

Analysis and Strategies for Improving Robustness and Efficiency in Interconnected Networks

2017/2/13

相互接続ネットワークの頑強性と効率性の向上のための分析と戦略

村上雅哉
村田研究室

研究背景

- IoT時代の到来と、スマートシティの実現
 - 知能的・自律的なサービスの出現
 - 高度なサービス同士が相互に接続・依存
 - 例：スマートグリッド、スマートホーム、etc.
- 通信発生時の頑強性や効率性を考慮した相互接続ネットワークの設計方法は未検討
 - 良性的情報の拡散を促進
 - 悪性的情報の拡散を抑制

脳ネットワークのモジュール間の接続性の状態制御の仕組みに着目

Brain Network of Networks (NoN) モデル^[1]

- 脳のモジュール間接続性の状態制御の仕組みを表現
 - モジュール間リンクの有効状態をノードの活性状態により制御
 - モジュール間リンクの両端点のノードに入力が存在する場合に有効
 - ノード i の3つの状態を2つの二値変数 (σ_i, n_i) で表現

n_i : 入力変数 (所与)
 σ_i : 活性変数
 $\sigma_i = n_i \left[1 - \prod_{j \in F(i)} (1 - n_j) \right]$
 $F(i)$: モジュール間隣接ノード集合

- 従来の NoN モデル^[2]と比較し障害に対する頑強性を実現
 - Brain NoN は広範囲にわたる障害伝播を防止

[1] F. Morone et al. "A model of brain activation predicts the collective influence map of the human brain". Submitted to PNAS, 2012.
 [2] B. Robert et al. "Failures propagation in critical interdependent infrastructures". International Journal of Modelling, Identification and Control, vol. 9 pp. 69-78, May, 2008

研究目的とアプローチ

目的

- 相互接続ネットワーク上での通信発生時の情報拡散の制御の実現

アプローチ

- Brain NoN モデルの仕組みを応用
 - Information Networking NoN (IN NoN) モデルを提案
 - インターフェースを活性の対象として読み替え
 - 入力と活性の仕組みに基づき情報拡散をモデル化
- IN NoN モデルを適用した相互接続ネットワークの接続構造に応じた情報拡散速度の分析
 - モジュール内接続構造の設計
 - ノードの中心性 (=情報拡散能力) を考慮
 - モジュール間接続構造の設計
 - モジュール間リンクの端点のノードの中心性を考慮

IN NoN における“活性”の解釈

- Brain NoN ではモジュール間リンクの一方の端点のノードの入力状態が他方の活性状態に影響
 - 情報通信において同様な状況の想定が困難
- IN NoN では活性の対象をインターフェースに読み替え
 - 外部インターフェースは活性変数 σ に従って活性
 - 内部インターフェースは常に活性

Brain NoN の状態遷移

IN NoN の状態遷移

ノード自身が非活性になり、モジュール間とモジュール内の疎通が同時に絶たれる

モジュール間の疎通とは独立してモジュール内の疎通が保たれる

ノード モジュール間リンク 外部インタフェース 内部インタフェース

情報拡散のモデル化

- IN NoN におけるインターフェースの活性状態を評価するため、**情報伝播・時間の尺度**を導入
 - 時刻 t のノード i の入力 $n_i = \{0, 1\}$ は時刻 $t-1$ の隣接ノードの入力によって確率的に決定

ノード i が時刻 t に入力を受け取る確率

モジュール内ノードから入力を受け取らない確率

モジュール外ノードから入力を受け取らない確率

変数	Brain NoN	IN NoN
入力	n_i , 所与	$p_i(i) = 1 - \prod_{j \in S(i)} (1 - \delta n_j^{t-1}) \prod_{j \in F(i)} (1 - \delta \sigma_j^{t-1} \sigma_j^{t-1} n_j^{t-1})$
活性	$\sigma_i = n_i \left[1 - \prod_{j \in F(i)} (1 - n_j) \right]$	$\sigma_i^t = n_i^t \left[1 - \prod_{j \in F(i)} (1 - n_j^t) \right]$

S(i): 内部隣接ノード集合 F(i): 外部隣接ノード集合 δ : 情報遷移確率のパラメータ

IN NoN :
 一方のモジュール内の情報が意図せず他方に流れない情報拡散モデル

モジュール内接続構造の設計

- モジュール内のノードの中心性を考慮
 - ノードの情報拡散能力を調節
 - 成長グラフに優先的選択を適用

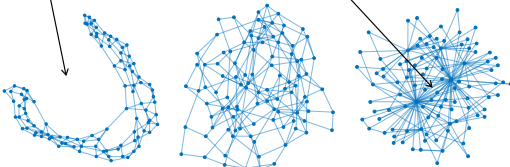
$$p(i) = \frac{k_i^\gamma}{\sum_j k_j^\gamma}$$

k_i : ノード i の次数
 $p(i)$: ノード i の選択確率
 γ : 中心性指向のパラメータ

単一のパラメータ γ によりモジュール内の様々な中心性の分布を表現

γ が小さいほど、中心性の様なトポロジを生成

γ が大きいほど、中心性の高いノードが出現



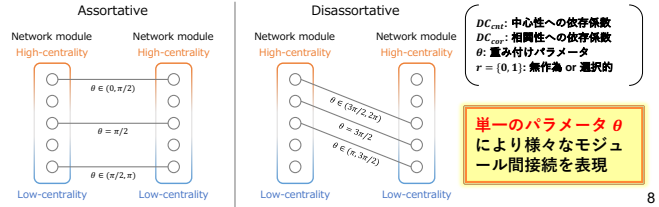
small ← Parameter γ → large

モジュール間接続構造の設計

- 異なるモジュールのノードペアの中心性と中心性の相関を考慮し、モジュール間リンクを生成
 - 依存係数 (DC) の高いノードペアからモジュール間リンクを生成

$$DC = \frac{DC_{cnt}(h,i) - DC_{cnt}^{min}}{DC_{cnt} - DC_{cnt}^{min}} + 1 \cdot r \cos \theta + \frac{DC_{cor}(h,i) - DC_{cor}^{min}}{DC_{cor} - DC_{cor}^{min}} + 1 \cdot r \sin \theta$$

両端点の中心性 両端点の中心性相関 中心性と中心性相関の重み付け



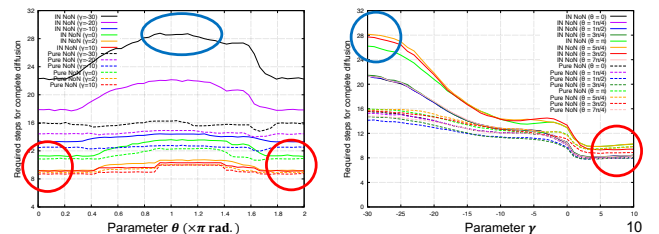
情報拡散のシミュレーション

- モジュール間リンクを起点とした情報拡散を実施
 - 2 モジュールからなる相互接続ネットワークを想定
 - 情報が全ノード上に伝播するまでの時間を計測
- 比較対象
 - Pure NoN モデル
 - インターフェースが常に活性するモデル
 - 特定の接続構造の上で最も高い情報拡散速度を達成

- 評価環境
 - モジュール内ノード数: 100
 - モジュール内最大次数: 25
 - モジュール内リンク数: 197
 - モジュール間最大次数: 1, 3
 - モジュール間リンク数: 25
 - DC の指数パラメータ: $r = 1$
 - 情報拡散確率パラメータ: $\delta = 0.5$

評価結果

情報拡散速度を最大化	$\gamma \geq 2$: 中心性が極端に偏ったモジュール $\theta \in (-0.2\pi, 0.2\pi)$: 高い中心性のノードを接続 Pure NoN と同程度の拡散速度を実現
情報拡散速度を最小化	$\gamma \leq -30$: 中心性が低く様なモジュール $\theta \in (1\pi, 1.5\pi)$: 低い中心性のノードを逆相関に接続 モジュール間リンクの情報拡散の促進がない場合と同等



まとめと今後の課題

- まとめ
- IN NoN モデルを提案
 - モジュールを跨ぐ予期せぬ情報拡散を防止
 - IN NoN モデルを適応した相互接続ネットワークの情報拡散速度を様々な接続構造の上で評価
 - 中心性の高いノード同士を繋ぐことで高い情報拡散速度を実現
 - モジュール間リンクを常に活性させる Pure NoN と同等
 - 中心性の低いノード同士を逆相関に繋ぐことで低い情報拡散速度を実現
 - モジュール間リンクによる情報拡散の促進が一切ない場合と同等

- 今後の課題
- モジュール内部のノードを起点とした情報拡散の評価
 - モジュール数、モジュール内ノード数の大規模な相互接続ネットワークの評価