



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Physical Computing Systems : Theory, Implementation and Functionality [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	Kan, Shaohua
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15662号
Issue Date	2023-09-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/90753">https://hdl.handle.net/2115/90753</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Kan_Shaohua_review.pdf, 審査の要旨



## 学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 Kan Shaohua

審査担当者 主査教授 浅井 哲也  
副査教授 池辺 将之  
副査教授 葛西 誠也  
副査教授 太田 裕道

### 学位論文題名

Physical Computing Systems: Theory, Implementation and Functionality

(物理計算システム: 機能実現への理論と実践)

ポストムーア課題としてより小型、より高速、よりエネルギー効率の高い方法論を求め、コンピューティングの新しい形式の一つとして、非従来型コンピューティング (Unconventional Computing: UC) がある。UC はコンピューティングリソースとして機能する無限の物理現象を探索することが主な目標であるが、物理現象の多様性と、統一されたパラダイムの欠如により、一律の探索方法が未だ示されていない。UC の理解が進み、統一形式理論に洗練される為には、既存の物理デバイスで利用可能な計算パラダイムが探索され、将来のシステム設計に指針を提供することが必要である。そのため、動的システムを利用する UC パラダイムのひとつであるリザーバコンピューティング (Reservoir Computing: RC) が、その恣意的かつ多様な物理実装により近年盛んに議論されている。本研究の目的は、RC 構造設計と非線形関数選択のさまざまな体系を包括的に分析し、情報処理に対するそれぞれの影響を観察することである。最終的な目的は、提案スキームと設計ルールの有用性を検証し、それらに基づいて小型、シンプル、高速、低消費電力の物理デバイスを開発することにある。さらに、既存の機器の特性に応じて、適切な UC パラダイムを見つける試みも、今後のシステム設計に必要である。

第2章では、数学的に定義された行列からリザーバの単純な構造を定義し、それに最も単純な実現形式であるダイオード対によって非線形性を定義し、この非線形リソースから実現しうる RC を提案した。ほとんどの物理 RC 設計スキームのように RC を「ブラックボックス」として扱うのではなく、ダイオードの I-V 曲線にダイナミクスを与え、その効果を観察するために、外部パラメータによって単純に制御可能な物理システムを実現した。このスキームは独立した処理ノードの設計思想に由来しており、これに基づいて、処理ノードとノード配置構造の非線形関数の影響をそれぞれ調べた。その結果、ノード構造は非線形関数よりも記憶容量と非線形応答を必要とするベンチマークタスク (NARMA2)、短期記憶容量タスク、分類タスクに大きな影響を与えることが判った。数値計算におけるリザーバは、ノード間の多数のランダムで強力な接続により、ネットワーク内の元の情報のエコー状態の継続時間が確保され、短期的なメモリ容量や高いメモリ容量を必要とするタスクに効果的であるが、情報の分類には干渉することが判った。一方、接続がまばらで弱いリザーバは、NARMA2 タスクと分類タスクの両方をうまく解決した。提案した並列グループ構造は、NARMA2 と分類タスクの両方のパフォーマンスにおいて、数値計算の結果と同様に機能した。並列ノード構造では NARMA2 タスクをうまく解決できなかったものの、分類タスクで能力が

低下することが判った。これにより、並列構造のパラメータがリザーバ内の結合マトリクスに直接反映され、物理システムの固有パラメータと適切に関連づけることが可能になったため、将来の物理 RC システムの設計と選択に新しい道が開かれた。

第 3 章では、平行構造に基づいて新しい物理デバイスである平面平行電極を用いた電気化学リザーバを検証した。電極表面に滴下した溶液は、その特有の I-V 特性により異なる非線形関数を提供し、異なる電極で発生するわずかに異なる電気化学反応が処理ノードのフィードバックゲインとして機能する。短期記憶容量の結果では、表面にどのような溶液を加えても、隣接する電極間にある程度の相互作用が存在することが示されており、これは第 2 章で説明した並列群構造におけるフィードフォワードゲインを意味する。このデバイスは、同じ NARMA2 タスクの並列グループ構造の予測誤差と一致する予測誤差を示した。蒸留水と比較して複雑な酸化還元反応もつ分子を含む溶液は、より動的な I-V 特性を示し、周期信号の再現に役立つことがわかり、高次の非線形問題を解決する際の課題を明確にした。溶媒が非プロトン性溶媒に置き換えられたときにシステムの計算能力が失われたため、これらの高次の非線形応答の発生は溶液内のプロトンやイオンによってもたらされていると結論づけた。

次に、第 4 章と第 5 章では、独自の特性に基づいて既存の物理システムに適切な UC パラダイムを適用する方法を示した。第 4 章では、内部の電荷の確率的転送プロセスを備えた SWNT/POM ネットワーク上で確率的コンピューティングパラダイムを実行する実現可能性を検討した。実際のデバイスのレベルでは、出力電流の中のスパイク発生密度が、ソース・ドレイン電圧の条件下でゲート電圧によって制御される。正弦波励起の制御電圧下では、出力電流は正弦波を示し、出力電流のスパイク密度が同じ大きさのゲート電圧を印加する回数に応じて増加した。上記の観察は実験で実現されたものであるが、これをシミュレーションで再現した。ドレイン電圧正負パルスの印加に伴って電流スパイク密度が徐々に増加または減衰することを実現した。この結果は、SWNT/POM ネットワークデバイスが確率的コンピューティング用に完全に実装されたハードウェア回路のエンコーダ、デコーダ、およびメモリを置き換える大きな可能性を示す。第 5 章では、メモリ効果を生成するドーパントネットワーク(シリコン内ホウ素ドーパント)上の読み出し回路を使用し、時間的および空間的信号を処理する方法を検討した。ドーパントネットワークは時空間信号処理に対して最大プーリング操作と同様の効果があることが判明しており、ドーパントネットワークによって処理されたデータは線形分類器で直接使用できる。分類に必要なニューロンの数は、畳み込みニューラルネットワークのサイズよりもはるかに小さいため、畳み込みカーネルとしてのドーパントネットワークの大きな利点が表れた。

本研究により、物理コンピューティングシステムの設計と利用に関する新たな洞察が得られた。シンプルな設計原理と小さなデバイスから出発して、UC の理論を探求および補足し、将来のシステム設計と開発のための別の方法を開拓した。この研究の結果に基づいて、さまざまな物理 UC スキームの設計と評価を改善できる。

これを要するに、本研究はエッジ AI 向けの非従来型コンピューティング物理現象利用探索法についてその構築法を確立したものであり、AI と物理デバイスとを結びつける学際的な研究分野に対して貢献するところ大なるものがある。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。