

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 31 年 5 月 2 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12487

研究課題名(和文) 神経細胞の確率的ふるまいを用いた生成的機械学習の開発と電子回路実装

研究課題名(英文) Developing Generative Machine Learning and its Digital Circuit Implementation by Leveraging Neuronal Stochastic Behavior

研究代表者

松原 崇 (Matsubara, Takashi)

神戸大学・システム情報学研究科・助教

研究者番号：70756197

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、人工ニューラルネットワークと比較した場合に、生体神経の特徴である確率的な振る舞い(ゆらぎや不確実性)とスパイク時刻信号について、それらを応用した生成的な機械学習アルゴリズムと実装法を研究開発することを目的とする。数理モデルの観点からはゆらぎと恒常性の関係を明らかにするモデルを導出した。学習アルゴリズムの観点からは離散信号を確率分布で表現することで生理学的に妥当な学習アルゴリズムを開発した。そして回路実装の観点からは、実用的な解像度において高い削減効率であるといわれてきた線形近似の3分の1の回路素子数(=回路面積)しか要求しない実装方法を開発した。またいくつかの応用方法も提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は(1)生物の脳が学習するメカニズムにおいて、従来不明であったゆらぎの貢献や時間的な適応について、数式によるモデルを構築できた。(2)確率的な現象をモデル化できる機械学習手法であるボルツマンマシンを、高密度に電子回路実装する手法を開発した。(3)いわゆる深層学習に確率的要素(ゆらぎや不確実性)を持ち込むことで、高い精度を達成したり、小規模データへ適応可能な手法を開発できた。

研究成果の概要(英文)：This study aimed at developing a new generative machine learning algorithm and implementation method by leveraging the stochastic behavior (uncertainty) and spike-time coding, which biological neural networks have and artificial ones do not. We derived a mathematical model bridging the gap between stochasticity and homeostasis of neurons. We proposed a biologically-plausible learning algorithm by considering the discrete spikes as sampled drawn from a probabilistic distribution. For circuit implementation, we proposed a new approximation method that requires only one-third circuit resources. We also proposed some practical methods based on the stochasticity.

研究分野：機械学習と計算論的神経科額

キーワード：ニューラルネットワーク ゆらぎ 機械学習

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

深層学習を始めとする人工ニューラルネットワーク(ANN)など、生体神経系の信号処理に学んだ手法が、画像識別や物体検出など機械学習分野で高い成果を上げている。機械学習の対象は、欠落したデータを補間するための推論など確率的な情報処理を含む事象や、自然言語など過去の状態に長期的に依存する動的な事象にも拡大し、必要なデータ量と計算量の爆発に直面している。そのため、大規模なANNの高速化や効率的な実装と小規模データから情報抽出が喫緊の課題となっている。前者については深層学習を専用ハードウェアに実装する研究が注目されており、後者については深層生成モデルと呼ばれる確率モデルを扱えるANNに期待が集まっている。

2. 研究の目的

申請者らは、これまでスパイク(パルス)で結合した生体神経系の数理モデル(スパイクニューラルネットワーク, SNN)を、専用ハードウェア上に実装する研究に従事してきた。その結果や他の先行研究によれば、既存のANNと比べると、SNNの方が専用ハードウェアへの実装効率(回路面積や消費電力)の点で優れている、そして機械学習システムとしての性能(物体識別率・モデル予測精度)も遜色が無いという結果が示されている。また、生体神経系の活動や変化はゆらぎを持っており、確率的な情報処理を行っていることが示唆されており、確率的・動的な対象を扱うのに適しているだけでなく、小規模データに対しても過学習しにくいことが示唆されている。そこで本研究では(1)生体神経系のスパイクが持つ、確率的なふるまいを利用した生成的機械学習システムを開発する。また開発したモデルを回路上で学習させる、専用の機械学習アルゴリズムを開発する。

そして(2)これらをFPGAなど動的再構成可能回路上に実装し、高集積度・低消費電力な機械学習チップを開発する。また(3)一般的な深層生成モデルの応用について検討し、このようなシステムの適応可能性を探る。

3. 研究の方法

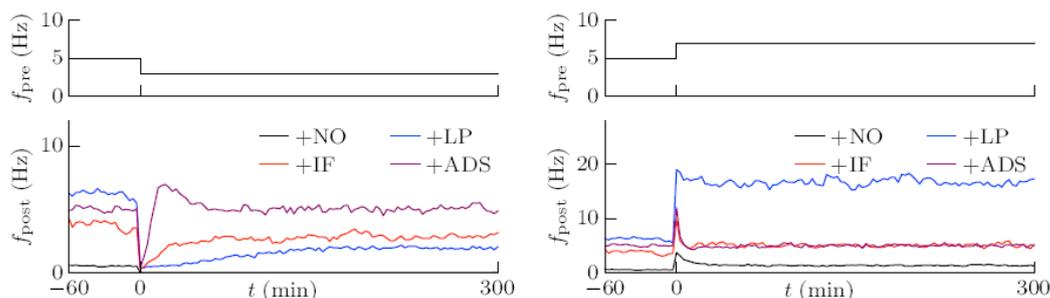
(1) 確率的なふるまいという生物学的な神経細胞の特性、特に学習(可塑性)について、その数理モデルの開発と数値シミュレーションという両面から解析を行う。生体神経細胞についてはその学習メカニズムである結合強度の可塑性について研究が行われてきた。一方で、信号強度の変化に追従する恒常性や、時間的な調整を行う可塑性については十分な検討が行われているとは言えない。既存の生理学的実験の結果を踏まえ、適切なモデルを検討する。

(2) 専用ハードウェアへの実装には、申請者らが従前から開発していた非同期セルオートマトン神経細胞モデルを利用する。これは連続時間離散状態という特殊なダイナミクスをもったモデルである。生体神経細胞のシミュレーションや神経補綴に適しており高集積可能であったが、機械学習用のANNの実装にも有効であると示唆的な結果が得られている。

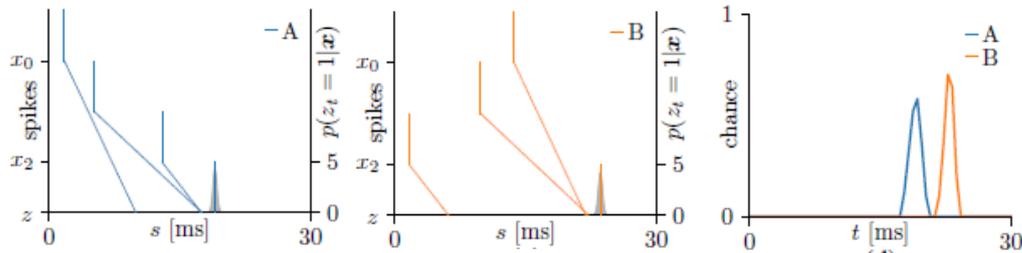
(3) ニューラルネットワークの確率的なふるまいを踏まえた深層生成モデルの応用を探る。特にベイジックの深層学習と呼ばれるANNのベイジック推定、構造化深層生成モデルを対象とする。

4. 研究成果

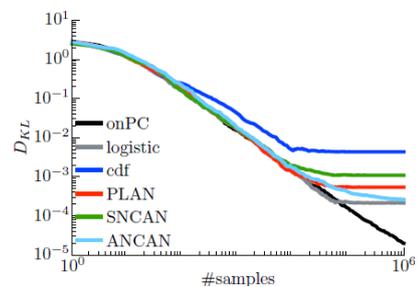
(1)-1 数理モデルの観点からはゆらぎと恒常性の関係を明らかにするモデルの導出を達成した[6]。生体神経系の細胞は長時間に渡り刺激が強くなったり弱くなったりすると、平均的な出力を一定にするために反応が鈍化もしくは鋭敏化することが知られている。下図は文献[8]からの引用であり、既存のモデル(+ADS)や提案モデル(+IF)を用いると、入力信号強度(上部)の変化に対して、出力信号強度(下部)がある程度の時間をかけて従前の強度まで回復することを示している。これは恒常性の一形態であり、何らかの信号伝達(タンパク合成など)によって引き起こされると考えられていた。申請者らは、単なる受容チャネルのゆらぎが、この恒常性を引き起こすのに十分であることを、数理モデルと数値シミュレーションの両方で示すことができた。恒常性に類似した機能は、機械学習においても信号の正規化(白色化)として取り入れられており、ゆらぎの情報処理上の機能についても示唆的な結果を得た。



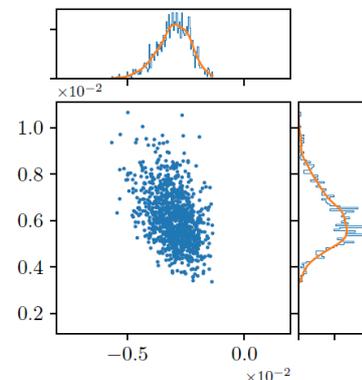
(1)-2 学習アルゴリズムの観点からは、離散的信号を確率分布からのサンプルとみなすことで生理学的に妥当な学習アルゴリズムの開発を達成した[5]. 生体神経ネットワークは時間的な前後関係で信号伝達とその最適化を行っていると考えられている. 結合強度の最適化については生理学的実験を通じて妥当なモデルが提案されているが、時間的な最適化についてはあまり検討されてこなかった. 申請者は確率モデルの一種である潜在変数モデルの最適化とみなすモデル化を提案し、そこから結合強度と時間的な最適化が導出できることを示した. 結合強度のモデルは既存モデルと矛盾せず、もっともらしい時間的可塑性モデルが導出できた. 下図は文献[5]からの引用であり、複数の入力スパイク列(左部2枚)が、その時間的な前後関係に基づいてクラスタリングされている(右部)ことを示している.



(2) 回路実装の観点からは、ANN を用いた生成モデルであるボルツマンマシンについて、実用的な解像度において高い削減効率であるといわれてきた区分線形近似の3分の1の回路素子数(=回路面積)しか要求しない実装方法の開発に成功した[4]. これはSNNのゆらぎをボルツマンマシンの持つ確率的挙動と非線形性に応用したものである. 右図は文献[4]からの引用であり、ボルツマンマシンのコンピュータ上での高解像度のシミュレーション結果(onPC)に対する低解像度回路実装の精度比較である. 提案手法(ANCAN)は特に各素子に非同期性を用いることで、低解像度時に起こる不都合な周期解を抑制した. そして同期型(SNCAN)や区分線形近似(PLAN)を越える精度を達することができた.



(3)-1 深層学習システムへのゆらぎや不確実性の応用を行った. ゆらぎの応用においては、ハイパーネットという機構を用いることで、従来困難であった深層学習におけるパラメータの事後分布のベイズ推定を実現できた[3]. 確率モデルのパラメータをベイズ推定する場合は、簡単化のためにfactorizeする(独立だとみなす)ことが多いが、非線形性の高い大規模なANNではこの仮定が強すぎて適応が難しい. ハイパーネットを用いることで、パラメータ間の相関関係を含めて学習することができ、性能の向上が確認できた. 右図は文献[3]からの引用であり、ANN中の重み2つの分布を可視化したものである. 非ガウスの形状をした相関関係のある事後分布が推定できていることがわかる.



(3)-2 またANNによって不確実を予想する機構を盛り込むことによって、データ自体が持つ不確実に対して堅牢な異常検知が実現できた[c]. さらには生成モデルの特性を用いることで、小規模データである脳機能画像の高性能な解析と、解釈性のある結果の提示を実現することが出来た[1]. これによって、いわゆるブラックボックスと呼ばれるニューラルネットワークにおいて、質的に新しい解析法の基礎を確立できたと考える.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- [1] Takashi Matsubara, Tetsuo Tashiro, and Kuniaki Uehara, "Deep Neural Generative Model of Functional MRI Images for Psychiatric Disorder Diagnosis," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2019 (accepted).

- [2] Ryo Takahashi, Takashi Matsubara, and Kuniaki Uehara, "A Novel Weight-Shared Multi-Stage CNN for Scale Robustness," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 29, no. 4, pp. 1090-1101, 2019.
- [3] Kenya Ukai, Takashi Matsubara, and Kuniaki Uehara, "Bayesian Estimation and Model Averaging of Convolutional Neural Networks by Hypernetwork," *Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE*, Vol.E10-N, No.1, 2019
- [4] Takashi Matsubara and Kuniaki Uehara, "Asynchronous Network of Cellular Automaton-based Neurons for Efficient Implementation of Boltzmann Machines," *Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE*, Vol. E9-N, No.1, pp. 24-35, 2018.
- [5] Takashi Matsubara, "Conduction Delay Learning Model for Unsupervised and Supervised Classification of Spatio-Temporal Spike Patterns," *Frontiers in Computational Neuroscience*, 21 Nov. 2017.
- [6] Takashi Matsubara and Kuniaki Uehara, "Homeostatic Plasticity Achieved by Incorporation of Random Fluctuations and Soft-Bounded Hebbian Plasticity in Excitatory Synapses." *Frontiers in Neural Circuits*, vol. 10, no. 42, 2016.

[学会発表] (計 32 件)

- [a] Kenya Ukai, Takashi Matsubara, and Kuniaki Uehara, "Hypernetwork-based Implicit Posterior Estimation and Model Averaging of Convolutional Neural Networks," *Proc. of The 10th Asian Conference on Machine Learning (ACML2018)*, Beijing, Nov. 2018.
- [b] Takashi Matsubara, Tetsuo Tashiro, and Kuniaki Uehara, "Structured Deep Generative Model of fMRI Signals for Mental Disorder Diagnosis," *Proc. of International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI2018)*, Granada, Sep. 2018.
- [c] Takashi Matsubara, Ryosuke Tachibana, and Kuniaki Uehara, "Anomaly Machine Component Detection by Deep Generative Model with Unregularized Score," *Proc. of The 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN2018)*, Rio de Janeiro, Jul. 2018, pp.4067-4074.
- [d] Tetsuo Tashiro, Takashi Matsubara, and Kuniaki Uehara, "Deep Neural Generative Model for fMRI Image Based Diagnosis of Mental Disorder," *Proc. of The 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2017)*, Cancun, Dec. 2017, pp. 700-703, 5169.
- [e] Ryo Takahashi, Takashi Matsubara, and Kuniaki Uehara, "Scale-Invariant Recognition by Weight-Shared CNNs in Parallel," *Proc. of The 9th Asian Conference on Machine Learning (ACML 2017)*, Seoul, Nov. 2017.
- [f] Takashi Matsubara, "Spike Timing-Dependent Conduction Delay Learning Model Classifying Spatio-Temporal Spike Patterns," *Proc. of The 2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN2017)*, Anchorage, May 2017, 164.
- [g] Takashi Matsubara and Kuniaki Uehara, "Efficient Implementation of Boltzmann Machine using Asynchronous Network of Cellular Automaton-based Neurons," *Proc. of The 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2016)*, Yugawara, Nov. 2016, pp. 634-637.

[h] Takashi Matsubara and Kuniaki Uehara, "A Novel Homeostatic Plasticity Model Realized by Random Fluctuations in Excitatory Synapses," *Proc. of The 2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN2016)*, Vancouver, Jul. 2016, N-16352.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ai.cs.kobe-u.ac.jp/>

<https://sites.google.com/site/takashimatsubarasprofile/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：上原邦昭

ローマ字氏名：Kuniaki Uehara

所属研究機関名：神戸大学

部局名：システム情報学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：60160206

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。