

力学系の内部構造を解析する深層学習を開発

～物理現象や複雑システムの理解や解析に期待～

ポイント

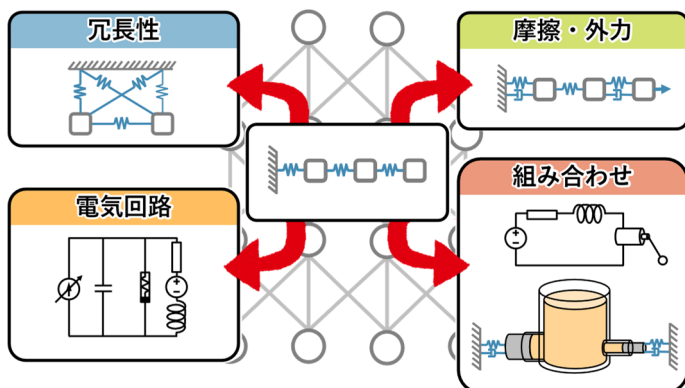
- ・様々な物理システムが絡み合った力学系を各要素に分割できる深層学習モデルを開発。
- ・各要素の特性と要素間の結合パターンの同定に成功。
- ・工学・自然科学分野における複雑システム解析の進展に期待。

概要

北海道大学大学院情報科学研究院の松原 崇教授、早稲田大学理工学術院の吉村浩明教授、神戸大学大学院理学研究科の谷口隆晴教授、大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程のコスロービアン・ラグミックアルマン氏らの研究グループは、機械系や電気系など様々な物理ドメインのシステムが結合した力学系^{*1}を、高精度かつ統一的に表現できる新たな深層学習^{*2}手法「ポアソン=ディラック ニューラルネットワーク (PoDiNNs)」を開発しました。従来の深層学習モデルは、解析力学の知見を用いることで、高精度に挙動をモデル化し、未来の変化を予測することに成功していました。しかし、主に（質点ばねで表現できるような）機械系の運動に特化しており、電気回路や油圧系といった他の物理ドメインへ拡張することが困難でした。また対象を一体的な力学系として扱うため、複数の要素が結合した大きな力学系（連成系）の学習が難しく、内部構造に対する理解や解釈を与えないという問題がありました。

研究グループが提案する PoDiNNs は、単一の力学系を、エネルギーを保持する素子、エネルギーを消費する素子、エネルギーを外部から与える素子に分割し、ディラック構造^{*3}という数学的対象を用いてそれらの素子の結合系として力学系全体を表現します。そのため、データからの学習によって、それぞれの素子の特性と、力学系内部の結合パターンを同時に同定することができます。これにより、長期にわたる予測の安定性が向上するだけでなく、要素間の相互作用を可視化しやすくなるため、ロボット工学や電力制御、構造物の振動解析や回路設計など、多様な応用への可能性が広がります。本研究の成果は、物理法則に根ざした学習モデルの新たな方向性を示し、マルチフィジックス^{*4}系の設計・制御・最適化など幅広い分野での発展が期待されます。

なお、本研究成果は、2025年4月24日（木）～28日（月）にシンガポールで開催される、国際会議 International Conference on Learning Representations にて発表される予定です。



深層学習を用いたシステムのモデル化において、これまで個別に研究されてきた冗長性や摩擦・外力などの様々な要素を統一的に扱えるほか、電気回路や油圧系、それらの組み合わせへと拡張。

【背景】

多くの物理現象やロボット、電気回路、化学反応などはすべて一種の力学系とみなすことができ、未知の力学系をデータからモデル化し、予測や制御に役立てるために、深層学習（ニューラルネットワーク）が用いられてきました。特に近年、常微分方程式⁴⁵で記述できるような力学系に対し、解析力学の知見を用いることで、エネルギー保存則などの物理法則を遵守できる手法が開発され、高精度に挙動をモデル化し、未来の変化を予測することに成功していました。しかし、既存の手法は主に質点ばねで表現できるような機械系の運動に特化しており、電気回路や油圧系といった他の物理ドメインへ拡張することが困難でした。また対象を一体的な力学系として扱うため、複数の要素が結合した大きな力学系の学習が難しく、学習ができていても力学系の内部構造に対する理解や解釈を与えないという問題がありました。

【研究手法】

本研究では、深層学習にポアソン＝ディラック形式という力学系の記述方法を導入しました（図1）。これは小さな力学系が複数結合した力学系である連成系について、それぞれの要素に分解し、エネルギーの流入出として要素間の結合を表現することで、連成系全体を記述する方法です。これを用いて、連成系を構成する各要素（ばね・質量・ダンパ・キャパシタ・インダクタ・抵抗・油圧タンクなど）と結合パターンに分解し、それぞれをニューラルネットワークや行列として学習できる手法 PoDiNNs を開発しました。

【研究成果】

PoDiNNs を様々なシミュレーションデータに適用し、連成系を構成する各要素の入出力特性と、結合パターンを個別に同定することで、力学系の内部構造をデータから明らかにできることを確認しました。これにより、従来の手法よりも高い精度で挙動を予測できることが示されました。特に、モータや油圧ピストンがあるような異なる物理ドメインをまたぐような要素についても、特性及び結合パターンを正確に同定することができ、マルチフィジックスな系を解釈可能な形で学習できる初の深層学習手法であることを示しました。その結果、システム内で実際に生じている力や電流や油液の流れが可視化でき、連成系の理解に貢献することが期待されます。

【今後への期待】

この手法は、ロボットや自動車といった多くの部品から構成されたシステムのシミュレーションや制御、リバースエンジニアリングへの応用が期待されます。また生物や社会システムのような人の手で設計されたわけではない対象についても、この手法を用いることで、高度な解析や深い理解に貢献する可能性があります。

【謝辞】

本研究は JST さきがけ (JPMJPR24TB、JPMJPR21C7)、JST CREST (JPMJCR1914、JPMJCR24Q5)、JST ASPIRE (JPMJAP2329)、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2033-14) の受託と JSPS 科研費 (JP24K15105) の助成を受けたものです。

論文情報

論文名 Poisson-Dirac Neural Networks for Modeling Coupled Dynamical Systems across Domains
(ドメインをまたいだ連成系をモデル化するためのポアソン=ディラックニューラルネットワーク)
著者名 コスロービアン ラズミックアルマン¹、谷口隆晴²、吉村浩明³、松原 崇⁴ (¹大阪大学大学院基礎工学研究科、²神戸大学大学院理学研究科、³早稲田大学理工学術院、⁴北海道大学大学院情報科学研究科)
学会名 The Thirteenth International Conference on Learning Representations (ICLR2025・人工知能と機械学習の国際会議)
開催日 2025年4月24日(木)～28日(月)

お問い合わせ先

北海道大学大学院情報科学研究科 教授 松原 崇 (まつばらたかし)

TEL 011-706-6852 メール matsubara@ist.hokudai.ac.jp

URL <https://sail.ist.hokudai.ac.jp/>

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

TEL 011-706-2610 FAX 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

早稲田大学広報室広報課 (〒169-8050 東京都新宿区戸塚町1-104)

TEL 03-3202-5454 FAX 03-3202-9435 メール koho@list.waseda.jp

神戸大学総務部広報課 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

TEL 078-803-6678 FAX 078-803-5088 メール ppr-kouhoushitsu@office.kobe-u.ac.jp

【参考図】

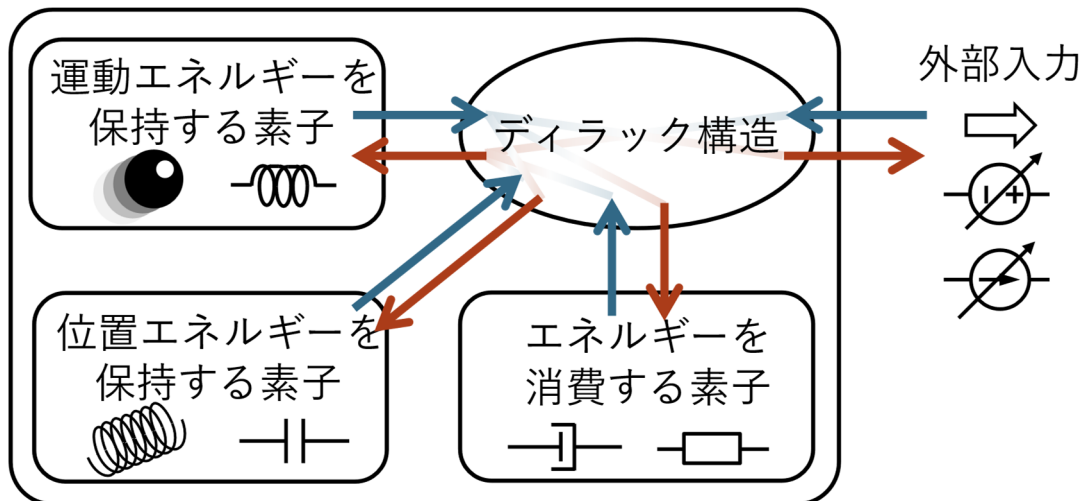


図1. ディラック構造によって、様々な種類の要素が結合されている様子の模式図。この構造を仮定することで、システム全体を単純な個々の素子とそれらの結合に分割して学習できるため、大規模複雑なシステムでも少ないデータから学習することができる。

【用語解説】

- *1 力学系 (dynamical system) … 入力や出力を持ち、内部の状態が時間的に変化するようなもの。様々な物理現象、社会現象、生物の代謝、ロボットの挙動などが力学系として解釈できる。
- *2 深層学習 (deep learning) … 比較的単純な演算を繰り返すことで複雑な関数を近似する機械学習のパラダイム。個別のモデルは歴史的な経緯からニューラルネットワークと呼ばれるが、生物の神経細胞 (ニューロン) と直接的な関係はない。
- *3 ディラック構造 (Dirac structure) … 力学系の拘束を記述するための数学的枠組みであり、本研究では特にサブシステム同士の結合をエネルギーの流入出として記述するために用いている。
- *4 マルチフィジックス (multiphysics) … 機械・電気・流体・熱など、異なる物理領域が相互に結合した力学系のこと。またその計算機シミュレーション。
- *5 常微分方程式 (ordinary differential equation) … 位置や速度といった点で表現できる状態の時間変化で力学系を記述する方法。流体のように、点ではなく空間的な広がりを持った状態の空間的変化を扱うと、偏微分方程式となる。