

シンプルな物理実装から考える物理リザーバーの設計指針

Design Guidelines for Physical Reservoirs Considered by a Simple Physical Implementation

東理大先進工¹ ○(M2) 山崎 悠太郎¹, 木下 健太郎¹

Tokyo Univ. of Sci.¹ ○Yutaro Yamazaki¹ and Kentaro Kinoshita¹

E-mail: 1522549@ed.tus.ac.jp

1. 序論

近年, エッジコンピューティング [1] のニーズが高まり, 高い学習性能を維持したまま計算コストを削減する手法が求められている. その候補の一つが, リザーバーコンピューティング (RC) である [2]. RC は, 複雑なアルゴリズムを用いずとも, 予測, パターン解析などのタスクを読み出し時のみの学習で実行可能とするものである. ここで, RC アプローチにおける“リザーバー”の役割は, システム入力をより高次元の信号に変換することであるため, 入力に対して非線形に応答する実際の物理系を用いても良い. このような物理実装を施したリザーバーは, 物理リザーバーと呼ばれている [3]. 物理リザーバーの最近のトレンドとして, システム入力に対して複雑な物理ダイナミクスを示す系をリザーバーに採用し, 最高の計算性能を達成しようという実装実験が活発に行われている. しかし, 扱う物理系があまりにも複雑だと, 学習結果の解釈が難しくなる. 本研究では, シンプルなネットワーク構造や物理ダイナミクスを持つ系をリザーバーに採用し, 学習には何が求められるのか? その基本的な問いを理論的に明らかにすることを試みた.

2. 実験方法

本稿で紹介する数値結果は, macOS 13.2.1 が動作する arm64 CPU 上で Python 3.10.9, NumPy 1.23.5 を使用して計算した. また, 回路シミュレーションには LTspice (バージョン 17.0.42) を用いた. 非線形自己回帰移動平均 (NARMA) モデルの予測タスクに基づき, リザーバーの性能を評価し, 予測誤差 (Normalized Mean Squared Error, NMSE) を算出した. NARMA モデルを予測するためには, リザーバーに非線形性と短期記憶性が求められる.

3. 結果及び考察

我々は, 物理リザーバーの設計指針を明らかにするために, ネットワーク型リザーバーとして Echo State Network (ESN), 遅延型リザーバーを表現するリング状の Delay Cycle Reservoir (DCR), シンプルな過渡特性を示す CR 直列回路などを用いてリザーバーを構築し比較実験を行った. 結果の一例として, 区間

[0, 0.5] の一様分布に従う乱数をシステム入力として様々なリザーバー (ノード数は 50 で統一) に入力し, その応答であるリザーバー状態ベクトル $\mathbf{x}(n)$ を可視化したものを Fig. 1(a) ~ (d) に示す. 図において, カラーバーは信号の強度を表している. 精度の良い学習を行うには, ランダムで高次元な特徴空間が求められるため, 図中の各 Time step における垂直方向の強度分布が異なること, 即ち隣合うノードの値が類似していないことが望ましい. 以上を踏まえて各リザーバーの $\mathbf{x}(n)$ を見ると, Fig. 1(a) の ESN では Fig. 1(b), (c) の DCR, 単体 CR に比べ, $\mathbf{x}(n)$ の線形独立性が高いことが分かる. 評価結果を Fig. 1(e) に示す. 単体 CR リザーバーの性能は, ESN, DCR に比べ劣っている. そこで, できるだけ互いに相関しないリザーバー出力を取得することを目的に, 異なる時定数を有する CR 回路を並列に接続したりザーバーを構築した. 結果, Fig. 1(d) に示すように, 単体 CR に比べて高次元の $\mathbf{x}(n)$ を取得することが可能になり, NARMA モデルの予測性能が向上することが分かった.

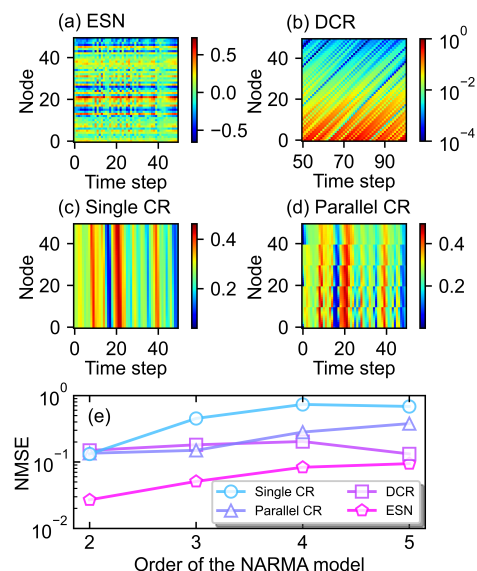


Fig. 1 Visualization of the reservoir state vector $\mathbf{x}(n)$ for (a) ESN, (b) DCR, (c) Single CR, and (d) Parallel CR. (e) NARMA2-5 prediction task.

参考文献

- [1] W. Shi *et al.*, IEEE Internet of Things Journal **3**, 637 (2016).
- [2] D. Verstraeten *et al.*, Neural Networks **20**, 391 (2007).
- [3] G. Tanaka *et al.*, Neural Networks **115**, 100 (2019).