

リザーバー計算系におけるネットワークの複雑性と計算能力

Consideration on Network Complexity and Computing Capacity in RC Systems

北大 量子集積センターおよび情報科学院 ○葛西 誠也

RCIQE Hokkaido Univ., °Seiya Kasai E-mail: kasai@rciqe.hokudai.ac.jp

はじめに：リザーバー計算 (RC) やエクストリームラーニングマシン (ELM) は、ニューラルネットワーク内部を変更することなく機械学習を実現するユニークな計算フレームワークであり、近年その物理実装の試みが盛んである。ネットワーク構造が複雑であるほど計算性能が高いとされるが、複雑さという用語の数学的意味や指標は明確ではない。そこで本研究では、RC や ELM を構成するネットワークの複雑性と計算性能について、ネットワークモチーフに着目し検討した。
方法と結果：ネットワークのモチーフとは少数ノードから構成されるサブグラフ (図 1) である。ノードが単純な非線形演算子でも、モチーフが多彩な機能を生み出す。生体ネットワークにはさまざまなモチーフが存在し、種々の機能が実現されていることが知られている[1]。RC と ELM の構造的違いは、モチーフレベルでの再帰プロセスの有無といえる。以上のようにモチーフの多様さとネットワークの複雑さがリンクする。

モチーフの多様性は、ノードに接続可能な辺の数 k_0 と実際に接続される辺の数 k ($\leq k_0$) の比 $C_i = k/k_0$ で決まる。 C_i はクラスター係数と呼ばれる。 $C_i \sim 0$ ではノードは孤立しモチーフを形作ることができない。一方 $C_i \sim 1$ では各々のノードに接続する辺の数 k_0 が等しくなり、ノード間の構造的相違が失われる。すなわちネットワークに存在するモチーフは単一化する。よって、モチーフの多様性が現れる条件は $C_i \sim 0.5$ と考えられる。

ネットワークトポロジと C_i の相関は複雑ネットワーク理論で解析されている。図 2 にスケールフリー、スモールワールド (Watts-Strogatz モデル)、ランダムネットワーク (Erdős-Rényi モデル) における C_i を示す。スモールワールドはランダム度 p に対する変化を示している[2]。スケールフリーやランダムネットワークは C_i が 0 近傍であるが、スモールワールドではランダム性がある程度低い状況で $C_i \sim 0.5$ が実現される。これはスモールワールド型の RC の計算能力が高いという結果[3]を説明する。同時にネットワークの複雑性とランダム性は区別されることがわかる。

[1] V. Saint-André, Comput. Struct. Biotechnol. J. **19** (2021) 4884.

[2] L. F. Costa, F. A. Rodrigues, G. Travieso, and P. R. Villas Boas, Adv. Phys. **56** (2007) 167.

[3] K. Kawai, J. Park, M. Asada, Neural Networks **112** (2019) 15.

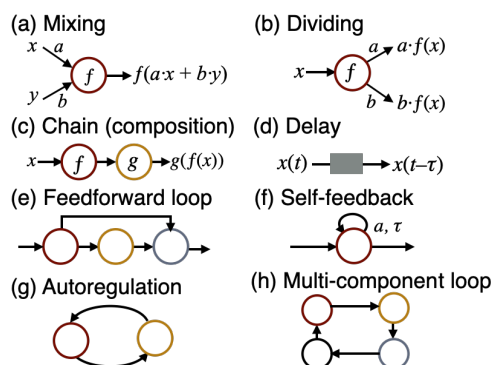


Fig. 1 Various network motifs.

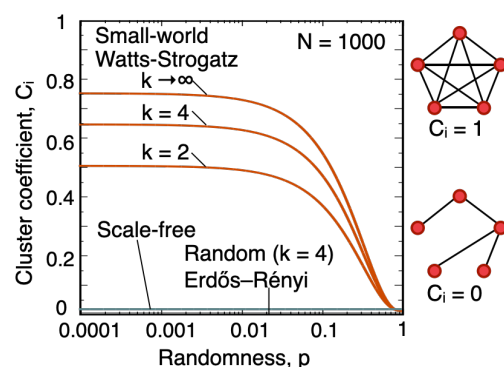


Fig. 2 Cluster coefficient for various networks.