

In-materio reservoir computing with single-walled carbon nanotube/porphyrin-polyoxometalate random network A novel approach for next-generation machine intelligence

著者	Deep Banerjee
発行年	2021-12-27
その他のタイトル	単層カーボンナノチューブ/ポルフィリン-ポリ酸ランダムネットワークを用いたマテリアルリザーバ演算素子 次世代機械知能への新規アプローチ
学位授与番号	17104生工博甲第425号
URL	http://hdl.handle.net/10228/00008723

氏名	BANERJEE DEEP (インド)
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	生工博甲第425号
学位授与の日付	令和3年12月27日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	In-materio reservoir computing with single-walled carbon nanotube/porphyrin-polyoxometalate random network –A novel approach for next-generation machine intelligence (単層カーボンナノチューブ/ポルフィリン-ポリ酸ランダムネットワークを用いたマテリアルリザバー演算素子 – 次世代機械知能への新規アプローチ)
論文審査委員会	委員長 教授 森 江 隆 " 田 向 権 " 松 本 卓 也 " 田 中 啓 文

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、単層カーボンナノチューブ (SWNT) /ポルフィリン-ポリ酸 (Por-POM ポリ酸) 複合体のランダムネットワーク (RNW) をエコーステートネットワーク (ESN) 型物理リザバーとして利用した際の演算特性について材料工学的立場から論じるものである。リカレントニューラルネットワーク (RNN) の一種であるリザバー演算は、多電極からの出力重み部分でしか学習を必要としないため、エネルギー効率がよく、より速い予測タスクや分類タスクを行えると期待されている。非線形性、メモリ効果、高次元性を利用した ESN 型物理リザバーは、現状 AI システムで標準的に使われているソフトウェアベース、もしくは CMOS 回路などで実現されたハードウェアベースの人工ニューラルネットワーク (ANN) の相補的な存在として注目されている。

電気素子のダウンサイジングがムーアの法則の限界に達し、トランジスタのダウンサイジングによる性能向上がこれ以上期待できないことから、複数の隠れ層で逐次的に学習する ANN 演算を使うのみでは、将来的に電力消費量が爆発的に増加することが懸念され、高速化と低消費電力化を両立させるべくさまざまな努力がソフトウェア、ハードウェアの両面からなされている。ESN 型物理リザバーはランダムネットワークから構成されるリザバー部分をニューラルネットワークの隠れ層として用いる革新的な演算方式である。リザバー部分に材料の RNW を利用した場合、材料の中で演算がなされることからインマテリオ・リザバー演算 (以下マテリアル RC) とも呼ばれる。マテリアル

ル RC では、ソフトウェアで採用されている非線形ノードの代わりに RNW のジャンクション部分に生じる物理的、生物的、化学的な高次非線形ダイナミクスを利用し、他の物理リザバー同様、入力層、RNW で作製した隠れ層リザバー、出力層の 3 層で構成され、RNW 部分に満遍なく配置された多電極から得られる出力信号を重みにより線形結合し、目標関数に回帰させることで学習を行う。他の物理リザバーが目指す人工知能の低消費電力化などを志向し、マテリアル RC を作製し、演算能力を調べるのが最大の特徴である。

本論文の構成は以下のとおりである。

第 1 章では、ANN の進化に関する文献を紹介し、フォンノイマン演算機や ANN の学習モデルの欠点を指摘し、その結果、マテリアル RC 演算デバイスを採用することに至った経緯を示す。以前に提案された SWNT/POM ネットワークの理論的 RC シミュレーションモデルを実験的に展開することを目的として、脳のネットワーク構造に似たナノ材料のランダムネットワークデバイスを作製しその動作原理を解明することを目的とする。さらに、SWNT/Por-POM が持つ非線形高次元リザバー特性を検証し、予測と分類という RC のベンチマークタスク実施までを本論文の研究範囲とすることを述べている。

第 2 章では、本論文に用いた材料系や試料作製方法、試料評価法を紹介する。出発材料は、精製された SWNT を Por-POM 溶液中へ分散したものである。ナノリソグラフィで作製した微小電極アレイを有する Si 基板上に、ろ紙上に作製した RNW を湿式転写することで、多電極の SWNT/Por-POM 複合体のリザバー構造を得る。次に、AFM、UV-VIS 分光法、FE-SEM などによる SWNT/Por-POM 複合体の特性評価手法の紹介、ソフトウェアのリザバー演算を参考にした電気回路のセットアップ法を紹介し、最後にマテリアル機械知能の実現のために行った RC デモンストレーションの結果を述べる。

第 3 章では、電圧と時間の関数としての電流ダイナミクスを研究し、このデバイスに内在する非線形情報処理能力を検証する。その結果、Por-POM の酸化還元性に起因する負の微分抵抗 (NDR) が、脳のような時空間情報を生み出す $1/f$ 振動ランダムノイズを出力する。記憶容量 (MC) を計算し、このデバイスがエコー状態特性 (ESP) を有することを証明する。一方、このデバイスは過去の情報はほとんど記憶されないことも分かった。つまり、MC が小さく、非線形性が強いことから、RC のベンチマークとして、波形生成、ブール論理最適化、把持物体分類といった、主に非線形性の高いタスクを選択しその結果を述べる。

第 4 章では、波形生成タスクについて説明した。正弦波電圧を入力した際の、振幅、位相、高調波の周波数が変化する高次元の電圧出力を利用して、余弦波、三角波、矩形波、鋸歯状波を目的波形として回帰最適化を行い、高い学習精度を達成したことなどを述べる。

第 5 章では、2 つの入力信号を用いて OR、AND、XOR、NOR、NAND、XNOR の

ブール型論理関数を構築し、複雑な関数最適化のタスクを実行した。波形生成タスクと同様に、NDR の非線形性が存在するために、高い学習精度を達成できたことを述べる。

第6章では、このデバイスを分類問題にも適用した結果を示す。ここでは、ぬいぐるみ、犬、積み木、バスの4種の物体について、トヨタの人間支援ロボット HSR のロボットハンドに設置された圧力センサーから得られた把持触覚信号を入力し、2値分類を行い、正答を予測するための出力重みを最適化するために、リッジ回帰による学習を行い、すべての対象物の分類に成功したことを述べる。

最後に、第7章では、将来展望と結論を述べる。RNW 構造を拡張し、同じ材料でリザーバー部を3次元構造に拡張させた場合、リザーバー部のジャンクション数を劇的な増加により大きな MC を達成し、時系列予測の精度向上が期待されることなどを述べる。結論として、SWNT/Por-POM の RNW を初めてマテリアル RC として利用、演算させ、次世代機械知能の有力な候補と期待されることを述べている。

学位論文審査の結果の要旨

本論文に関し、SWNT/Por-POM ランダムネットワークの作製法、Por-POM の物性について、リザーバーデバイスの作製法、リザーバーデバイスの入出力信号の取り扱い方、学習のさせ方、把持物体認識やブール論理演算関数の学習法、ジャンクション数と記憶容量との関係についてなど多くの質問があり、いずれも著者から満足な回答が得られた。また、公聴会は ZOOM を用いて遠隔で広く配信され、国内外からの多数の出席者があり、種々の質問がなされたが、いずれも著者の説明によって質問者の理解が得られた。

以上により、論文審査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。