

Osaka University

## フラクタル性に着目した 脳機能ネットワークの接続構造の分析と インターネットの高品質化への応用

大阪大学 基礎工学部 情報科学科  
村田研究室 四條伸伸

平成25年度 特別研究報告発表会 2014 / 2 / 21

Osaka University

### 研究の背景

- インターネットの社会インフラ化
  - スマートフォン・タブレット端末の普及、生活に欠かせない様々なシステム
  - 通信需要、接続端末数が急増
  - インターネットをより高品質なものにする必要性
- 大規模かつ複雑な人工ネットワーク
  - 新技術と既存技術の共存による技術の多様化、管理面の複雑化
  - AS (自律システム) が全体の構造を考えずに接続関係を構築することによるトラヒックの集中

↓

高品質なインターネットを構築するための  
新たなアプローチが必要

Osaka University

### ヒトの脳機能ネットワーク

- 脳機能計測による解析
  - 多彩な機能を高度なレベルで発揮
  - 複雑でありながら少ないエネルギーで管理・制御

⇒ 脳機能ネットワークの特性を取り入れることによる高品質化への期待
- 脳機能ネットワークトポロジーの構造的特徴
  - スケールフリー性**  
次数が  $k$  となるノードの出現確率  $P(k)$  が  $k^{-\alpha}$  に従う
  - スモールワールド性**  
ネットワークの規模に対してノード間の平均ホップ長が小さい
  - フラクタル性**  
ネットワーク粒度に対するノード数の割合が保存される  
脳各機能の独立性と依存性の調和を図る[13]
  - 階層モジュール構造**  
ノード間が局所的に密に連結される構造が階層的に見られる

インターネットと共通の特徴

脳機能ネットワークに固有の特徴

[13] L. K. Gallos, et al. "A small world of weak ties provides optimal global integration of all similar modules in functional brain networks." Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 105, pp. 2625-2630, Feb. 2008.

Osaka University

### 研究の目的と方法

- 研究目的
  - インターネット高品質化への応用に向けた知見を得るために、脳機能ネットワークの接続構造を分析し、その構造がもたらす利点を解明する
- 研究方法
  - 脳機能ネットワークの接続構造の分析
  - インターネットへの応用の観点からの脳機能ネットワークの性能評価

E. Bullmore and O. Sporns, "Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems," Nature Reviews Neuroscience, vol. 10, pp. 186-198, Mar. 2009.

Osaka University

### 接続構造の分析

- 分析の対象
  - fMRIの実測データから生成したトポロジー
- 分析の方法
  - 階層モジュール構造を検出可能な Louvain 法[24]を用いて異なる機能モジュールレベルのトポロジーを生成
    - 計測点そのものは機能を提供しているわけではない
    - モジュールは脳「機能」と密接に関係している
  - 機能モジュール間の接続構造の概要を分析
- 分析に用いる指標
  - フラクタル性
  - 次数分布
  - 次数相関
  - モジュール間を接続するノードの次数とリンク数の相関
  - モジュールサイズとモジュール間リンク数の相関
    - モジュール内部のノード数が多いほど、モジュールサイズが大きくなる

階層	ノード数	リンク数
0	11420	44049
1	1989	3007
2	432	654
3	179	288
4	146	236

[24] V. Blondel, J. Guillaume, B. Lefebvre, and F. Hurteaux, "Fast unfolding of communities in large networks," Journal of Statistical Mechanics, no. 1-32, Jul. 2008.

Osaka University

### 接続構造の分析結果

全ての階層で以下の構造が見られた

- モジュールレベルトポロジー**
  - フラクタル性
  - スケールフリー性
  - 低い次数相関
- モジュール内部トポロジー**
  - スケールフリー性
  - 高い次数相関
- モジュール間リンク**
  - 大きなモジュールは様々なモジュールと多数のリンクを構築
  - 小さなモジュールは大きなモジュールと優先的にリンクを構築
  - モジュール内部の平均次数となるノードが多数のリンクを構築

ネットワークの観点からの利点の予想

- モジュール間の接続が多様である
- 故障がモジュール外部へ波及しない
- 下位階層での故障が上位階層へ波及しない

Osaka University 7

### 性能評価

- モジュール間の接続が多様であることを検証
- 多様性として経路のホップ長に着目し定量的に評価

● 評価指標

- 任意のモジュール間について上位 300 本の最短経路を算出し 全てのモジュール間の上位  $K$  番目の最短経路のホップ長の平均を算出

● 比較対象ネットワークモデル

- ノード数とリンク数は各階層のモジュールレベルトポロジーと同じ値に設定

ランダムモデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>機能間を無作為に接続するモデル</li> <li>ノードをランダムに接続</li> </ul>
Waxman モデル <sup>[27]</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>解剖学的に近い位置にある機能が密に接続される特徴を反映するモデル</li> <li>物理的に近い位置にあるノードを優先的に接続</li> </ul>
WS (Watts-Strogatz) モデル <sup>[28]</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>機能間通信の局所的最適化と大域的効率化に相当するモデル</li> <li>スモールワールド性の実現</li> </ul>

[27] B. M. Waxman, "Routing of Multipoint Connectors," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 6, pp. 1617-1622, Dec. 1988.  
[28] D. Watts and S. Strogatz, "Collective dynamics of small-world networks," Nature, vol. 393, pp. 440-442, June 1998.

Osaka University 8

### 性能評価の結果

● **平均ホップ長が短い**

- 品質の良い経路を確保

● **分布が狭い範囲に集中**

- 比較対象トポロジーとくらべて5倍以上良質な経路を確保

→ 脳の機能間の接続構造は良質な経路を多数確保しているという点で優れている

Osaka University 9

### まとめと今後の課題

● **まとめ**

- 脳機能ネットワークの接続構造を明らかにした
- 接続構造の利点を明らかにした
  - ホップ長の観点で良質な経路を多数確保
  - 比較対象より5倍以上多くの良質な経路を持つ

↓

インターネットに応用することで良質な経路の数が増加する見通しを得た

● **今後の課題**

- 脳機能ネットワークの利点に関する追加検証