

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16076

研究課題名(和文) 流体計算機を実装する：新規情報処理技術の創出

研究課題名(英文) Implementation of Physical Liquid State Machine Based on Faraday Waves

研究代表者

中嶋 浩平 (Nakajima, Kohei)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任准教授

研究者番号：10740251

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：容器に入った液体に縦方向の加振を施すとファラデー波と呼ばれる水面波が生成される。この波のダイナミクスは、カオスを含むきわめて多様な時空間パターンを示すことが知られている。本研究テーマでは、このファラデー波を計算資源として活用することを考える。具体的には、レザバー計算と呼ばれる大自由度力学系を活用した新規情報処理技術に着目し、ファラデー波の時空間パターンに一部計算を実装させるシステム(流体計算機)を構成する。ここではまず、このシステムの応答特性から説明し、水面波のダイナミクスを活用してタイマー(時間間隔の制御)が構築できることを示した。また、その記憶容量についても定量的に解析した。

研究成果の概要(英文)：When a fluid layer with a free surface is subjected to vertical oscillation, Faraday waves can be observed. Due to their dynamic and nonlinear properties, Faraday waves exhibit complex patterns, such as spatiotemporal chaos. This has posed interesting challenges for many years. In this project, we aim to exploit Faraday waves as information-processing substrates based on the framework of reservoir computing. In particular, we show that they can be used to design timers (or timing control), which require a certain amount of memory to recognize time duration. We also aim to characterize the memory capacity of Faraday waves.

研究分野：非線形力学系、情報理論、レザバー計算、ソフトロボティクス

キーワード：レザバー計算 リカレントニューラルネットワーク 非線形力学系 ファラデー波

1. 研究開始当初の背景

レザバー計算は、リカレントニューラルネットワークの学習法として提案された一手法であるが、その特殊なシステム構成により、任意の大自由度力学系をその計算資源として活用することができる。この際、どのような力学系を用意すればどのような計算能力が引き出されるのか、この数理は未だ明らかになっていない部分が多い。特に、興味深いのは、物理系のダイナミクスを計算資源に活用できることである。これにより、物理現象に一部計算をアウトソースできるので、通常のPCで実装するよりもエネルギー効率の良い情報処理を実現することが可能となる。ただし、このフレームワークは、まさに始まったばかりであり、方法論が未だ確立していない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以上の現状をうけ、どのようなダイナミクスがどのような計算能力を持つのかを調べるためのモックアップシステムとして、流体計算機を構築し、レザバー計算を実装することにある。流体は、非線形力学系の最たるものであり、カオスを含め多種多様なダイナミクスを生成することが知られている。つまり、一つのセットアップでバリエーションに富む各種ダイナミクスを系統的に解析することが可能となる。

ここで想定している流体計算機は、それほど大きなものではなくミニマルに様々なパラメータを試せるようなものが好ましい。また、実際に流体を用いてレザバー計算を実装する過程で、物理系をレザバーとして活用する際の方法論を確立することも企図している。

3. 研究の方法

本研究では、流体計算資源として、水面波の一つであるファラデー波を活用する。この波は、容器に入った液体を縦方向に加振することで水面に生成されるものである。制御できるパラメータとしては、容器の形、液体の物性（例えば、粘性やニュートン性・非ニュートン性の区別など）、液体の容量（深さ）、加振のパターンなどがあり、これらのパラメータを調整することで、ダイナミクスの性質を変化させ、その情報処理能力を調べる。本研究では、この計算機の設営ならびに基礎的な実装実験が主眼に置かれている。

4. 研究成果

(1) 流体計算機の設営

本研究テーマの一つの重要な成果は流体計算機の系の設営が整ったことにある。図1は、本計算機の情報処理のフローを示した模式図である。PCより振動のパターンを送り、加振機を介して容器に入った液体を縦方向に加振する。その液面のダイナミクスをビデオカメラで撮影し、その画像のピクセルを調整

して、ちょうどニューラルネットワークのノードとして活用する。ノードの値は、各ピクセルのノード内の輝度の平均値として与えられる。そして、学習は、通常のレザバー計算のスキーム同様、各ノードに取り付けたリードアウトの荷重を線形回帰により調整することでなされる。図2は実験系の写真である。また、この系により生成されるファラデー波の例を図3に示す。なお、本研究テーマにおいて用いる液体は常温の水に限定した。

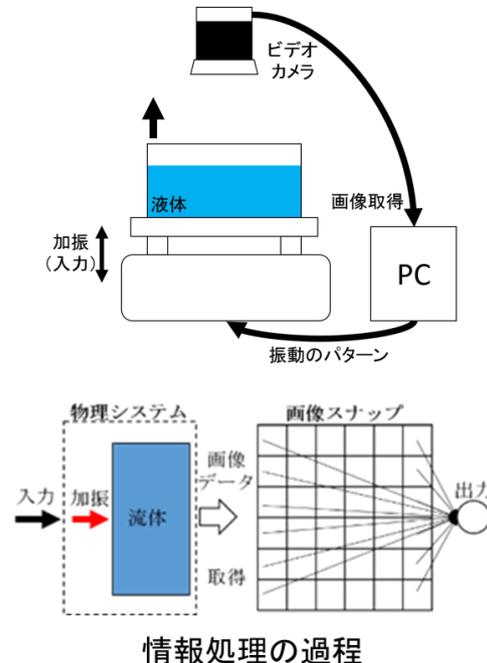


図1：流体計算機の模式図（上図）と情報処理プロセスの説明図（下図）。



図2：流体計算機のセットアップ。

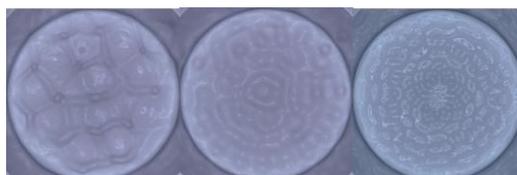


図3：本流体計算機により生成されるファラデー波の例。各パターンの違いは振動の周波数に依存している。

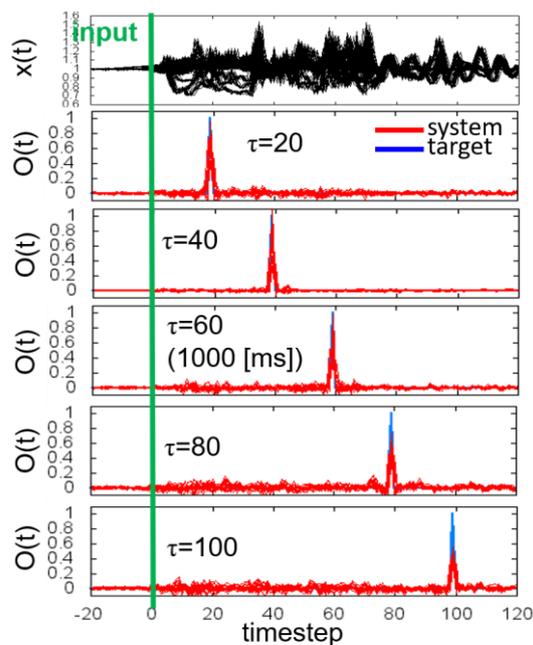


図4：本流体計算機のタイマータスクのパフォーマンスの例。 τ を大きくするごとにパフォーマンスが悪くなっていくのが見て取れる。一番上段のプロットは全ノードの応答を重ね描いている。

(2) 流体計算機の実装：タイマータスク

レザバー計算の要諦は、高次元のダイナミクスに存する過去の入力記憶とその非線形な変換をこちらの目的とする計算・情報処理に活用することである。この状況が最もあからさまに現れるのが、時間間隔・タイミングの制御である。

例えば、今、ストップウォッチを手にして目をつぶり、スタートボタンを押してから、2秒後にもう一度ボタンを押す状況を考える。幼少のころ、このようなゲームを誰しも一度や二度は行った経験があると思う。このとき、目をつぶっているので、外的に参照できるものは何もない。スタートボタンを押してから、自分の時間感覚を頼りに、数え上げ、2秒という時間間隔を当てねばならない。正しく当てるとは、まずもって、スタートした際の記憶を保持していることが必須事項である。これと同様のタスク（これをタイマータスクと呼ぶ）を流体計算機に実装することを考える。

つまり、ある時刻において、入力として縦方向のステップ振動を与え、水面波を生成し、そのダイナミクスを活用することで、 τ 時刻後に一つパルスを出力する。タイマータスクを実装する。学習は、前述のとおり、画像データに接地したリードアウトの荷重を調整することでなされる。この時間遅れ τ を大きくしていくことでこの系がエンコードできる記憶容量を定量することができる。

図4は実際にこのタスクを実装した際の結果である。詳細な解析結果は(雑誌論文⑦)において説明されている。現在、この実験を

拡張した結果も存在し、論文執筆中である。

(3) 他の物理系への応用とそのための手法の開発

本研究テーマの知見は、流体のみならず、タコ足型計算機(雑誌論文①・②・⑤)、量子多体系のダイナミクス(雑誌論文③・④)やスピントロニクスをレザバーとして活用する研究などの随所に活かされている。特に、タイマータスクのスキームは、やわらかいマテリアルがどのように時間情報をエンコードしているかを定量する手法として積極的に活用された(雑誌論文①)。やわらかいマテリアルのダイナミクスは、外的に刺激を与えられると、きわめて多様なダイナミクスを示すことが知られている。ここでは、やわらかいマテリアルでできたソフトロボティクスアームを用意し、根元に刺激を与え、その強度に応じて、どの程度の時間幅までタイマーを埋め込むことができるかを精査した。これらの結果は、今後、ソフトロボティクスの身体記憶容量を定量する一つの手法として活用されるであろうと期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① Kohei Nakajima, Tao Li, Nozomi Akashi, Soft timer: dynamic clock embedded in soft body, In *Robotic Systems and Autonomous Platforms* (Elsevier), 2018 (in press). (査読有)
<https://www.elsevier.com/books/robotic-systems-and-autonomous-platforms/walsh/978-0-08-102047-0>
- ② Kohei Nakajima, Helmut Hauser, Tao Li, Rolf Pfeifer, Exploiting the Dynamics of Soft Materials for Machine Learning, *Soft Robotics*, 2018. (査読有)
<http://doi.org/10.1089/soro.2017.0075>
- ③ 根来 誠、藤井 啓祐、中嶋 浩平、御手洗 洸祐、北川 勝浩、アンサンブル固体分子核スピン系による量子レザバー計算の実装、*信学技報*, ISSN 0913-5685, 2017. (査読無)
www.ieice.org/ken/paper/2017111701A0/
- ④ Keisuke Fujii, Kohei Nakajima, Harnessing disordered-ensemble quantum dynamics for machine learning, *Physical Review Applied* 8: 024030, 2017. (査読有)
DOI:10.1103/PhysRevApplied.8.024030

- ⑤ Kohei Nakajima, Muscular-Hydrostat Computers: Physical Reservoir Computing for Octopus-Inspired Soft Robots, In *Brain Evolution by Design (Springer Japan)*, pp. 403--414, 2017. (査読有)
https://doi.org/10.1007/978-4-431-56469-0_18
- ⑥ 藤井 啓祐、中嶋 浩平、量子レザバーコンピューティング ~ 量子実時間ダイナミクスの機械学習への応用 ~、*信学技報*、ISSN 0913-5685、2016. (査読無)
<http://www.ieice.org/ken/paper/20160531SbJq/>
- ⑦ 中嶋 浩平、青柳 富誌生、流体計算機の記憶容量について、*信学技報*、vol. 115、no. 300、CCS2015-65、pp. 109--112、2015. (査読無)
<http://www.ieice.org/ken/paper/20151110LbEF/>
- [学会発表] (計40件)
- ① 窪田 智之、中嶋 浩平、高橋 宏知、単一 Izhikevich ニューロンの情報処理能力、*医用・生体工学研究会「神経工学 & バイオサイバネティクス」*、2018年3月20日。(口頭発表)
- ② 古田 大志、藤井 啓祐、中嶋 浩平、常木 澄人、久保田 均、後藤 穰、鈴木 義茂、三輪 真嗣、Macro-magnetic simulation of reservoir computing utilizing spin-dynamics in magnetic tunnel junctions、*第65回応用物理学会春季学術講演会*、早稲田大学、東京 (18 March 2018). (口頭発表)
- ③ 古田 大志、藤井 啓祐、中嶋 浩平、後藤 穰、鈴木 義茂、三輪 真嗣、Brain-like computing utilizing spin dynamics in magnetic tunnel junction、*平成 29 年度スピン変換年次報告会*、京都大学桂キャンパス、京都 (12 March 2018). (口頭発表)
- ④ Makoto Negoro, Keisuke Fujii, Kohei Nakajima, Kosuke Mitarai, Masahiro Kitagawa Solid-state NMR implementation of quantum reservoir computing *APS March Meeting 2018*, March 5-9, 2018; Los Angeles, California. (口頭発表)
- ⑤ 中嶋 浩平、Physical reservoir computing、*マテリアル知能ワークショップ*、2018年2月26日、北海道大学、情報科学研究科棟。(招待講演)
- ⑥ 根来 誠、藤井 啓祐、中嶋 浩平、御手洗 洗祐、北川 勝浩、アンサンブル固体分子核スピン系による量子レザバー計算の実装、*第37回量子情報技術研究会 (QIT37)*、埼玉大学、2017年11月17日。(口頭発表)
- ⑦ 中嶋 浩平、Physical reservoir computing の数理、*第8回横幹連合コンファレンス(オーガナイズド・セッション: ミクロとマクロをつなぐ社会的知能・合理性)*、2017年12月2日、立命館大学 朱雀キャンパス。(口頭発表)
- ⑧ Kohei Nakajima, Permutation entropy and transcripts in epileptic seizure time-series data, *Advanced ECoG/EEG Analysis in Epilepsy (Post-Congress in the 51st Annual Congress of the Japan Epilepsy Society)*, 5 Nov. 2017, Kyoto International Conference Center, Kyoto. (招待講演)
- ⑨ 藤井 啓祐、中嶋 浩平、根来 誠、北川 勝浩、量子レザバー計算の固体 NMR 実装の性能評価、*日本物理学会 2017 年秋季大会(岩手大学)*。(口頭発表)
- ⑩ 根来 誠、藤井 啓祐、中嶋 浩平、北川 勝浩、量子レザバー計算の固体 NMR 実装、*日本物理学会 2017 年秋季大会(岩手大学)*。(口頭発表)
- ⑪ 中嶋 浩平、藤井 啓祐、根来 誠、量子レザバー計算のための空間多重化法の提案、*日本物理学会 2017 年秋季大会(岩手大学)*。(口頭発表)
- ⑫ 中嶋 浩平、Physical Reservoir Computing と力学系の記憶容量について、*Perspectives in random and non-autonomous dynamical systems* (Department of Mathematics (Room 127), Kyoto University)、2017/9/29。(招待講演)
- ⑬ 中嶋 浩平、Physical reservoir computing の展開: タコ足計算機から流体計算機まで、*第16回情報科学技術フォーラム FIT2017 展示会*(東京大学本郷キャンパス 2号館 2階フォーラム)、2017/9/12-14。(ポスター発表)

- ⑭ 中嶋 浩平、Physical reservoir computing for soft robots、*SIG-Soft Robotics 研究会*(中央大学後楽園キャンパス)、2017/6/24。(招待講演)
- ⑮ Kohei Nakajima、Exploiting the dynamics of soft materials for machine learning、*Workshop on Advanced Fabrication and Morphological Computation for Soft Robotics (in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2017, Singapore)* 2017/5/29。(招待講演)

[図書] (計0件)

なし

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

[その他]

ホームページ等

<https://www.kohei-nakajima.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中嶋 浩平 (NAKAJIMA, Kohei)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任准教授

研究者番号：10740251

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし