

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12004

研究課題名(和文) 脳における情報の高効率なゲーティング機構の解明

研究課題名(英文) Investigation of efficient information gating in a brain

研究代表者

篠崎 隆志 (Shinozaki, Takashi)

近畿大学・情報学部・准教授

研究者番号：10442972

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：神経集団における膜電位の同期特性について、一般に用いられている線形なLeaky Integrate-and-Fire (LIF) モデルと、非線形なExponential Integrate-and-Fire (EIF) モデルを用いて、Fokker-Planck方程式による数値解析を行った。その結果、非線形モデルにおけるNaイオン電流の項が自発発火状態下で弱い抑制性入力を受けることによって神経集団の膜電位の同期を生じさせ、Synfire Chainと呼ばれる同期発火の伝播モデルと併せることによって、脳における情報の高効率なゲーティングを行っている可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体の脳は、半導体を用いた一般的な情報処理システムに対して圧倒的に高いエネルギー効率を実現しているが、その原理の詳細は明らかになっていない。本研究結果により、脳は、Naイオンチャンネルの開度が膜電位に与える動的な特性に環境ノイズをうまく併せて利用することによって、情報のゲーティングを行っている可能性が示され、脳の高いエネルギー効率の秘密の一端を明らかにした。本研究結果を応用することによって、より高いエネルギー効率での情報処理システムの実現や、生体の脳における情報処理の新しい知見が得られることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Numerical analysis of the synchronization of membrane potentials in neural populations was performed using the commonly used linear Leaky Integrate-and-Fire (LIF) model and the nonlinear Exponential Integrate-and-Fire (EIF) model with the Fokker-Planck equation. The results showed that sodium ion current term in the nonlinear model may synchronize the membrane potentials of the neuronal population by receiving weak inhibitory input under spontaneous firing conditions, and together with a propagation model of synchronous firing called synfire chain, may achieve highly efficient gating of information in the brain.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：神経科学 ニューラルネットワーク モデル 数値解析

1. 研究開始当初の背景

近年の半導体技術の発展によって実装できる演算器の量は爆発的に増大し、それに伴って必要なエネルギー量も増大、エクサ FLOPS クラスのスーパーコンピュータを運用するためには 20MW もの電力が必要となり、専用の原子力発電所が必要であるとまで言われている。このように必要エネルギーが計算機の律速条件となりつつある一方で、現状のアーキテクチャでは抜本的なエネルギー効率の改善の見込みは立っておらず、情報処理におけるエネルギー消費の低減が喫緊の課題となっている。

この状況を打破するために、現実世界で圧倒的なエネルギー効率を実現している生体の脳にそのヒントを求めるのは自然なことであろう。人間の脳は 20W 程度のエネルギーで動作していると考えられているが、これに対して囲碁で人間に勝利した AlphaGo は 25 万 W を必要としており、その差は歴然である。従って部分的にでも脳の計算原理を取り入れることができればコンピューティングにおけるエネルギー効率を劇的に改善することが期待される。

脳の計算原理、すなわちニューラルネットワーク(以下、NN)を様々な情報処理に用いることは、深層学習の普及によって一般的になりつつある。一方で深層学習、あるいはその実体であるディープニューラルネットワーク(Deep Neural Network、以下 DNN)はいわば脳と機械のハイブリッドのような構造となっており、従来の機械学習的手法と比較すれば良いものの、脳と同じレベルのエネルギー効率は達成できていない。

この原因の一つに、現在のコンピューターで用いられている情報のゲーティング、言い換えると情報の流れの制御に必要なエネルギーが挙げられる。現在のコンピューターがトランジスタを用いたゲーティングによって情報の流れを操作するのに対して、脳は全く異なる仕組みでエネルギー効率の高い情報のゲーティングを実現していると考えられる。

情報のゲーティングとはすなわち情報の選択的な伝達機構であり、これは脳においては注意(attention)と呼ばれるメカニズムに対応する。しかしながら、脳において注意を実現している生理的なメカニズムは、神経科学の分野で活発な研究が続けられている(Luo et al., 2018; Spyropoulos et al., 2018; Hembrook-Short et al., 2019; Ruff et al., 2019)ものの、未解明であるのが現状である。

一方で AI の分野でも、近年、注意のメカニズムが注目を集めている。画像に対応した文章を生成する DNN において、脳における注意をモデル化したメカニズムを統合することで性能が大幅に向上した(Xu et al., 2015)ことを皮切りに、特に言語処理の分野でブームとなり、Transformer (Vaswani et al., 2017)や BERT (Devlin et al., 2018)と呼ばれる注意を導入した DNN のモデルによって様々な技術的な革新が実現されている。しかしながら、DNN における注意の実現には莫大な計算リソース、ひいてはエネルギーを必要とし、より高いエネルギー効率が切に求められている。

DNN はもともと脳をモデルに開発されたことから、脳のメカニズムとの相性が良いことが期待できる。したがって脳におけるゲーティングのメカニズムの詳細が解明されれば、現状をはるかに凌駕する高いエネルギー効率の AI 技術の実現につながり、現在はその莫大な消費エネルギーから一般レベルには普及が困難な、注意を利用した AI 技術の普及促進が見込まれる。

2. 研究の目的

本研究計画の目的は、脳における高効率な情報のゲーティングのメカニズムについて、計算論的神経科学の手法を用いて、そのダイナミクスを明らかにすることである。

本研究が達成されることによって、環境ノイズをうまく利用した脳のような情報処理が可能になることが期待され、最先端の AI 技術である注意を用いた DNN を、より高いエネルギー効率を持つハードウェアに実装できるようになる可能性が期待される。さらに、計算論的神経科学についての新しい知見はもちろんのこと、注意の具体的なメカニズムについての認知科学的な知見や、ダイナミクスから導かれる生理的構造の知見など、広範な学問分野において創造的な影響を与えることが期待できる。

3. 研究の方法

本研究計画では脳における情報のゲーティングのメカニズムを解明するために、物理学の分野で拡散を解析する手法として知られている Fokker Planck 方程式を計算論的神経科学に適用した解析を実施する。

脳における情報の伝播については、synfire chain と呼ばれる同期発火の集団が伝播するモデルが提唱されており (Abeles, 1991)、計算論的神経科学による研究 (Vreeswijk et al., 1994; Diesmann et al., 1999) や生理的研究 (Prut et al., 1998; Reyes, 2003; Ikegaya et al., 2004) によって検証がなされている。Synfire chain で表される情報の流れを動的に制御、すなわちゲーティングを実現するためには抑制性ニューロンの介在が重要であると考えられており、これについての理論的な研究が行われてきている (Dodla & Rinzel, 2006)。

Fokker Planck 方程式は確率分布の時間変化を記述するための手法の一つで、神経細胞群の同期発火の解析にも活用されている。synfire chain についても Leaky Integrate and Fire (LIF) と呼ばれる最もシンプルなニューロンモデルを用いた研究がなされてきた (Cateau & Reyes, 2006)。申請者はこれまでの研究で、より生理的に妥当な Izhikevich ニューロンモデル (Izhikevich, 2003) に、Fokker Planck 方程式を適用する手法を確立しており、これによって、生体に近い非線形性を持つニューロンモデルにのみ確認しうる、情報のゲーティングについて明らかにしてきた (Shinozaki et al., 2010)。本研究ではより一般的に用いられている線形な Leaky Integrate-and-Fire (LIF) モデルと、Na イオン電流の項を持つ非線形な Exponential Integrate-and-Fire (EIF) モデルについて同様の解析を行った。

4. 研究成果

Synfire Chain と呼ばれる同期発火の伝播モデルを、線形な Leaky Integrate-and-Fire (LIF) モデルと、非線形な Exponential Integrate-and-Fire (EIF) モデルのニューロン群によって構成される神経集団に、Fokker Planck 方程式を適用し、この解析を実施するための数値解析プログラムの開発を行った。さらに Fokker Planck 方程式による数値解析の妥当性を検証するために、スパイクングニューロンによる膜電位モデルを用いた神経集団についての数値シミュレーションを行うためのプログラムの開発も並行して進めた。プログラムは、近年の深層学習で主に用いられている Python によって作成した。

これまでの研究から、情報のゲーティングは、情報を伝播する神経細胞群の同期の度合いによって制御されることが確認されているが、この同期現象は神経細胞群が自発発火している状態で特に効果的であることが確認されている。このような同期は Fokker Planck 方程式では膜電位の分布として表現され、発火に関連した電位感受性ナトリウムチャネルによる収束項と、背景ノイズによる拡散項とのバランスによって決定されている。

数値シミュレーションの結果から、生理的に妥当で非線形な EIF モデルにおいて、自発発火状態が Na イオン電流を活性化し、非同期状態を引き起こすメカニズムを明らかになり、これによって非線形要素がある場合のみに存在する非同期状態に起因する集団発火の伝播のゲーティング機構の妥当性が示された。このゲーティング機構は微弱な抑制性入力によって集団発火の伝播、言い換えると神経回路における情報の流れが制御可能であり、脳における情報処理の高いエネルギー効率の秘密の一端を明らかにした可能性があるといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takashi Shinozaki
2. 発表標題 Weak inhibition synchronizes neuronal populations with spontaneous firing by disengaging from sodium currents
3. 学会等名 Neuroscience 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------