

## 相互接続されたネットワークにおけるアソータビティが通信効率とロバスト性にもたらす効果

### Assortativity's effect on efficiency and robustness in inter-connected networks

**石倉 秀**  
 学籍番号：33E14001  
 村田研究室

1

## 研究背景と目的

**相互接続ネットワーク**

- 単一のネットワークが相互に接続された構造
- 例：インターネット

**情報ネットワークの大規模化・複雑化**

- 多数のネットワークによる相互接続化が進む
- 相互接続ネットワークとしての信頼性・効率性の向上
- 単一ネットワーク構造とネットワーク間接続構造の両方を考慮する必要がある

↓

接続構造を考える上で同様に相互接続されたモジュール構造を有する人間の脳ネットワークに着目

**人間の脳ネットワーク** [1,2]

- 適応的に多くのタスクを実行する
- 通信効率とロバスト性のトレードオフを最適化
- アソータティブな接続構造がロバスト性や通信効率に寄与

**研究目的**  
 相互接続ネットワークにおける、ネットワーク内/間のアソータビティの影響を明らかにする

[1] M. W. Cole, J. R. Reynolds, J. D. Power, G. Repovs, A. Anticicic, and T. S. Braver, "Multi-task connectivity reveals flexible hubs for adaptive task control," Nature neuroscience, vol. 16, no. 9, pp. 1348-1355, 2013.  
 [2] E. Bullmore and O. Sporns, "The economy of brain network organization," Nature Reviews Neuroscience, vol. 13, no. 5, pp. 336-349, May 2012.

2

## アソータビティとその定義

接続されたノード間の次数に関する指標

- Assortative : 似た次数のノード間が接続される
- Disassortative : 遠い次数のノード間が接続される

Assortative

Disassortative

**ネットワーク内のアソータビティ**

Assortative coefficient ( $r$ ) [3]: 
$$r = \frac{1}{\sigma_q^2} \left[ \sum_{j,k} jkq(j,k) - \left( \sum_j jq(j) \right)^2 \right]$$

$q(j,k)$ : ランダムに選択したリンクの端点の次数が  $j+1$  と  $k+1$  である確率  
 $q(j)$ : ランダムに選択したノードの次数が  $j+1$  である確率  
 $\sigma_q^2$ :  $q(j)$  の標準偏差

Range of  $r$      Disassortative     No correlation     Assortative

-1     ←     0     →     1

**ネットワーク間のアソータビティ**

Universal assortative coefficient ( $\rho$ ) [4]: 
$$\rho = \frac{\sum_{e \in E} (J - U_e)(K - U_e)}{M \sigma_q^2}$$

$J, K$ : 選択されたリンクの両端の次数  
 $M$ : 全リンクの本数  
 $U_e$ : 残存次数の平均値  
 $\sigma_q^2$ :  $q(j)$  の標準偏差

ネットワーク間を接続するリンクの集合

[3] M. E. Newman, "Assortative mixing in networks," Physical review letters, vol. 89, no. 20, pp. 1-4, 2002.  
 [4] -Q. Zhang, S.-Q. Cheng, and G.-Q. Zhang, "A universal assortativity measure for network analysis," arXiv preprint arXiv:1212.6456, vol. 1, pp. 1-8, Dec. 2012.

3

## 調査方法の概要

**調査方法**  
 異なるアソータビティを有するトポロジーを作成し比較

**ネットワーク内**

- 様々なネットワーク構築モデルを用いてネットワークを構築
- 2本のリンクを選択しリワイヤリングを繰り返すことでアソータビティを変更
- アソータビティのみを変更し、次数相関は変化しない

アソータビティを増加させる接続  
 ↓  
 アソータビティを低下させる接続

**ネットワーク間**

- 同一のネットワークを2つ用意する
- ランダムに  $M$  本のリンクでネットワーク間を接続
- 目標値の範囲内に達するまでネットワーク間リンクの削除と追加を繰り返す
- ネットワーク間アソータビティが目標値に近づかない場合は追加するリンクの選択をやり直す

4

## 評価指標

- 平均ホップ長**
- 選択的次數順故障に対するロバスト性**
  - 次数順にノード故障を発生させた際の最大連結成分の減少傾向
- リンクの媒介中心性**
  - そのリンクを通過する最短経路の本数
- 情報拡散の傾向**
  - 各ノードを感染開始位置とした際の感染範囲
  - 感染モデル: SIR モデル

隣接ノードへの感染     感染状態からの回復

確率  $\lambda = 0.08$   
 $\mu = 0.1$

○ = S    ● = I    ● = R

5

## 評価環境 (ネットワーク内)

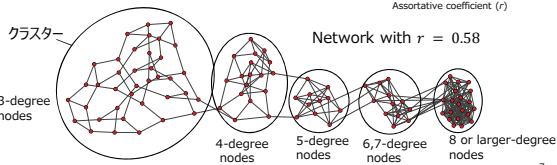
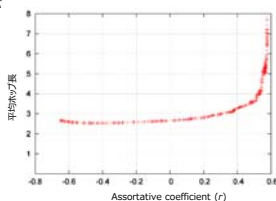
- ノード数: 100
- リンク数: 295
- トポロジー生成モデル: BA モデル
  - 初期トポロジーは 5 ノードフルメッシュ
  - 1 ノード毎のリンク追加本数は 3 本
- アソータビティ  $r$  の値域:  $-0.67 \leq r \leq 0.58$
- アソータビティ変更前の  $r$ :  $-0.12$

6

## 平均ホップ長

アソータビリティの増加に従い平均ホップ長が増加

- アソータビリティが高くなることで度数毎にクラスター化された鎖状構造に変化
- 鎖状構造は一般的に平均ホップ長が増大



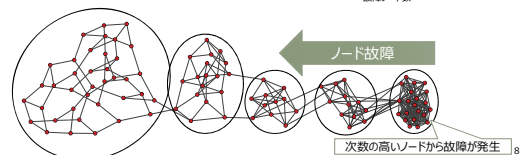
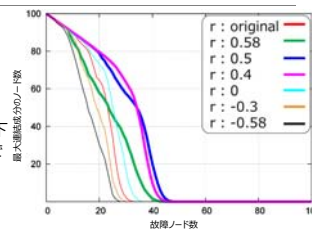
## ロバスト性

アソータビリティの増加に従い次数順故障に対するロバスト性は向上

- ノードの故障が鎖状に接続されたクラスターの端から発生していき次数が低いノード間の接続は維持される

$r = 0.58$  の場合ではロバスト性が低下

- クラスター間のリンク数が少なくなることで分断が発生しやすくなる



## 評価環境 (ネットワーク間)

### 接続するネットワーク

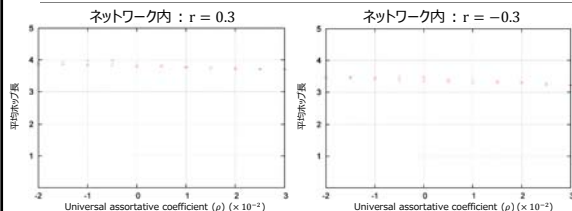
- ノード数 : 100
- リンク数 : 295
- Assortativity  $r$  : 0.3, -0.3
- トポロジーで生成モデル: BAモデル

### ネットワーク間のリンク数: 8本

### アソータビリティ $\rho$ の領域: $-0.02 \leq \rho \leq 0.03$

9

## 平均ホップ長

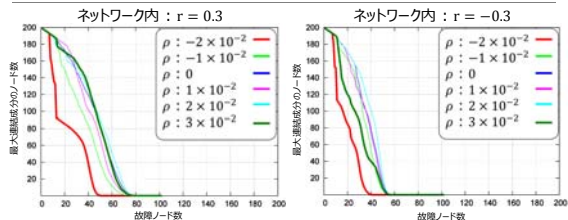


モジュール内のアソータビリティに関わらず、モジュール間のアソータビリティの増加により平均ホップ長が短くなっている

- 多くのショートパスが通るハブノードを接続している影響

10

## ロバスト性



モジュール間のアソータビリティが低い場合に低いロバスト性を示す

- 全てのモジュール間リンクが早期に故障する高次数のノードに接続されているため

モジュール内がディスアソータティブな場合にはアソータビリティが高い場合にも低いロバスト性を示している

- ネットワーク内の分断によってネットワーク間のリンクが失われるため

11

## 結論と今後の課題

### 評価結果のまとめ

#### ネットワーク内

- アソータティブ: ロバスト性
- ディスアソータティブ: 通信効率、情報拡散効率、負荷分散

#### ネットワーク間

- アソータティブ: 通信効率、ロバスト性
- ディスアソータティブ: 負荷分散

### 今後の課題

#### ネットワーク設計モデルへの応用

- SDN でのネットワーク構築:
  - 制御プレーンはロバスト性を高くするためアソータティブに構築
  - データプレーンは負荷分散を考慮してディスアソータティブに構築
- IoT 環境下でのネットワーク構築:
  - 単一のネットワークをコンピュータウイルスに対する耐性を持たせるためアソータティブに構築
  - 複数ネットワークを統合する際にはロバストに接続するため互いにアソータティブに接続



12