

# Robust and Adaptive Network Architecture for Internet of Things

大阪大学大学院情報科学研究科  
情報ネットワーク学専攻  
村田研究室  
豊永慎也

2016/12/1

1

## 研究背景

将来の IoT では様々なものがインターネットに接続  
 ・無線センサーネットワーク (WSN) はサイバー空間と実世界の相互作用を実現するための情報収集基盤として不可欠

- IoT 環境における WSN ではヘテロジニアス性が課題となる
- 共通のゴールを達成するために様々なデバイスが相互協調
  - in-network processing、オートメーション
  - デバイス間の多様で動的な通信パターン



情報収集だけでなく柔軟にサービスと連携できるインフラとしての無線センサーネットワーク (WSN) が必要

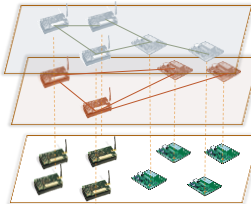
2016/12/1

2

## WSN 仮想化アーキテクチャー[1]

インフラ提供者とサービス提供者の分離

- ヘテロジニアス性の解決と多様なサービス収容が期待される
- 新規の研究分野であり、具体的な設計は未検討



仮想層  
ユーザーのサービスに必要な資源を仮想ネットワークとして提供

インフラ層  
様々なベンダーからのノードで構築

[1] Md. Motaharul Islam et. al, "A Survey on Virtualization of Wireless Sensor Networks", Sensors, vol.12, pp. 2175-2207, Nov. 2012.

2016/12/1

3

## インフラとしての WSN における課題

スケーラビリティ

- パケット衝突や輻輳によるサービス障害

ロバスト性

- ノード故障などの環境変動が生じてもサービスを供給

適応性

- ノード故障などの環境変動によりサービス品質が低下しても自動的に復旧

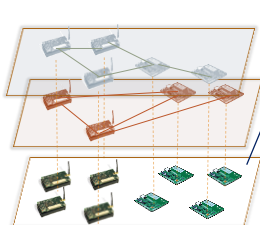


これらの課題を解決する WSN アーキテクチャーが必要

2016/12/1

4

## 課題解決のための WSN アーキテクチャー インフラ層



ヘテロジニアス性

- インフラ層には様々な性能のノードが存在
- すべてを把握して最適な仮想網を提供することは困難

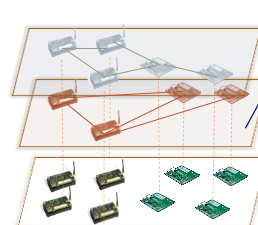


- 物理ネットワークは相互接続性のみ保証
- 仮想網でスケーラビリティ、ロバスト性、適応性を実現する

2016/12/1

5

## 課題解決のための WSN アーキテクチャー 仮想層



スケーラビリティ、適応性、ロバスト性

- 仮想網構築手法の提案
- 仮想ネットワークをロバストな接続性を実現するように構築
- 仮想網での経路制御の提案
- 適応性、スケーラビリティを実現するルーティング手法

2016/12/1

6

## 課題解決のキーアイデア

### 自律分散制御

- スケーラビリティ
- 適応性

### ルーティングの設計

Chapter 2 any-to-any 通信を実現するルーティングプロトコルの提案

### 脳の接続構造の導入

- ロバスト性

### 仮想トポロジーの構築

Chapter 3 仮想WSNトポロジー構築手法の提案

### 仮想トポロジーの設計指針

Chapter 4 ロバスト性を強化する方針を決定するためのロバスト性解析手法の提案

2016/12/1

7

## 博士論文の構成

Chapter 1 : Introduction

Chapter 2 : Potential-based Routing for Supporting Adaptive Any-to-any Communication in Wireless Sensor Networks

Chapter 3 : Virtual Wireless Sensor Networks: Adaptive Brain-inspired Configuration for Internet of Things Applications

Chapter 4 : Percolation Analysis for Constructing a Robust Modular Topology based on a Binary-dynamics Model

Chapter 5 : Conclusion

2016/12/1

8

## Chapter 2 : Potential-based Routing for Supporting Adaptive Any-to-any Communication in Wireless Sensor Networks

- Shinya Toyonaga, Daichi Kominami, Masashi Sugano and Masayuki Murata, "Potential-based Routing for Supporting Robust Any-to-any Communication in Wireless Sensor Networks," *EURASIP Journal of Wireless Communications and Networking*, vol. 2013, no. 1, pp. 1-13, December 2013.
- Shinya Toyonaga, Daichi Kominami, Masashi Sugano and Masayuki Murata, "Potential-based Downstream Routing for Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the 7th International Conference on Systems and Networks Communications (ICSNC 2012)*, pp. 59-64, November 2012.
- Shinya Toyonaga, Daichi Kominami, Masashi Sugano, Masayuki Murata and Takaaki Hatauchi, "Evaluation of Potential-based Downstream Routing on Wireless Sensor Networks," *Technical Report on IEICE (AN2012-5)*, vol. 112, no. 30, pp. 45-46, May 2012 (in Japanese)

2016/12/1

9

## 背景

将来の IoT 環境では任意のノード間の通信要求が存在

- Reactive tasking, Data-centric storage, Data querying

WSN におけるルーティングプロトコルの課題

- スケーラビリティ
- 省電力性
  - バッテリー駆動、長期間の運用
- 適応性
  - 不安定な無線品質、ノードの故障、電力枯渇

2016/12/1

10

## ポテンシャルルーティング[2]

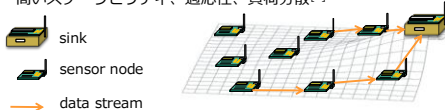
各ノードはポテンシャル (スカラー値) を保持

- シンクのポテンシャルは最大値
- シンクへのホップ数が小さいセンサーノードほど大きいポテンシャルを保持

より大きいポテンシャルをもつ隣接ノードに転送することでシンクにデータを届けることが可能

- upstream 通信 (sensor-to-sink) を実現

高いスケーラビリティ、適応性、負荷分散[1]



2016/12/1

[1] D. Kominami, M. Sugano, M. Murata and T. Hatauchi, "Controlled potential-based routing for large-scale wireless sensor networks," in *Proc. of ACM MSWiM*, pp. 187-196, June, 2011.

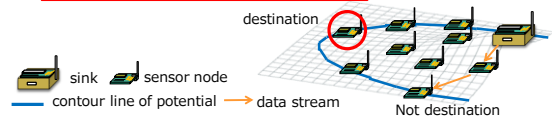
11

## 研究目的

ポテンシャルルーティングは upstream 通信のみを想定

- 同じポテンシャルをもつ複数のノードが存在
- ポテンシャルの大小関係ではシンク以外へのデータを届けることが不可能

ポテンシャルルーティングの利点を有する任意のノード間通信 (any-to-any) を実現する



2016/12/1

12

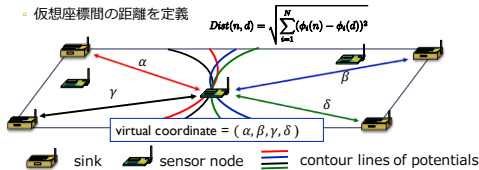
## 提案手法

三点測量に基づくノード識別

- $N$  点からの距離の組合せでノードの仮想的な位置を識別

ポテンシャルはシンクからの仮想的な距離

- ノードの位置識別に3つ以上のポテンシャル場が必要
- 3つ以上のポテンシャルの組合せからなる仮想的な座標を定義
- 仮想座標間の距離を定義



2016/12/1

13

## 適応性の評価 シミュレーション環境

ノード故障時のデータ到達率の復帰能力を評価

ネットワークモデル

- 観測領域：600m×600mの正方領域
- 領域の4隅に4つのシンクをそれぞれ配置
- 150個のセンサーノードをランダムな位置に配置

データ生成レート

- upstream 通信：1/100 [s<sup>-1</sup>node<sup>-1</sup>]
- any-to-any 通信：1/300 [s<sup>-1</sup>node<sup>-1</sup>]

故障モデル

- 150個のセンサーノードのうち45個が故障
- 4個のシンクのうち1個が故障

評価指標

- 各時刻  $t$  において、 $(t - 1000)[s]$  から  $t[s]$  の間に発生したデータの到達率

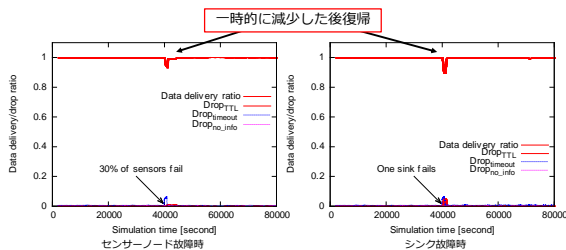
Radio range	100 m
TTL	30
Bandwidth	100 kbps
Update potential	100 s

2016/12/1

14

## 評価結果

センサーノード、シンク故障時にも適応的にデータ到達率が復帰



2016/12/1

15

## 本章のまとめ

ポテンシャルルーティングを any-to-any 通信に拡張

- ノード故障に対して高い適応性

省電力性や負荷分散を考慮したポテンシャル場を構築することでそれらの利点を得ることも期待できる

2016/12/1

16

## 博士論文の構成

Chapter 1 : Introduction

Chapter 2 : Potential-based Routing for Supporting Adaptive Any-to-any Communication in Wireless Sensor Networks

Chapter 3 : Virtual Wireless Sensor Networks: Adaptive Brain-inspired Configuration for Internet of Things Applications

Chapter 4 : Percolation Analysis for Constructing a Robust Modular Topology based on a Binary-dynamics Model

Chapter 5 : Conclusion

## Chapter 3: Virtual Wireless Sensor Networks: Adaptive Brain-inspired configuration for Internet of Things Applications

1. Shinya Toyonaga, Daichi Kominami and Masayuki Murata, "Virtual Wireless Sensor Networks: Adaptive Brain-inspired Configuration for Internet of Things Applications," *Sensors*, vol. 16, no. 8, p. 1323, August 2016.
2. Shinya Toyonaga, Daichi Kominami and Masayuki Murata, "Brain-inspired Method for Constructing a Robust Virtual Wireless Sensor Network," in *Proceedings of the 2015 International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet 2015)*, pp. 59-65, December 2015.
3. Shinya Toyonaga, Daichi Kominami and Masayuki Murata, "Method for Constructing a Robust Virtual Sensor Network Inspired by Brain Networks," *IEICE Technical Committee on International Network Science (NetSci)*, May 2014 (in Japanese).

2016/12/1

17

2016/12/1

18

## 背景

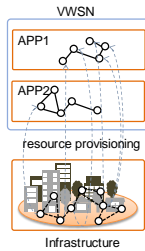
インフラとしての WSN の課題

- ヘテロジニアスなネットワークの共存
- 多様な通信要求を満たす柔軟性

WSN 仮想化による解決

仮想無線センサーネットワーク (VWSN)<sup>[1]</sup>

- インフラとアプリケーションの分離
- 各アプリケーションにVWSNを構築
  - 柔軟性: 動的な資源割り当て
  - ヘテロジニアス性: 透過的なプロトコル



[1] Md. Motaharul Islam et. al, "A Survey on Virtualization of Wireless Sensor Networks", Sensors, vol.12, pp. 2175-2207, Nov. 2012. 19

## 研究目的

VWSNでは多様な環境変動が起こりうる

- ノードやリンクの追加、削除
- 新しいアプリケーションへの資源割り当て

環境変動に対してロバスト性の高い VWSNトポロジー構築手法を提案

既存研究では物理資源を共有するためのフレームワーク提案が主目的

ロバスト性の重要なヒントを与える脳ネットワークの知見を利用

## 脳ネットワークの構造的特徴<sup>[3]</sup>

階層的なモジュール構造

- モジュール内は密に、モジュール間は疎に接続
- 各モジュールはサブモジュールから構成

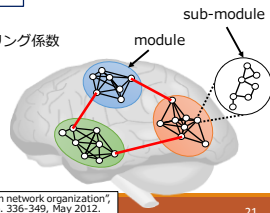
モジュール内でロバストな接続性

スモールワールド性

- 短い平均パス長と高いクラスタリング係数

低遅延での情報拡散

これらの構造的特徴をVWSNトポロジーに導入

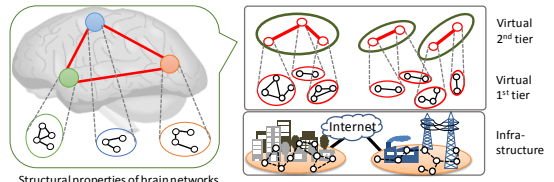


[3] E. Bullmore et. al, "The economy of brain network organization", Nature Reviews Neuroscience, vol.13, pp. 336-349, May 2012. 21

## 脳の構造的特徴を有するVWSN

階層的なモジュール構造を有するVWSNを構築

- 各モジュールはスモールワールド性を有する
- メッシュネットワークに長距離リンクを追加
  - 高いクラスタリング係数、短い平均パス長



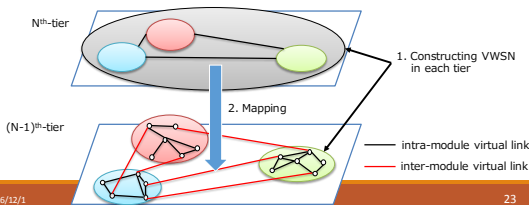
Structural properties of brain networks

どのモジュールを仮想リンクで接続すれば大域的なロバスト性を得られるかについては調査が必要

## 提案手法の概要

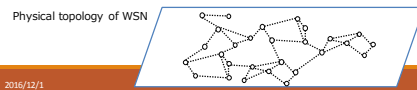
0) 第一層モジュールを定義

- 1) 各層でスモールワールドネットワークを構築
- 2) 仮想リンクの端点をマッピング



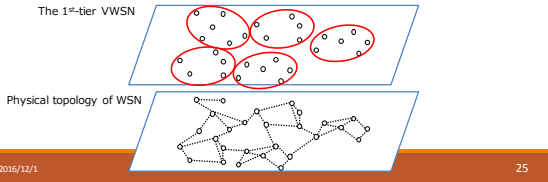
## トポロジー構築例

二層構造のVWSNトポロジーを構築する場合



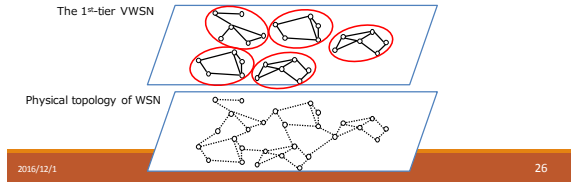
## トポロジー構築例

- 0) サービス要求を満たすように第一層モジュールを定義



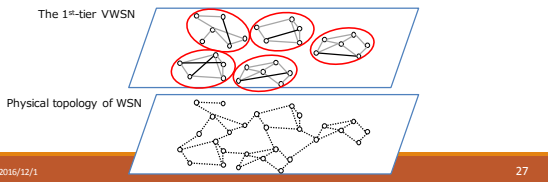
## トポロジー構築例

- 1) 第一層VWSNでスモールワールドネットワークを構築  
 a) 物理的に接続されているノード間に仮想リンクを構築



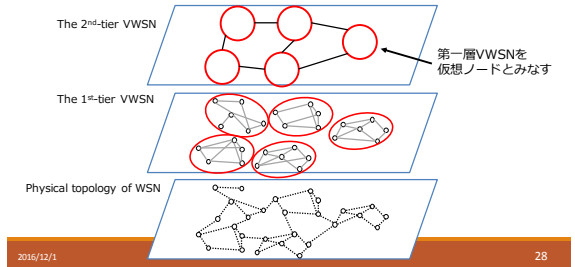
## トポロジー構築例

- 1) 第一層VWSNでスモールワールドネットワークを構築  
 b) 第一層VWSNがスモールワールド性を有するように仮想リンクを追加



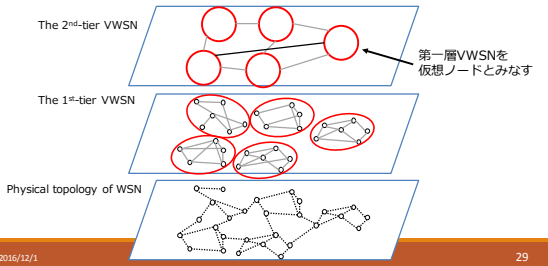
## トポロジー構築例

- 1) 第二層VWSNでスモールワールドネットワークを構築  
 a) インフラ層で接続される第一層VWSN間に仮想リンクを構築



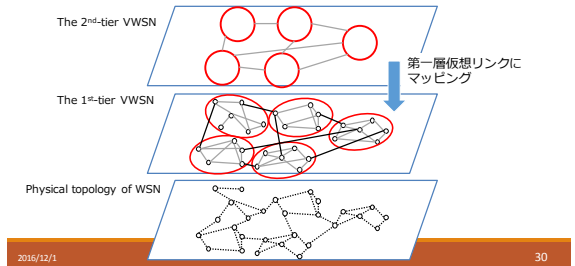
## トポロジー構築例

- 1) 第二層VWSNでスモールワールドネットワークを構築  
 b) 第二層VWSNがスモールワールド性を有するように仮想リンクを追加



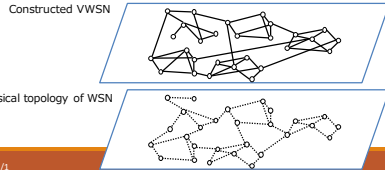
## トポロジー構築例

- 2) 第二層仮想リンクの端点をノードにマッピング



## トポロジー構築例

二層構造のVWSN構築プロセスが完了

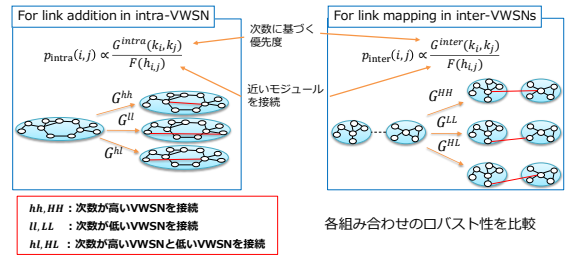


2016/12/1

31

## 仮想リンク追加方法

距離制約と度数に基づく preferential attachment rule を使用



2016/12/1

32

## シミュレーション環境

ネットワークモデル

- 二つのセンサーネットワークを一本の有線で接続



- 第一層モジュールをNewmanアルゴリズム<sup>[4]</sup>で決定
- 三層構造のVWSNを構築

比較手法: クラスタリングに基づくスモールワールドセンサーネットワーク構築手法<sup>[5]</sup>

- 構築されたトポロジーをVWSNトポロジーとみなす

[4] M. E. Newman, "Modularity and community structure in network", PNAS, vol.103, pp. 8577-8582, Apr. 2006.  
[5] R. Agarwal et al., "Achieving small-world properties using bio-inspired techniques in wireless sensor networks", The Computer Journal, vol.55, pp. 909-931, Mar. 2012.

2016/12/1

33

## 評価指標

接続性のロバスト性

- 度数が高い順にノードが故障する場合の最大接続成分のノード数 (GCS) の減少傾向

平均パス長 (vAPL) のロバスト性

- 度数が高い順にノードが故障する場合の仮想ネットワークにおける平均パス長 vAPL の増加傾向

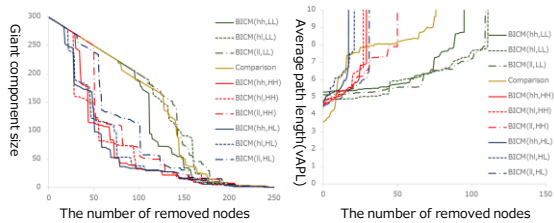
2016/12/1

34

## ロバスト性

提案手法をBICM(intra,inter)と表記

- それぞれの色は仮想リンクのマッピング手法を表す (inter)

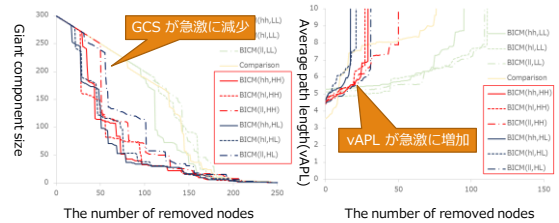


2016/12/1

35

## ロバスト性

仮想リンクの端点の少なくとも一方がノードの度数が高いノードにマッピングされる時、VWSNトポロジーは脆弱

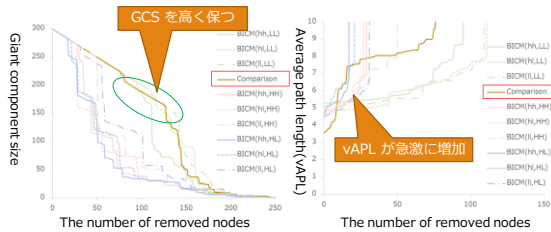


2016/12/1

36

## ロバスト性

比較手法は接続性についてのみロバスト

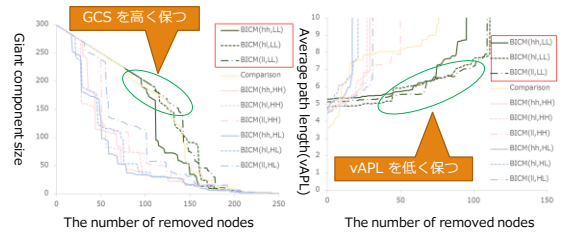


2016/12/1

37

## ロバスト性

仮想リンクの端点を次数が低いモジュールにマッピングするとき VWSNトポロジーはロバスト



2016/12/1

38

## 本章のまとめ

スモールワールドネットワークを階層的に統合することにより高いロバスト性を有する VWSNトポロジー構築手法を提案

- ロバスト性はモジュール間リンクの構築方法に依存することを明らかにした

2016/12/1

39

## 博士論文の構成

Chapter 1 : Introduction

Chapter 2 : Potential-based Routing for Supporting Adaptive Any-to-any Communication in Wireless Sensor Networks

Chapter 3 : Virtual Wireless Sensor Networks: Adaptive Brain-inspired Configuration for Internet of Things Applications

Chapter 4 : Percolation Analysis for Constructing a Robust Modular Topology based on a Binary-dynamics Model

Chapter 5 : Conclusion

2016/12/1

40

## Chapter 4: Percolation Analysis for Constructing a Robust Modular Topology based on a Binary-dynamics Model

- Shinya Toyonaga, Daichi Kominami and Masayuki Murata, "Percolation Analysis for Constructing a Robust Modular Topology based on a Binary-dynamics Model," submitted to *International Journal of Distributed Sensor Networks*, May 2016.

2016/12/1

41

## 背景と目的

脳に着想を得た仮想トポロジー構築手法を提案

- 仮想トポロジーのロバスト性はモジュール間の接続方法に影響されることを示した

影響の評価に留まらずロバスト性を  
得るためのモジュール間の接続方針・接続手法が必要

各モジュール内の構造が与えられた場合に  
それらをロバストに接続するための方針を解析的に示す



ネットワークのロバスト性を解析的に扱う  
Binary-dynamicsモデル<sup>[6]</sup>を拡張

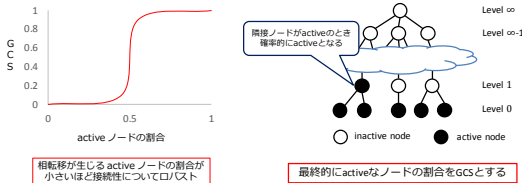
2016/12/1

42

[6] S. Melnikand et al., "Dynamics on modular networks with heterogeneous correlations," *Chaos*, vol.24, p. 023106, Apr. 2014.

# Binary-dynamicsモデルを用いたパーコレーション解析<sup>[6]</sup>の概要

モジュール構造をもつネットワークのための解析手法  
 - 最大接続成分のノード数の割合 (GCS)を解析的に導出することが可能



相転移が生じる active ノードの割合が小さいほど接続性についてロバスト

# Binary-dynamicsモデルの入力<sup>[6]</sup>

リンクの確率分布

モジュール  $i$  に属する次数  $k$  のノードを  $\{i, k\}$  と表記

$P_{k,k'}^{i,i'}$  : ランダムに選択したリンクの端点が  $\{i, k\}$  と  $\{i', k'\}$  である確率

応答関数

$F_i(m, k)$  :  $\{i, k\}$  の inactive なノードが  $m$  個の active ノードに隣接するとき active となる確率

$F_i(m, k)$  を変更することにより、所望のパーコレーション方法を与えることが可能

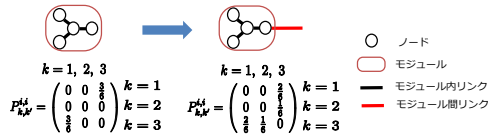
パーコレーション方法の詳細は割愛

与えた  $P_{k,k'}^{i,i'}$  のグラフのロバスト性を調べる手法であり、モジュール間をどのように接続するかについては議論されていない

# リンク追加の影響を考慮した解析

モジュール間リンクの追加によるモジュール内リンクの確率分布の変化を考慮した  $P_{k,k'}^{i,i'}$  を計算し、解析対象とする

パーコレーション方法としてランダム故障と次数が高い順に故障する標的攻撃を想定した  $F_i(m, k)$  を定義する



# 仮定

入力変数

$Prev_{k,k'}^{i,i'}$  : モジュール間リンク追加前のモジュール内リンクの確率分布

$Target_{k,k'}^{i,i'}$  : モジュール間リンクの確率分布  $\sum_{i,k} Prev_{k,k'}^{i,i'} + \sum_{i',k'} Target_{k,k'}^{i,i'} = 1$

出力変数

$Sub_{k,k'}^{i,i'}$  : モジュール間リンク追加後のリンクの確率分布

想定シナリオ

モジュール間リンクは一種類のみとする

$$Target_{k,k'}^{i,i'} = \begin{cases} \alpha & \text{where } k = d, k' = d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\{i, k\}$  となるノードに  $(d-k)$  本のモジュール間リンクを追加して次数  $d$  とする

# キーアイデア

$\{i, k\}$  に  $(d-k)$  本ずつリンクを追加する場合の影響の大きさ

- $\{i, 1\}$  に追加する場合と比べて  $k$  倍のリンクに影響を与える
- $\{i, k\}$  に1本ずつ追加する場合と比べて  $\frac{1}{d-k}$  倍のリンクに影響を与える

影響の大きさ:  $Inf(d, k) = H(d-k) \frac{k}{d-k} Target_{d,d}^{i,i'}$   $H(x)$  : ヘビサイド関数

モジュール内リンクの確率分布の変化量

$$\Delta Prev_{k,k'}^{i,i'}(d, k) = Sub_{k,k'}^{i,i'} - Prev_{k,k'}^{i,i'} = -\delta_{k,d} \frac{Prev_{d,d}^{i,i'}}{\sum_{i,k} Prev_{k,k'}^{i,i'}} \cdot Inf(d, k) - \delta_{k',d} \frac{Prev_{d,d}^{i,i'}}{\sum_{i',k'} Prev_{k,k'}^{i,i'}} \cdot Inf(d, k) + \delta_{k,d} \frac{Prev_{d,d}^{i,i'}}{\sum_{i,k} Prev_{k,k'}^{i,i'}} \cdot Inf(d, k) + \delta_{k',d} \frac{Prev_{d,d}^{i,i'}}{\sum_{i',k'} Prev_{k,k'}^{i,i'}} \cdot Inf(d, k)$$

$\delta_{ij}$  : クロネッカーのデルタ

$\frac{Prev_{k,k'}^{i,i'}}{\sum_{i,k} Prev_{k,k'}^{i,i'}}$  :  $\{i, k\}$  の隣接ノードが  $\{i, k\}$  である確率

# 解析に適用した環境

モジュール構造

- 二つのモジュール 1, 2 を接続
- 各モジュールには次数が 2 から 6 のノードが一様分布で存在する場合を想定

手法の表記

- $d$  と  $(d-k)$ 、 $d'$  と  $(d'-k')$  を定めたときの手法を  $1-k-(d-k)_2-k'-(d'-k')$  と表記

評価対象

- active ノードの割合  $p$  を変化させた場合の GCS

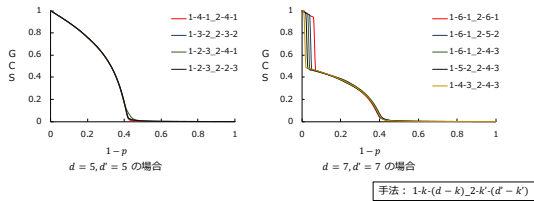
$$Prev_{k,k'}^{i,i'} = Prev_{k',k}^{i',i} = \frac{1}{25} \begin{matrix} k=2, & 3, & 4, & 5, & 6 \\ \begin{pmatrix} 4 & 6 & 8 & 10 & 12 \\ 6 & 9 & 12 & 15 & 18 \\ 8 & 12 & 16 & 20 & 24 \\ 10 & 15 & 20 & 25 & 30 \\ 12 & 18 & 24 & 30 & 36 \end{pmatrix} & \begin{matrix} k=2 \\ k=3 \\ k=4 \\ k=5 \\ k=6 \end{matrix} \end{matrix} \quad Target_{k,k'}^{i,i'} = Target_{k',k}^{i',i} = \begin{cases} \frac{1}{25} & \text{where } k = d, k' = d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



## 標的攻撃時の解析結果

$d$ 、 $d'$ が小さい場合はモジュール内が先に分断

モジュール間リンクが複数のノードに分散するほどロバストな接続性



2016/12/1

49

## 本章のまとめ

モジュール間リンクを追加することによる、モジュール内リンクの確率分布の変化を考慮したリンクの確率分布の計算方法を提案

モジュール間リンクの接続方針を決定するための解析方法を実現

- 次数が低いノードに分散させて接続するとロバストな接続性

提案手法は複数種類のモジュール間リンクにも適用可能

2016/12/1

50

## 本論文のまとめ

仮想化アーキテクチャーでスケーラビリティ、適応性、ロバスト性の解決に取り組んだ

- 自律分散制御に基づく any-to-any ルーティングプロトコルでスケーラビリティと適応性を実現
- 脳の接続構造に基づく VWSN トポロジー構築によるロバスト性を実現
- トポロジーのロバスト性を強化する方針を決定するための解析手法を実現

今後の課題

- 進化可能性をもつネットワークアーキテクチャーの実現
- 環境変動のパターンや履歴を解析し、現状に適した仮想ネットワークを再構築
- 状況に応じた信頼性の獲得

2016/12/1

51