

Osaka University

A Configuration Method of Virtual Networks with Hierarchical Robustness Inspired by the Fractality of Brain Functional Networks

脳機能ネットワークのフラクタル性に着想を得た階層的なロバスト性を有する仮想ネットワーク構成手法

四條 能伸
情報ネットワーク学専攻 村田研究室

情報ネットワーク学専攻修士論文発表会 2016 / 2 / 15

Osaka University

研究の背景と目的

- ネットワーク仮想化技術への大きな注目
 - インターネットを介したサービスの多様化・複雑化
 - サービスごとに仮想ネットワークを構成することで、様々な性能面・管理面における要求に応えることが可能
- ネットワーク仮想化技術における重要課題
 - 仮想ネットワークを効率的に物理ネットワークに埋め込む方法
 - VNE 問題として知られ、様々な手法が提案されている
 - 埋め込み対象の仮想ネットワークは小規模かつ単純
 - 仮想ネットワークの構成方法
 - 検討されていない

頑健性を維持しつつ将来的な規模増大に対応可能な仮想ネットワークの構成方法を提案

構築方法のアプローチとして脳機能ネットワークに着目

Osaka University

脳機能ネットワーク

- 脳の機能的相互作用を表すネットワーク
 - 大規模なネットワーク
 - 脳科学分野でトポロジー構造の究明が進められている
- 通信ネットワークへの応用を見据えたトポロジー分析構造
 - 次数分布のべき則性
 - モジュール性
 - フラクタル性**

フラクタル性に着目して解析

性能

- 故障に対するロバスト性
- 多くの冗長経路を確保

Osaka University

フラクタル性[13]

- トポロジーの“拡大率”に対するノード数の割合が一定となる性質
 - 拡大率 l_B : ホップ長
 - ノード数 N_B : ホップ長 l_B 未満で到達可能なクラスターに分けた時の最少クラスター数
- 階層モジュール構造と密接に関係
 - モジュールの包含的な関係を表した構造
 - フラクタル性を利用した「拡大・縮小」に対応
- ハブノード間に存在するリンク数が非常に少ない[14]
 - 脳機能ネットワークにも共通して見られる特徴

Osaka University

提案手法の概要

[28] R. K. Pan and S. Sinha, "Modular networks with hierarchical organization: The dynamical implications of complex structure," Indian Academy of Sciences, vol. 71, pp. 331–340, Aug. 2008.

階層モジュール構造とハブノード間以外でのリンクの構築を実現することでフラクタル性を有する仮想ネットワークを構成

- [Step1] 単純階層モデル[28]による階層モジュール構造の構築
- [Step2] フラクタル性の操作を目的としたモジュール間リンクの構築

Osaka University

提案手法 - Step1

[28] R. K. Pan and S. Sinha, "Modular networks with hierarchical organization: The dynamical implications of complex structure," Indian Academy of Sciences, vol. 71, pp. 331–340, Aug. 2008.

単純階層モデル[28]による階層モジュール構造の構築

階層 1 (最下層)

- N ノード, L リンクの任意のトポロジー (リンク密度 $\rho_1 = \frac{2L}{N(N-1)}$ とする)

階層 h (≥ 2)

- 階層 $h-1$ のトポロジーをモジュールとして m 個用意する
- 各モジュール間をリンク密度 $\rho_h = d \times \rho_{h-1}$ でスター型に接続 ($d \in (0, 1)$)

どのノード間にモジュール間リンクを構築するかは次のステップで考える

Osaka University 7

提案手法 - Step2

フラクタル性の操作を目的としたモジュール間リンクの構築

- MIN: 次数の積が最小となるノード間にリンクを構築
- C[α]: 対象の2つのモジュールから下式に基づいてそれぞれ独立にノード i を選択しそのノード間にリンクを構築
 - パラメータ α により様々なノード間にモジュール間リンクを構築

$$P(i) = \frac{(d_i)^\alpha}{\sum_{j \in V} (d_j)^\alpha}$$

d_i : ノード i の次数
 V : ノード集合

非ハブ間のみ
主に非ハブ間、少数が非ハブ-ハブ間
ハブ-ハブ間に極少数、それ以外に満遍なく散らばる
主にハブ間、少数が非ハブ-ハブ間

ハブノード以外のノード間にリンクを構築 → フラクタル性
ハブノード間にリンクを構築 → 非フラクタル性

Osaka University 8

評価

評価指標

- フラクタル性
- 故障に伴うノード・モジュール間の到達可能率
 - モジュール間リンクの両端のノードが故障
 - 次数が高い順にノードが故障
 - ランダムに選択されたノードが故障
- ノードの負荷
 - 任意のノード間が通信する際の Node Betweenness Centrality
- 平均ホップ長・直径

提案手法でフラクタル性を有する仮想ネットワークを構成できることを検証
フラクタル仮想ネットワークの故障に対するロバスト性を評価

評価対象トポロジー

- 階層性がある場合とない場合の双方で、様々なモジュール間リンク構築方法を用いて 8192 ノードのトポロジー生成
 - 最下層トポロジー: BA モデルで生成した 128 ノード 256 リンクのトポロジー
 - 各階層を構成するモジュール数 m とトポロジーの階層数 h : $(m, h) = (2, 7), (64, 2)$
 - 階層 h と階層 $h-1$ のリンク密度の比 d : 0.20
 - モジュール間リンクの接続方法: MIN, C[0.0], C[1.0], C[2.0], C[3.0]

Osaka University 9

フラクタル性の分析結果

- モジュール間リンクをハブノード以外のノード間で構築した場合にフラクタル性を有するトポロジーを構成できている
- 階層性が無い場合はフラクタル性は得られない

階層数 7
階層数 2 (階層性無し)

ハブノードが関与している
ハブノードが関与していない

Osaka University 10

故障に伴う到達可能率の評価結果

- フラクタル性を有するトポロジーのロバスト性は高い
- 下位層の到達可能率が低下しても上位層では到達可能率を維持できる

最下層ノードレベル
到達可能なモジュール

故障前
故障後

階層 1 (最下層ノードレベル)
階層 2 (モジュールレベル)

フラクタル性なし
フラクタル性あり

Osaka University 11

まとめと今後の課題

まとめ

- 通信ネットワークへの応用を見据えた脳機能ネットワークのトポロジー分析
 - 既存の通信ネットワークには見られない「フラクタル」という構造
 - フラクタル性は、故障に対するロバスト性と多くの冗長経路の確保に寄与
- フラクタル性を有する仮想ネットワークの構成手法を提案
 - 階層モジュール構造の構築
 - 非ハブノードを介したモジュール間の接続
- フラクタル性を有する仮想ネットワークの性能を評価
 - 様々な故障シナリオに対し故障に伴うノード・モジュール間の到達可能率を高く維持
 - 下位層の到達可能率が低下しても上位層では到達可能率を高く維持
 - ノードにかかる最大負荷を軽減
 - トポロジー規模の増大に対する負荷の上昇を抑制
 - 平均ホップ長と直径が増大

今後の課題

- 他のパラメータセットを用いて構成した仮想ネットワークトポロジーの評価
- 他のモジュールレベルトポロジーを用いたときの評価