

NeuMoReservoir

—神経細胞の形態が生み出す時空間ダイナミクス—

1. 背景

ヒトの脳は約 860 億個の神経細胞と 100 兆個に及ぶシナプス結合によって構成される、極めて複雑な情報処理システムである。現代の神経科学研究においては、神経細胞、ネットワーク、あるいは脳領域といった異なるスケールでの知見を丁寧に統合するプロセスが不可欠となっているが、既存の計測技術における時空間解像度の限界により、各解像度での研究が個別に進んでいるのが現状である。近年、膨大なパラメータによって情報処理能力を向上させる深層ニューラルネットワーク (DNN) と脳の類似性が議論されているものの、DNN は学習に伴う膨大な計算コストという重大な課題を抱えている。脳と DNN の決定的な相違点の一つに神経細胞の空間形状 (形態) の考慮が挙げられるが、多様で複雑な神経形態が脳の情報処理に果たす役割は依然として未解明である。これらを解明することは、脳のボトムアップな理解のみならず、次世代の低消費エネルギーな人工知能やハードウェア開発における設計指針となる可能性を秘めている。一方、学習コストを抑えた機械学習アルゴリズムであるリザーコンピューティングは、その実装の容易さや概念の普遍性から、神経科学や人工知能、物理実装などの多岐にわたる分野で注目されている。特にソフトロボティクスを用いた先行研究では、身体構造そのものを計算に利用する形態学的コンピューティングが提案され、脳の中央集権的な制御という従来の描像を再考する契機となった。こうした知見に触発され、本プロジェクトでは、単一の神経細胞が持つ豊かな情報処理能力と、その空間的な形態が計算性能に与える影響について、リザーコンピューティングの視座から再評価を試みるものである。

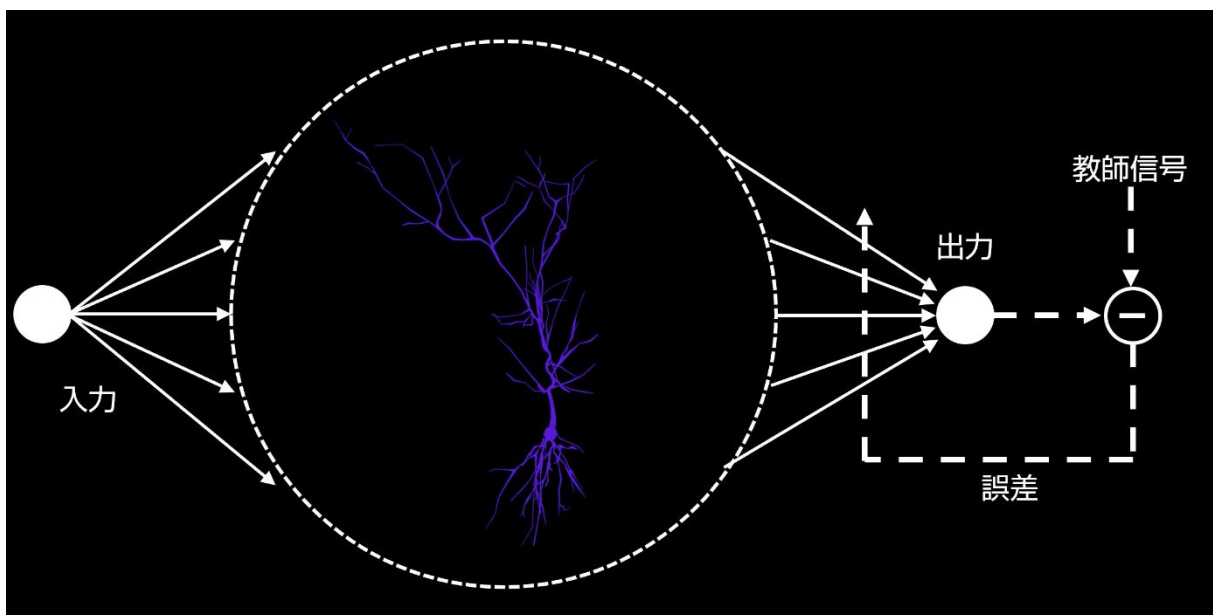


図 1 プロジェクトの概念図

2. 目的

本プロジェクトは、複雑な神経形態にリザーバーコンピューティングという統一的な視座を与えることで、形態と機能の関係性をボトムアップに統合・再評価し、形態学的な計算様式を明らかにすることを目的とする。単一の神経細胞レベルでの計算能力を再評価し、特定の形態データに基づいた神経細胞モデルが、非周期時系列データの学習においてどの程度の能力を発揮するかを検証することを目指した。

3. ソフトウェア開発内容

本プロジェクトでは、単一の神経細胞を計算資源として活用する物理リザーバーコンピューティングの性能評価を目的としたソフトウェア「NeuMoReservoir」を開発した。本ソフトウェアは、プログラミング言語 Python および神経細胞シミュレータ NEURON を基盤としており、緻密な細胞モデルを用いた物理リザーバーの定量的評価を可能とする環境を提供する。特筆すべき点として、利用者が独自に構築した神経細胞モデルの導入が可能であるほか、シナプスの樹状突起における空間配置、細胞形態、およびダイナミクスの時定数といった諸パラメータを任意に変更し、その影響を詳細に検証できる機能を備えている。また、単なる性能評価に留まらず、実効ランクや主成分分析を用いた解析パイプラインを実装しており、神経細胞モデルの持つ動特性を多角的に解析することが可能である。ベンチマークタスクについては、正弦波や Mackey-Glass 方程式の生成といった時系列予測に加え、ランダムスパイク列の分類、さらには音声認識タスクに至るまで幅広く対応しており、多様なアプリケーションへの適合性を検証できる構成となっている。

4. 新規性・優位性

ネットワークを用いず、単一神経細胞モデルのみで実データ（発話数字認識タスク）に対し、最大 70.4% の正解率を達成した。神経細胞の入出力特性が人工ニューロンの ReLU に類似していること、およびその応答特性が計算能力と密接に関わることを明らかにした(図 2)。また、樹状突起上のシナプス配置が計算性能を規定することを突き止め(図 3)、神経細胞の空間形状そのものが計算資源として価値を持つこと

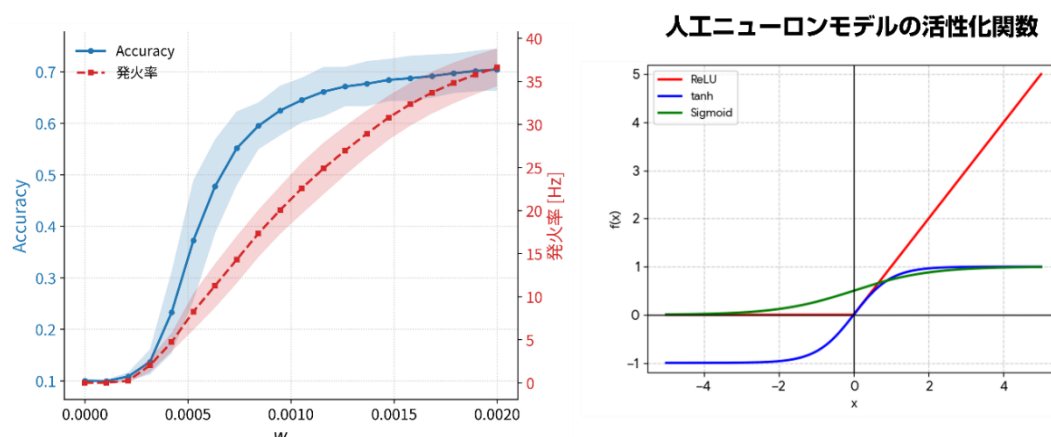


図 2 本プロジェクトの神経細胞モデルの入出力関係と人工ニューロンモデルの比較

を定量的に示した。先行研究では培養神経回路において 60 個の神経細胞を読み出しに使用していたが、本プロジェクトは単一の神経細胞から複数箇所の読み出しを行うことで同等の計算が実行可能であることを示しており、工学的な効率性において優位性を持つ。

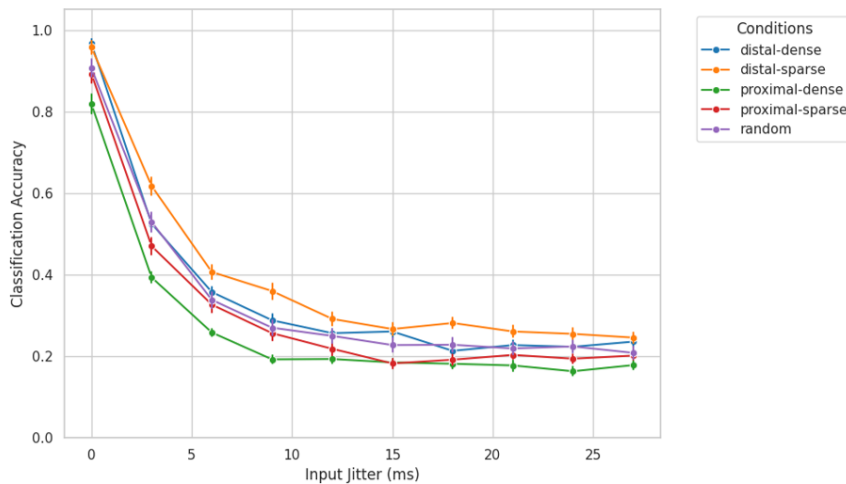


図 3 シナプスの場所の違いによる性能差

5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

物理実装からボトムアップに機械学習を実装できるリザーコンピュティングのフレームワークを提供することで、単一細胞レベルでの高度な情報処理の実証を可能にする。社会的には、パラメータ数を増やして性能を追求する現在の計算パラダイムから脱却し、神経細胞の空間形状を計算リソースとして活用する、極めて省電力かつ高効率な次世代 AI チップの設計指針となることが期待される。将来的な生物計算機やニューロモルフィックハードウェアへの応用を通じて大きな社会的インパクトをもたらす可能性がある。

6. 氏名 (所属)

深水智史(九州工業大学 大学院生命体工学研究科)

(参考) 関連 URL

コード公開リポジトリ (GitHub) :

<https://github.com/DeepWater3104/NeuMoReservoir>