正規分布からランダムに値を選び、それを次の音刺激のタップ周期 ITI(n) とする。この正規分布の標準偏差を σ とし、標準正規分布 (平均 0、標準偏差 1) からランダムに選んだ値を Z とすると、ITI(n) を決定する数式は以下のように表現できる：

$$ITI(n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} SE(i) - \frac{1}{2} ISI + \sigma Z$$

この方法により、SEA モデルは過去の非同期量の傾向を反映しつつ、ある程度のランダム性も持たせたタッピングパターンを生成することができる。

2.5.2 ベイズモデル

ベイズモデルは、過去の刺激音の非同期量 (SE) データをもとにベイズ推定を用いて事後分布を求めるモデルである。このモデルの特徴は、新たに得られたデータと過去の経験を組み合わせて、不確実な事象を予測することにある。具体的な計算方法は以下のとおりである。まず、時刻 Tap(n) で発生した非同期量 SE(n) が求まるたびに、そのデータをもとにベイズ推定を用いて事後分布を算出する。次に、この事後分布からランダムにサンプリングした推定値を用いる。最後に、この推定値を ISI の半分の値から差し引いた値を、次の音刺激のタップ周期 ITI(n) とする。ベイズモデルにおける ITI(n) を決定する数式は以下のように表現できる：

$$ITI(n) = \frac{1}{2} ISI - \text{sample}(P(h|d))$$

ここで、 $P(h|d)$ は事後分布を表し、 $\text{sample}()$ は事後分布からのランダムサンプリングを表す。この方法により、ベイズモデルは過去のデータの傾向を反映しつつ、新たなデータに基づいて柔軟に適應するタッピングパターンを生成することができる。

2.5.3 BIB モデル

一方、BIB モデル (拡張されたベイズ推定) は、非定常状態に柔軟に対応するために逆ベイズ推論を用いたモデルである。このモデルの特徴は、通常のベイズ推定に加えて、最も確率の低い仮説を更新することで、環境の急激な変化にも対応できる点にある。BIB モデルの具体的な計算方法は以下のとおりである。まず、ベイズモデルと同様に、時刻 Tap(n) で発生した非同期量 SE(n) が求まるたびにベイズ推論を行う。次に、得られた仮説の中で最も確率が低い仮説を、これまでの非同期量 SE の平均で置き換える。その後、更新された事後分布からサンプリングした推定値を用いる。最後に、この推定値を ISI の半分の値から差し引いた値を、次のタップ周期 ITI(n) とする。BIB モデルにおける ITI(n) を決定する数式は以下のように表現できる：

$$ITI(n) = \frac{1}{2} ISI - \text{sample}(P'(h|d))$$

ここで、 $P'(h|d)$ は最も確率の低い仮説を更新した後の事後分布を表す。この方法により、BIB モデルは過去のデータの傾向を反映しつつ、環境の急激な変化にも柔軟に対応できるタッピングパターンを生成することができる。

3. 実験結果

本実験では、SEA モデル、ベイズモデル、および BIB モデルの 3 種類のモデルを用いて、人間との交互協調タッピング課題を実施した。得られた結果を以下に示す。

3.1 ITI と SE の時間発展

すべてのモデルにおいて、音刺激に被験者が追従するようリーダ・フォロワー関係が観察された。SEA モデルでは、音刺激と被験者の ITI (Inter Tap-onset Interval) がほぼ同じ時間長で安定に推移し、タッピングが同期していた。一方、ベイズモデルと BIB モデルでは、音刺激の ITI の振幅が SEA モデルと比べて大きくなる傾向が見られた。(Fig.2) SE の時系列データを分析すると、すべてのモデルにおいて音刺激と被験者の位相が反転する傾向が確認された。これは人間同士の協調交互タッピングにも見られる特徴である¹¹⁾。また、被験者の方が SE の負の値が出やすく、振幅が大きくなる傾向があった。SEA モデルは他のモデルと比べて SE の値が小さくなった。(Fig.3)

3.2 散布図による統計解析

統計解析の結果、以下の有意な相関関係が確認された：

3.2.1 被験者の SE-ITI_v

すべてのモデルにおいて、被験者の SE と δITI の間に負の相関関係が見られた。これは被験者が自分のタッピングが早すぎたと感じた場合、次のタップを遅らせようとする傾向を示している。SEA モデルと BIB モデルではかなりの相関関係が、ベイズモデルでは強い相関関係が認められた。(Fig.4)

3.2.2 被験者の SE_v-ITI_v

被験者の δSE と δITI の間にも、すべてのモデルにおいて負の相関関係が見られた。SEA モデルではやや相関関係があり、ベイズモデルと BIB モデルではかなりの相関関係が認められた。(Fig.5)

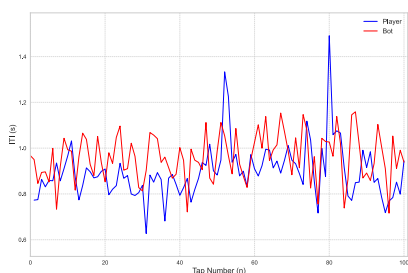
3.2.3 モデルの SE-ITI_v

ベイズモデルと BIB モデルにおいて、モデルの SE と δITI の間にやや負の相関関係が認められた。これはベイズ推論と BIB 推論の新たな証拠をもとに次の推論で使用する事前確率を更新する性質によると考えられる。一方、SEA モデルではほとんど相関関係が見られなかった。(Fig.6)

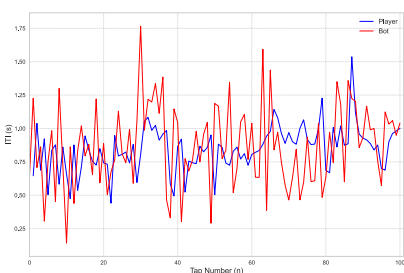
3.3 実験評価

本実験で得られた主な結果は以下の通りである：

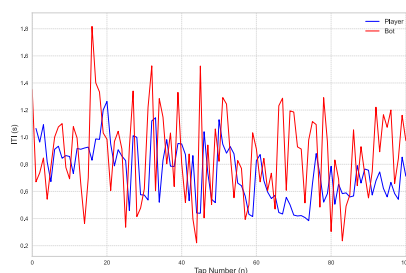
- 3 種類のモデルと人の交互協調タッピング実験を行い、そのタップ時間の時間発展を計測することに成功した。
- ベイズモデルと BIB モデルの ITI の振幅は、SEA モデルのものより大きくなる傾向があった。



(a) SEA モデル

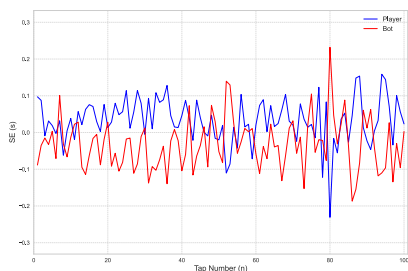


(b) バイズモデル

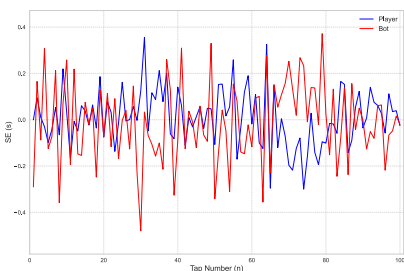


(c) BIB モデル

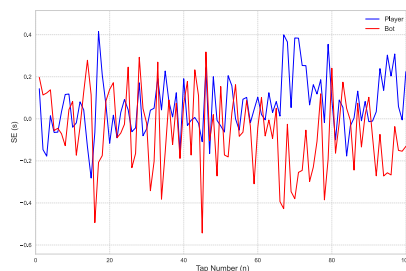
Fig. 2 ITI の時間発展



(a) SEA モデル

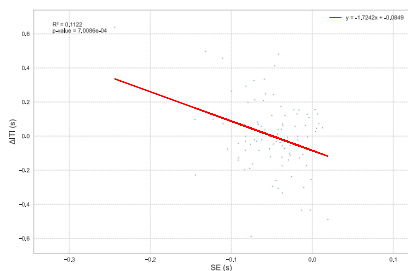


(b) バイズモデル

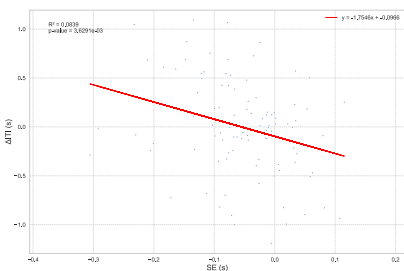


(c) BIB モデル

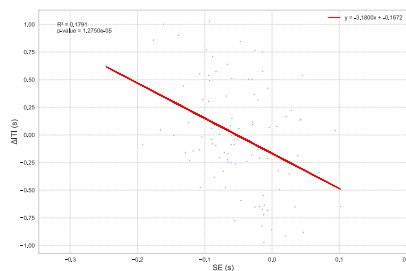
Fig. 3 SE の時間発展



(a) SEA モデル

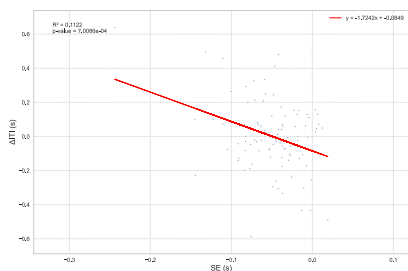


(b) バイズモデル

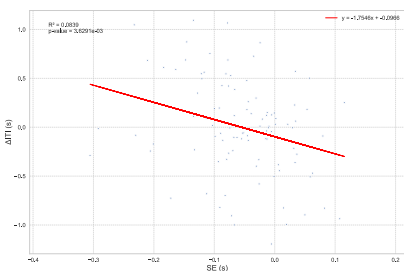


(c) BIB モデル

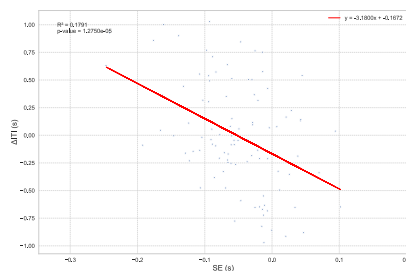
Fig. 4 被験者の SE-Δ ITI



(a) SEA モデル

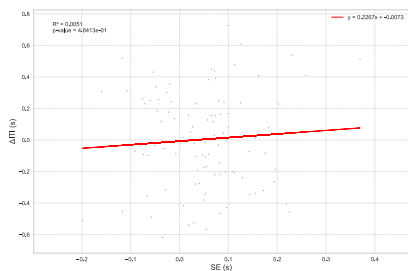


(b) バイズモデル

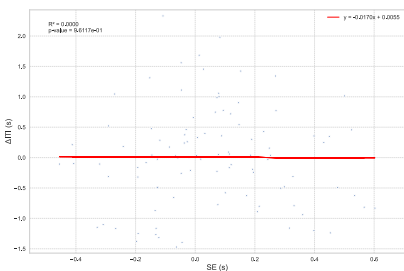


(c) BIB モデル

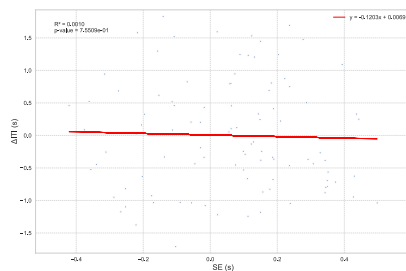
Fig. 5 被験者の Δ SE-Δ ITI



(a) SEA モデル



(b) バイズモデル



(c) BIB モデル

Fig. 6 モデルの SE-Δ ITI

- すべてのモデルにおいて音刺激と被験者の SE の位相が反転する傾向が見られた。
- すべてのモデルにおいて被験者の SE-ITiv および SEv-ITiv の間に強い負の相関が見られた。
- ベイズモデルと BIB モデルにおいてモデルの SE-ITiv の間にやや負の相関が見られたが、SEA モデルでは見られなかった。

これらの結果から、ベイズモデルと BIB モデルが SEA モデルと比べて人間の思考により近いことが示唆された。すべてのモデルにおいて音刺激と被験者の SE の位相が反転する傾向が見られたことから、モデルと人間のタイミング制御のインタラクションが実現できたと言える。

また、ベイズモデルと BIB に見られた、モデルの SE-ITiv の間のやや負の相関は、直前の誤差により次の ITI が影響を受けたことを意味する。これは人間同士の協調タッピングにも見られる傾向である¹¹⁾ ため、これらのモデルがより人間に近いモデルであると考えられる。

4. 結言

本研究では、人間のコミュニケーションにおけるタイミング機構を解明するために、協調交互タッピング課題を用いた実験を行った。人間と協調タッピングを行うモデルとして、SEA モデル、ベイズモデル、BIB 推論モデルを用意し、比較検討を行った。得られた主な結果は以下の通りである。

- すべてのモデルにおいて、人間同士のタッピングでも見られる特徴である、SE の位相の反転が観察された。
- ベイズモデルと BIB 推論モデルでは、直前の SE と ITiv に負の相関関係が見られた。これは人間の思考により近い特性を示している可能性がある。
- SEA モデルと比較して、ベイズモデルと BIB 推論モデルの ITI の振幅が大きくなる傾向が確認された。
- すべてのモデルにおいて、被験者の SE-ITiv および SEv-ITiv の間に強い負の相関が観察された。

これらの結果は、ベイズモデルと BIB 推論モデルが、SEA モデルと比較して人間のタイミング制御メカニズムをより良く模倣できている可能性を示唆している。特に、モデルの SE-ITiv の間に見られたやや負の相関は、人間同士の協調タッピングにも観察される特徴であり、これらのモデルの妥当性を支持するものである。

本研究の成果は、人間のタイミング制御機構の理解を深めるとともに、より自然な人間-機械インタラクションの実現に向けた基礎的知見を提供するものである。

また今後の課題としては、以下の点が挙げられる。

- 協調同期タッピング課題におけるベイズモデルと BIB 推論モデルの適用と検証
- 非同期状態における BIB 推論モデルの優位性の詳細な検証
- 非定常過程を含むより複雑なコミュニケーション場面への適用

これらの課題に取り組むことで、人間のコミュニケーションにおけるタイミング制御メカニズムのより

包括的な理解が可能となり、より自然で柔軟な人間-機械インタラクションシステムの開発につながる事が期待される。

参考文献

- [1] 三宅, 辰巳, 杉原. 交互発話における発話長と発話間隔の時間的階層性. 計測自動制御学会論文集 40.6, pp. 670–677, (2004).
- [2] 菊池, 白井. 対話効率の向上を目的とした音声対話制御のモデル化. ヒューマンインタフェース学会論文誌 2.2, pp. 145–152, (2000).
- [3] 三宅美博. コミュニティ・インタフェースへ向かう共創システム: 歩行介助システム Walk-Mate を介する場づくり. 日本ロボット学会誌 24.6, pp. 700–707, (2006).
- [4] L. T. Stevens. On the time sense. Mind 11, pp. 393–404, (1989).
- [5] 今, 三宅. 協調タッピングにおける相互相関解析に基づいたモデルの提案. 第 17 回自立分散システム・シンポジウム資料. (2003), pp. 213–218.
- [6] 三宅美博. 共創的コミュニケーションと「間(ま)」. バイオメカニズム学会誌 36.2, pp. 97–100, (2012).
- [7] 中島, 三宅. 交互協調タッピングの相互相関解析に基づくモデル化. 第 18 回自立分散システム・シンポジウム資料. (2006), pp. 277–282.
- [8] Y.-P. Gunji et al. Inverse Bayesian inference as a key of consciousness featuring a macroscopic quantum logical structure. Biosystems 152, pp. 44–65, (2016).
- [9] Y. Gunji, K. Sonoda, and V. Basios. Quantum cognition based on an ambiguous representation derived from a rough set approximation. Biosystems, (2016).
- [10] T. Sekine and K. Sasai. Behavior Comparison in Game of Chicken with Cards Based on Bayesian Inference Model. Proceedings of the AROB-ISBC-SWARM 2023, pp. 1349–1353, (2023).
- [11] 朝日健太, 中島壮人, 三宅美博. 2 種類の協調タッピング課題における相互同調過程の解析. ヒューマンインターフェースシンポジウム論文集. Vol. 1414. (2006), pp. 241–244.