

ノード出力行列の特異値に見る量子リザバのリッチ・ダイナミクス

Rich Dynamics in Quantum Reservoir

Observed in Singular Values of Node-Output Matrix

日立 研 究 〇 戸 丸 辰 也

Hitachi, Research & Development Group, 〇 Tatsuya Tomaru

E-mail: tatsuya.tomaru.yq@hitachi.com

導入：リザバ・コンピューティングはリカレント・ニューラルネットワークの亜流に分類されるが出力層以外の係数を固定化するところに特徴があり、そのおかげで物理的力学系をそのままリザバとして利用し得る[1]。量子系は線形重ね合わせと量子縛れが本質的な特徴であり、リザバに利用できれば豊富なダイナミクスが期待できる。文献[2]ではアンサンブル量子系を想定して量子リザバの高い可能性を示した[3]。ところで、量子系は一種の振動子系なので古典的な振動子リザバを用いても量子リザバと類似の特性が得られることが期待できる。本報告では LCR 回路リザバと量子リザバを想定した計算機シミュレーションを行い、類似性と違いを示す。

シミュレーション：タスクとして最も単純なタイマータスクを実施した。これは入力をステップ関数、ターゲットをパルスとするもので、入力周期を τ として、時刻 $0 \leq t/\tau \leq 99$ で入力 0、 $t/\tau \geq 100$ で入力 1 とし、ターゲットを任意の $100 \leq t/\tau < 300$ で一か所だけ 1、その他の時刻で 0 とする。 $-400 \leq t/\tau < 0$ は乱数入力とする。量子リザバはイジングモデルの 4 qubit 系とし、一つの qubit に局所磁場として入力し、残り 3 つの qubits を測定対象とする。文献[2]と同様にアンサンブル系を想定する。LCR リザバは 1 – 6 振動系を想定し、相互誘導で結合させた。LCR 振動子は線形なのでジョセフソン接合(JJ)を加えて非線形性を陽に加えた振動子もシミュレートした。時刻 t_k におけるノード i の測定値を $x_i(t_k)$ 、学習パラメータを w_i とし、出力 $y(t_k)$ が $y(t_k) = \sum_i x_i(t_k) w_i$ で与えられるとする。 $y(t_k)$ 及び w_i を成分とする列ベクトルを $\mathbf{y}$ 及び $\mathbf{w}$ 、 $x_i(t_k)$ を (k, i) 成分とする行列を $\mathbf{X}$ とすれば $\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{w}$ である。 $\mathbf{X}$ を $m \times n$ 行列、 $\text{rank}\mathbf{X} = n$ とすれば $\mathbf{w} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}$ と変形できる。ターゲットパルスを $\mathbf{y}^0$ とすれば最適化された係数は $\mathbf{w}^0 = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}^0$ で与えられる。 $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T$ を求めるには $\mathbf{X}$ を特異値分解するのが便利である

結果： $\mathbf{X}$ の特異値を大きい順に並べた結果を Fig. 1 に示す。量子リザバではすべての特異値が非零になるが、LCR リザバでは振動子の数を N として $(2N+1)$ 個の特異値のみが非零になる。ここで 10^{-7} 以下の特異値は零と見なした。非零の特異値が多いほどリザバのダイナミクスがリッチであることを意味しており、量子系の優位性が見て取れる。LCR リザバに JJ を加えればダイナミクスは少し向上し、1 振動系の場合ならば 4 番目の特異値が零と見なせないレベルになる。但し、量子系で見られる特異値の大きさには及ばない。

まとめ：特異値の分布はリザバの持つダイナミクスを示す良い指標になっており、量子系に備わったリッチなダイナミクスを明示している。

[1] G. Tanaka, et al., arXiv:1808.04962v2.

[2] K. Fujii and K. Nakajima, Phys. Rev. Applied **8**, 024030 (2017).

[3] 量子系では確率的性質のために測定に伴う back action があるが、アンサンブル系を想定してその効果は無視した。

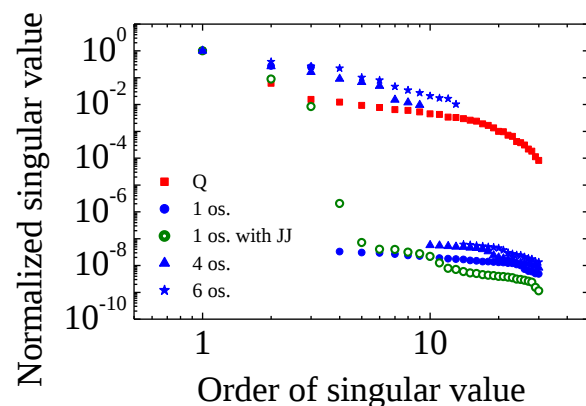


Fig. 1. Only quantum reservoir has many non-zero singular values. ■: Quantum reservoir, ●: One-LCR oscillator reservoir, ○: One-LCR oscillator reservoir with JJ, ▲: Four-LCR oscillator reservoir, ★: Six-LCR oscillator reservoir.