

高次元カオスを活用したカオスの遍歴の設計手法の提案

1. 発表者：

井上 克馬（東京大学 大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 博士後期課程 2 年）

中嶋 浩平（東京大学 大学院情報理工学系研究科 情報理工学教育研究センター

・ 連携研究機構 次世代知能科学研究センター 准教授）

國吉 康夫（東京大学 大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻 教授

/ 連携研究機構 次世代知能科学研究センター センター長）

2. 発表のポイント：

- ◆高次元カオス力学系上に、カオスの遍歴と呼ばれる非線形現象の局所的なパターン(擬似アトラクタ)と大域的な遷移則の双方を自在に設計する手法を提案しました。
- ◆一般に高次元カオス力学系の制御は困難ですが、リザーバーコンピューティングと呼ばれる機械学習の手法を応用して、系が生み出すダイナミクスの複雑さを積極的に活用することで、系の部分的なパラメータ調整のみでカオスの遍歴を設計します。
- ◆カオスの遍歴は自発的行動切り替えや記憶の想起といった脳の情報処理における重要な役割を担っているという報告もあり、設計者による明示的な内部構造の規定を必要としない本提案手法は、将来的に物理系のダイナミクスを積極的に活用したニューロモフィックデバイスの制御手法の確立に貢献することが期待されます。

3. 発表概要：

カオスの遍歴は高次元非線形力学系特有の現象であり、いくつかの低次元な安定状態と、それらの間の不規則な遷移によって特徴づけられます。これまでカオスの遍歴と解釈できる時系列パターンは脳活動において見出されるのみならず、記憶やその想起等の動物の認知機能がカオスの遍歴を介して構成される可能性が指摘されてきました。それ故に、高度な認知システムの実現を目指す認知発達ロボティクスの文脈で、カオスの遍歴を介して認知ロボットを制御する試みがなされてきました。しかしながら、従来手法では安定状態や遷移パターンに応じてシステムの内部構造を設計者があらかじめ綿密に設計する必要がありました。

東京大学大学院情報理工学系研究科 國吉・新山研究室の井上 克馬大学院生および次世代知能科学研究センター（AI センター）の中嶋 浩平准教授らの研究グループは、カオスの遍歴の擬似アトラクタとその大域的な遷移則双方を高次元カオス力学系上に自在に設計する手法を提案しました。この設計手法はリザーバーコンピューティングと呼ばれる機械学習の手法に立脚し、高次元カオス軌道が持つ複雑で多様な情報表現能力を積極的に活用することで、明示的なモジュールや階層構造をあらかじめ設定せずに部分的なパラメータの学習のみで達成されます。また、この特長により本提案手法は相互作用の調整が困難な物理系にも適用しやすく、物理系や材料の固有のダイナミクスを積極的に活用するニューロモフィックデバイスの制御手法の確立に貢献することが期待されます。

4. 発表内容：

<研究の背景>

高次元カオス力学系(注 1)では、擬似アトラクタと呼ばれる準安定的な状態が存在し、その安定状態に一時的に停留したのちに別の安定状態に自発的かつ不規則に遷移する、カオスの遍歴

(注 2)と呼ばれる現象がしばしば観察されます。これまでカオスの遍歴は非線形力学系の分野のみならず、神経科学の分野でも研究がなされ、カオスの遍歴と解釈できる時系列パターンが脳活動において見出され、記憶やその想起等の動物の認知機能がカオスの遍歴を介して構築される可能性が指摘されてきました。また、これらの神経科学的知見に触発され、高度な認知システムの設計を目指す認知発達ロボティクスの分野では、カオスの遍歴とその擬似アトラクタを介してロボットの自律的な行動生成(例えば、複数の行動のレパートリをランダムに切り替えるような階層的な行動を含む)を実際の脳のように一貫したシステムの中で実現する試みがなされてきました。

しかし、従来の手法では所望の行動やその特性に応じて、ロボットの制御器(この場合脳に相当する)の内部構造を設計者が緻密に設計する必要があり、行動のレパートリの追加や行動の切り替え方の調整のような動的な行動生成を行わせる上での支障となっていました。また、高次元カオス力学系のダイナミクス(内部状態の時間発展)の設計は、力学系内部の多くの相互作用パラメータの調整を必要とするために、一般的に不安定かつ計算量的に高コストであり、カオスの遍歴の特性を適応的かつ素早く設計するのは困難でした。

<研究内容・将来の展望>

東京大学大学院情報理工学系研究科 國吉・新山研究室の井上克馬大学院生及び次世代知能科学研究センター (AI センター) の中嶋浩平准教授らの研究グループは、高次元カオス力学系上で、カオスの遍歴の擬似アトラクタとその大域的な遷移則双方を自在に設計する手法を提案しました。

提案手法におけるカオスの遍歴の設計は、リザーバーコンピューティング(注 3)と呼ばれる非線形力学系を制御・活用する機械学習フレームワークに立脚し、与えられた高次元カオス力学系が生み出す複雑な時系列情報(高次元カオス)を積極的に活用することで達成されます(図 1)。

これにより、明示的なモジュールや階層構造を設計者があらかじめ与えることなく、高次元カオス力学系内の部分的なパラメータの学習で、所望の擬似アトラクタの軌道及び擬似アトラクタ間の遷移則の両方を高い操作性で設計できることが示されました (図 2)。

この部分的なパラメータを調整する学習方式は、誤差逆伝搬法等で力学系のパラメータ全体の学習を伴う従来手法と比較したとき、計算量的に低コストでかつ安定的であるため、素早い調整が求められるロボットの制御器の構成において活用されることが期待されます。加えて本研究は高次元カオスを積極的に用いることで、従来忌避されがちであった高次元カオス力学系の情報処理能力に光を当てました。

高次元カオスは脳活動に限らず物理系において普遍的に観測される現象であり、物理系上に脳と同等な情報処理の実装を目指すニューロモフィックデバイス(注 4)の制御アルゴリズムを構成する上で、本提案手法が効果的に威力を発揮することが期待されます。

本研究成果は、以下の助成・研究プロジェクトによって得られました。

- 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 委託業務 (15101156-0・18101806-0)
- 日本学術振興会 (JSPS) 科研費 (JP20J12815・JP18H05472)
- 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (MEXT Q-LEAP) (JPMXS0120319794)

次世代知能科学研究センターについて

次世代知能科学研究センター（Next Generation Artificial Intelligence Research Center）、略して AI センター(AI Center) は、現状の人工知能技術の枠組みとその限界を超え、真に人間のためになり、将来の社会、産業、経済、文化、学術を駆動する新たな次世代知能科学体系の構築と応用、それを踏まえた将来社会ビジョンの提示と実現、および先進的な教育体系の構築と先端人材育成を目指し、東京大学の多様な分野が文理を越えて融合し総合力を発揮する連携研究機構として活動しています。

5. 発表雑誌：

雑誌名：*Science Advances*

論文タイトル：Designing spontaneous behavioral switching via chaotic itinerancy

著者：Katsuma Inoue*, Kohei Nakajima*, Yasuo Kuniyoshi

DOI 番号：10.1126/sciadv.abb3989

URL：<https://advances.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/sciadv.abb3989>

6. 問い合わせ先：

（研究に関するお問い合わせ）

東京大学 大学院情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻

博士後期課程 2 年 井上克馬

東京大学 大学院情報理工学系研究科 情報理工学教育研究センター・連携研究機構 次世代知能科学研究センター

准教授 中嶋浩平

（報道に関するお問い合わせ）

東京大学 大学院情報理工学系研究科

広報室

7. 用語解説：

（注 1）高次元カオス力学系：

力学系とはある時間発展の規則に従って内部状態が変化するシステムの数理的なモデルである。非線形力学系は、時間発展則が線形な写像で表現できないものの総称である。そしてカオス力学系は非線形力学系の中で、カオスと呼ばれる複雑な軌道を生み出す力学系のクラスである。カオス力学系は一般に初期値鋭敏性と呼ばれる特性を有し、初期状態におけるわずかな差分が時間発展により指数関数的に拡大される。したがって、たとえ時間発展則が既知で内部状態を把握できる状況であっても、カオス力学系の状態変化、すなわちカオスダイナミクスを完全に予測することは、無限精度の演算が要求されるため実質的に不可能である。なお高次元カオス力学系は、カオス力学系の中でも内部状態の次元数が多い(例えば本研究では 1500 次元のカオス力学系を使用)ものを指す。

（注 2）カオスの遍歴：

カオスの遍歴は高次元非線形力学系特有の現象であり、いくつかの低次元な安定状態と、それらの間の不規則かつ自律的な遷移によって特徴づけられる。初期値鋭敏性によってその大域的

な遷移の予測が困難である一方で、局所的な安定状態が繰り返し再現的に生成されるため、ある種の階層的構造がカオスの遍歴において認められる。またこの局所的な安定状態は擬似アトラクタと呼ばれ、極限的な時間発展によって定義されるアトラクタとは区別される過渡的なダイナミクスである。カオスの遍歴は光乱流系等の物理系や数値シミュレーションにおいてその存在が発見されたのみならず、脳活動やそれに伴う認知機能との関連が指摘されてきた。またこの神経科学的知見に触発されて認知発達ロボティクスの分野では、カオスの遍歴を活用することで、ロボットの自律性と階層的な行動生成を統一的に表現する試みがなされてきた。

(注 3) リザーバーコンピューティング (Reservoir Computing) :

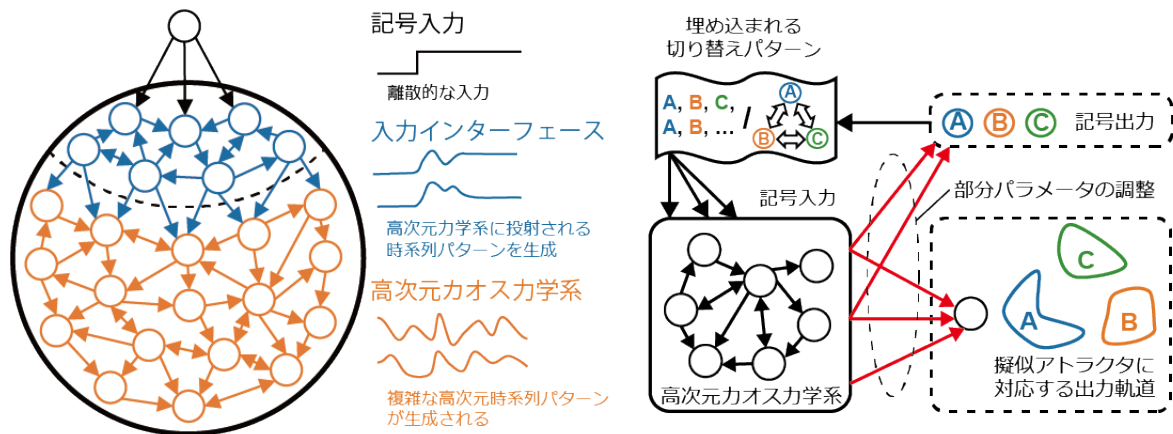
リカレントニューラルネットワークを用いた機械学習・情報処理形式の一種。ニューラルネットワークは脳の情報処理を模した数理的なモデルである。リカレントニューラルネットワークはニューラルネットワークの中でも内部に再帰的な結合を有するクラスであり、より一般的には非線形力学系の一種と解釈できる。従来のリカレントニューラルネットワークでは誤差逆伝搬法等の手法でネットワーク内部の相互結合をすべて調節し、そのダイナミクスをいわば抑圧する形で学習が行われてきた。リザーバーコンピューティングでは、内部結合を制御しない代わりに、内部状態に接続する読み出し部(リードアウト / Readout)のみを調整し、既存のダイナミクスを活用する形で学習が達成される。この性質のため、学習が従来手法に比べ低コストかつ安定的であり、またマルチタスクが容易となる。

(注 4) ニューロモーフィックデバイス (Neuromorphic Device) :

脳の情報処理を模した物理デバイスの総称。神経細胞の情報処理を忠実に再現したものに限らず、ニューラルネットワーク等の抽象的な数理モデルを実装したものや、光回路、スピントロニクス、量子多体系等全く異なる原理で動作するデバイスまで幅広い情報処理媒体が該当する。

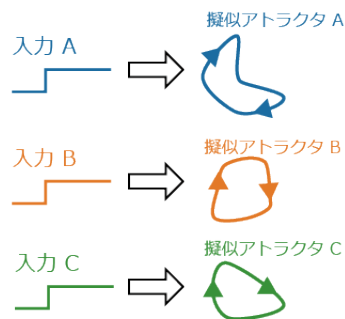
8. 添付資料：

学習セットアップ (高次元カオス力学系 + フィードバックループ)

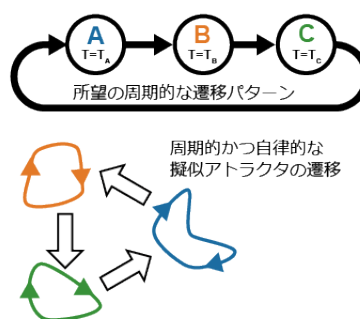


カオスの遍歴設計のレシピ

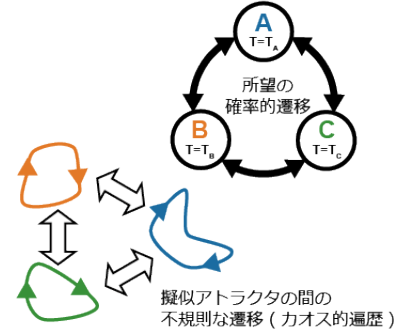
Step 1 - 擬似アトラクタの設計



Step 2 - 自律的な遷移の実装

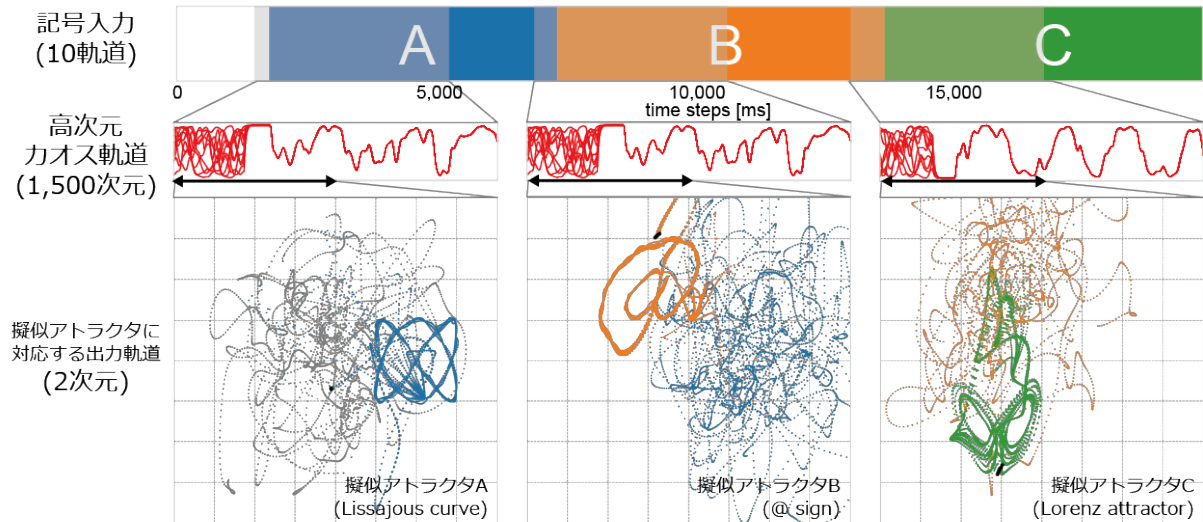


Step 3 - カオスの遍歴の設計

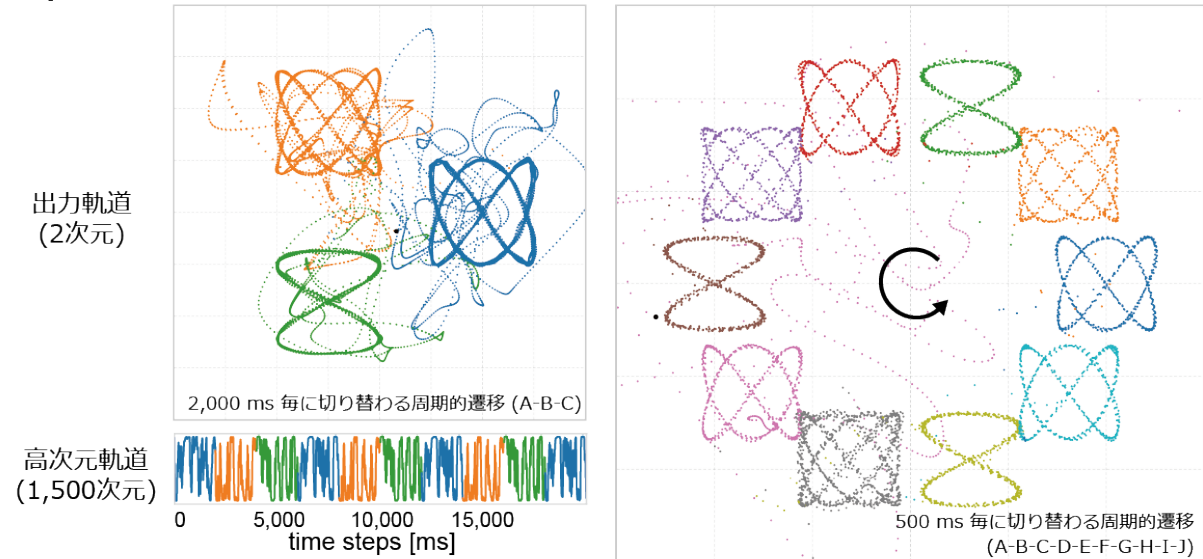


(図 1) 学習セットアップ及びカオスの遍歴設計のレシピ

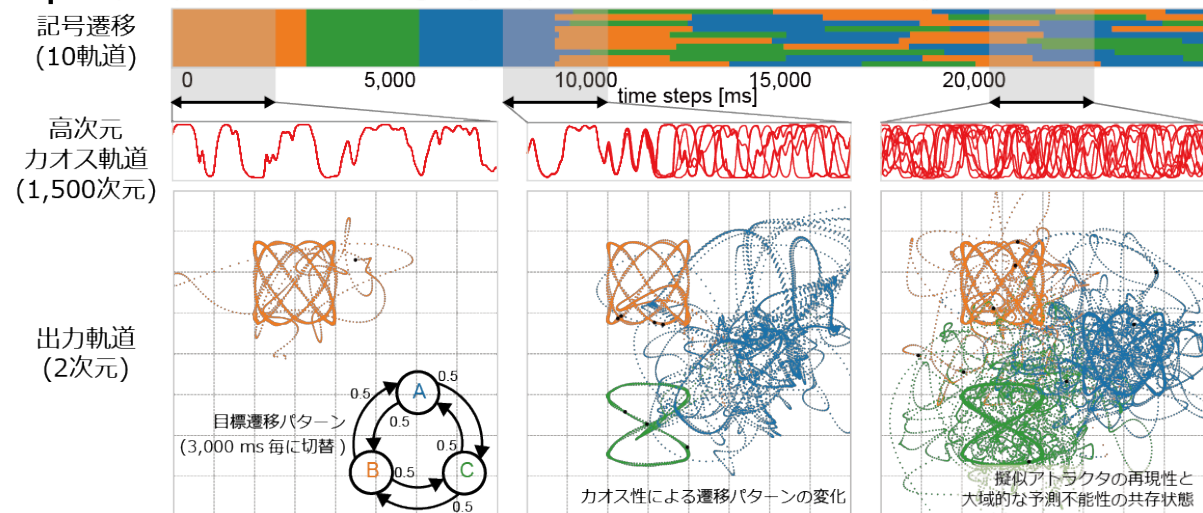
Step 1: 擬似アトラクタ及び対応する出力軌道の設計



Step 2: 擬似アトラクタ間の自律的な遷移の設計



Step 3: カオス的遍歴の大域的な遷移パターンの設計



(図 2) カオス的遍歴設計の各プロセスのデモンストレーション