



脳を制御する理論

東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 准教授
大泉 匡史 (Masafumi Oizumi)

脳は自分自身を制御するシステムだと考えられます。その制御の仕組みを解き明かすことができれば、脳を望む状態へ導くことが可能になるかもしれません。我々は現在、脳の制御性の解明に取り組んでいます。例えば覚醒時の制御性と睡眠時・疲労時の制御性は著しく違うはずです。このような制御性の違いに基づいて脳の状態を分類できるのかを調べるのが本研究の目標の一つです。脳の制御性がわかると、今度は脳を希望の状態に近づけるにはどうしたら良いか、最適な制御は何かという問題にアプローチできます。これが本研究が目指すもう一つの方向性です。

脳がどのように制御できるかを探る

1. 摂動によるシステム同定 (Ogino et al, bioRxiv, 2025) : 脳の制御を実現するには、脳活動の時間変化、ダイナミクスの特徴をなるべく正確にモデル化・推定する必要があります。この正確な推定には、単に脳活動を観測するだけでなく「摂動入力」を与えて、脳活動の応答を観測することが有効であることが分かりています。これは、本来隠れていて見えないダイナミクスの特徴が、摂動によって見えるようになることが理由です(図1)。我々は実際に、どのような摂動入力を加えれば、最も同定精度を向上させることができるかを調べる理論を構築しました。この理論に基づくと、摂動入力の振動数をシステムが持つ固有の振動数と同じにしたときが最も効率的にシステム同定が可能になります。

これらの結果は、経頭蓋磁気刺激法(TMS)等の脳刺激を用いた脳状態の弁別の有効性も裏付けています。今後、実データでの有効な摂動入力の同定などの検証を行っていきます。

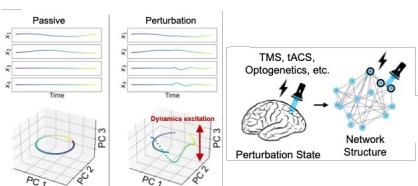


図1 刺激による見えないダイナミクスの励起

2. 脳の制御性による状態の分類 (Shikauchi et al, bioRxiv, 2025) : 脳は、安静状態から運動活動への移行のように、状態間を遷移する制御システムとみなすことができます。本研究では、可制御性グラミアンという制御指標を導入することで、脳の状態の制御性を推定する簡単な方法を提案しました(図2)。この方法は、制御理論に基づき、インパルス刺激のときに可制御性グラミアンが時系列データXのGram行列として表されることを用いたものです。可制御性グラミアンを導入することで、状態の制御のしやすさ(グラミアン固有値の大きさ)と制御の方向(グラミアンの固有ベクトルの方向)を評価でき、脳の制御性がどの方向に、どれだけ制御できるかという2つの軸で完全に記述することが可能となります。データ解析では運動状態および安静状態における経頭蓋磁気刺激法(TMS)-脳波(EEG)のデータに提案手法を適用し、計6種類の脳の状態を制御性の観点から特徴付けました。結果、一部の脳状態の制御方向性に違いがあることが分かりました。

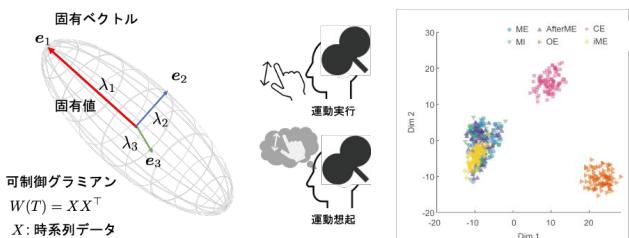


図2 可制御性グラミアンの固有値分解イメージと運動タスクにおける分類性のプロット

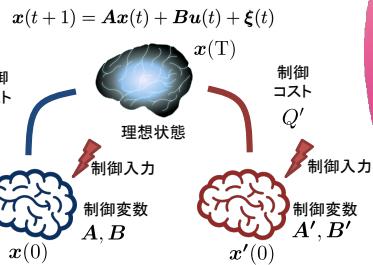
成果のまとめ

本研究では、以下の成果を得ることができました。

- [1] システム同定における摂動入力の最適なデザイン (Ogino et al, bioRxiv, 2025)
- [2] インパルス刺激で可制御性グラミアンを推定する簡単な方法の提案 → EEGデータに応用して運動状態弁別 (Shikauchi et al, bioRxiv, 2025)
- [3] 確率的なシステムにおける制御コストの量化 → ヒトfMRIデータに応用して様々なタスク状態への遷移コストの量化と貢献する領域の同定 (Kamiya et al, Journal of Neuroscience, 2023)
- [4] 状態維持コストと神経振動を結ぶ関係式の導出 → サルECOGデータに応用して覚醒状態と麻酔状態の特徴付け (Sekizawa et al, Physical Review X, 2024)

今後の展望

これまで構築してきた理論的な枠組みを実際の神経データへ適用し、脳の状態、例えば疲労度合い、覚醒レベルなどを制御性の観点から弁別することができるかを検証していきます。また、将来的には、特定の状態に脳を誘導するための最適な介入方法や、異常な制御性を修正する臨床応用にもつながると考えています。



ゆらぎありの制御コストを解明する

3. 確率的制御コストの量化 (Kamiya et al, Journal of Neuroscience, 2023) : 制御のコストを量化することは、脳が如何に制御されうるか、そして脳の状態を制御する際に、どの脳領域が最も重要であるかを明らかにするために必要です。脳の制御性を明らかにする上で一つの困難は、脳活動データはノイズが大きく、そのダイナミクスは確率的であることです。従来研究では、この確率的なゆらぎが無視されてきましたが、これでは制御コストの正確な推定は困難です。本研究では、神経ダイナミクスの確率的なゆらぎを考慮した制御コストの新しい量化枠組みを構築しました。確率的制御コストの解析的表現を確立し、そのコストを平均の制御コストと共分散の制御コストに分解できることを示しました。提案した指標の有用性は、ヒトの全脳イメージングデータを用いて確認し、安静状態から7つの認知課題状態への制御において、重要な脳領域を同定しました。結果、これらの制御を実現する際には、下位視覚野が平均の制御において共通して重要な役割を果たし、一方で後帯状皮質が共分散の制御において共通して重要な役割を果たすことを見出しました。

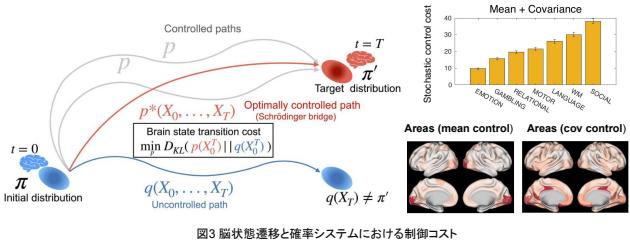


図3 脳状態遷移と確率システムにおける制御コスト

4. 热力学的維持コスト (Sekizawa et al, Physical Review X, 2024) : 脳が現在の状態を別の状態に変化させる際に制御コストがかかりますが、現在の状態を維持し続けることにも制御コストがかかります。この維持コストは確率熱力学を応用することで量化することができます。我々は、脳の神経振動と確率熱力学で使用されるエントロピー生成率の関係性を導きました。まず、全体のエントロピー生成率のうち確率分布の維持に関する「維持エントロピー生成率」が、独立した正の寄与として振動表現で分解できることを数理的に示しました(図4)。具体的には、振動数の2乗と振幅をかけたものの和がエントロピー生成と一致します。つまり、振動数が速いほど維持コストがかかります。また、提案手法をサルの脳波データに適用したこと、覚醒状態と麻酔状態では振動の寄与に明確な違いが見られました。具体的には、麻酔状態ではデルタ波の寄与が増え、シータ波などの高周波成分の寄与は減少していました。これにより、脳の状態変化に伴う神経振動の特徴を、熱力学的な散逸や情報処理の限界という物理的視点から解釈できることが示されました。

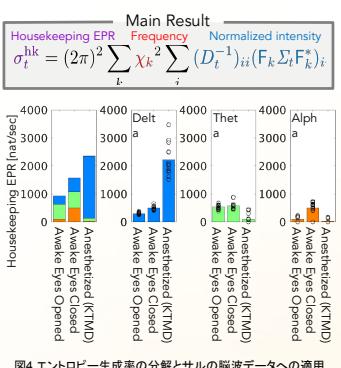


図4 エントロピー生成率の分解とサルの脳波データへの適用

氏名 大泉 匡史 (Masafumi Oizumi)

東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 准教授
東京大学理学部物理学科卒業。東京大学大学院新領域創成科学研究科 矢田真研究室にて博士取得。2019年4月より現職。博士取得後から2017年3月まで、理化学研究所脳科学総合研究センター 甘利俊一チームに所属。2011年10月から2013年10月まで米国ミシガン大学 Giulio Tononi研究室に所属。2015年4月から2016年10月まで米国マサチューセッツ工科大学 土谷尚嗣研究室に所属。2017年3月から2019年3月まで株式会社アラヤ技術部基礎研究グループに所属。

東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 大泉研究室

氏名 荻野幹人 (代表発表者)

肩書 特任研究員

氏名 鹿内友美

肩書 特任研究員(当時)

氏名 神谷俊輔

肩書 博士課程学生(当時)

氏名 関澤太樹

肩書 博士課程学生