

# 大脳皮質領野間の接続モデルを用いた 仮想 IoT ネットワーク構築手法



2016/8/9

1

# 研究の背景

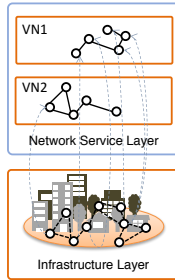
- 無線センサネットワーク (WSN) の発達
  - 無線通信端末の小型化と、処理性能の向上
- Internet of Things (IoT) への応用
  - 無線通信端末の接続台数の爆発的な増加
  - アプリケーション要求の多様化
- WSN の仮想化による IoT の実現<sup>[1]</sup>
  - 仮想的な WSN の構築により仮想 IoT ネットワークを実現
    - 物理資源の柔軟な活用が可能
    - 物理レイヤ、仮想レイヤを独立に開発が可能
    - ユーザの要求に応じて異なる仮想トポロジの構築が可能

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

2

# WSN の仮想化<sup>[1]</sup> と問題点

- WSN をインフラ層とサービス層に分離
  - インフラプロバイダが個別の物理ネットワークを提供
  - サービスプロバイダがインフラ層の上に仮想 WSN を構築
- アプリケーション要求の多様化に伴いトポロジの生成 / 除去が頻発
- 大規模なネットワーク環境において、省電力性と通信効率性を最適化するトポロジの計算量は膨大



高効率なネットワークである  
脳のアーキテクチャに着目

# 研究のアプローチと目的

- 大脳皮質の領野間接続構造に着目
  - 大脳皮質領野
    - ヒトの高度な知能活動を支える、進化過程上の脳の新しい領域
  - 領野
    - 脳機能上の役割に基づく大脳皮質の分割単位
  - 大脳皮質の領野間接続構造の特徴
    - 100 億を超える神経細胞により構築される超大規模ネットワーク
    - 接続構造の維持に必要な代謝コストの抑制と、情報の伝達効率の向上とのトレードオフのもと、最適な接続構造を実現



大脳皮質の領野間接続構造モデルにならい、  
脳の特徴を持つ仮想 WSN を構築することを目指す

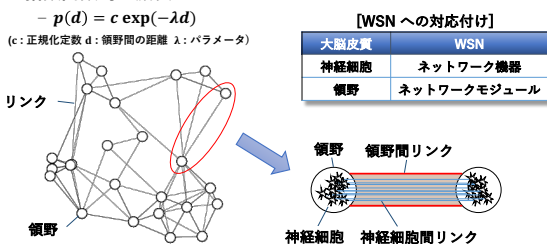
[1] Md. Motaahul Islam et al., "A Survey on Virtualization of Wireless Sensor Networks", Sensors, vol.12, pp. 2175-2207, Nov. 2012.

3

4

# 大脳皮質の領野間の接続構造モデル

- Exponential Distance Rule (EDR)<sup>[2]</sup>
  - 大脳皮質の領野間の解剖学的な接続構造モデル
    - 解剖学的：神経細胞同士の接続構造 (⇔ 機能的)
  - 領野間の神経接続の存在確率  $p(d)$  が物理的距離の増加に対して指数関数的に減衰
    - $p(d) = c \exp(-\lambda d)$
    - (c: 正規化定数 d: 領野間の距離  $\lambda$ : パラメータ)

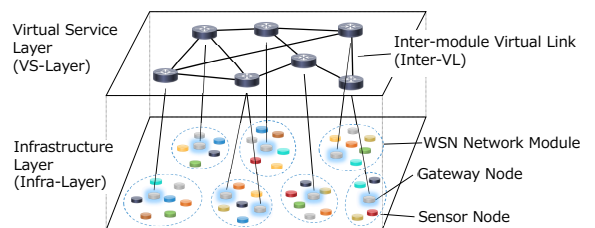


[2] M. Ercey-Ravasz et al., "A predictive network model of cerebral cortical connectivity based on a distance rule," Neuron, vol. 80, pp. 184-197, Oct. 2013.

5

# 仮想 WSN ネットワークモデル

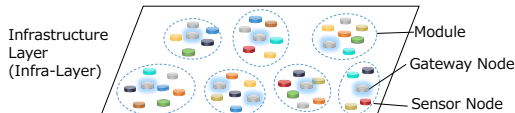
- WSN を二層構造に分割
  - Infra-Layer、VS-Layer
- VS-Layer のトポロジ構築に EDR を適用する手法を提案



6

## 仮想 WSN の構築 : Infra-Layer

- I.  $N$  個のノードを無作為に二次元平面のエリアに配置
- II. 通信半径  $r$  内に存在するノード間にリンクを生成
- III. InfoMap 法<sup>[3]</sup>を用いてモジュール群に分割
  - 分割の過程で、ランダムに発生するフローが最も通過するノードを代表ノードとして決定
  - 代表ノードによってモジュールの座標を指定
- IV. モジュール間のリンクを削除し、 $M$  個のモジュールを生成

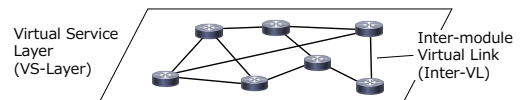


[3] M. Rosvall and C. T. Bergstrom, "Maps of random walks on complex networks reveal community structure," Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 105, no. 4, pp. 1118–1123, 2008.

7

## 仮想 WSN の構築 : VS-Layer

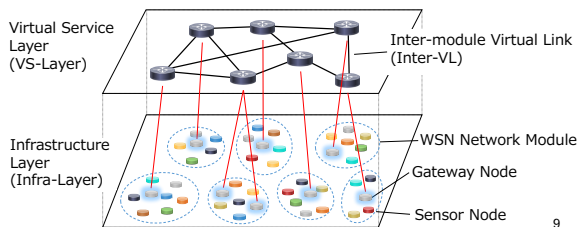
- Infra-Layer の上に VS-Layer のトポロジを構築
- EDR モデルに基づいてモジュール間に仮想リンク (Inter-VL) を生成
  - I. モジュールのペアを無作為に選択
  - II. EDR モデルを拡張した確率式  $p'(d)$  に従いモジュール間に Inter-VL を生成
    - $p'(d) = \exp(-d'/\alpha)$
    - $d'$ : モジュール間の正規化された距離  $\alpha$ : 範囲  $(0,1]$  のパラメータ
  - III.  $L = m \times M$  本の Inter-VL を生成するまで繰り返し
    - $m$ : パラメータ、 $M$ : モジュール数



8

## Inter-VL のノードへの割り当て

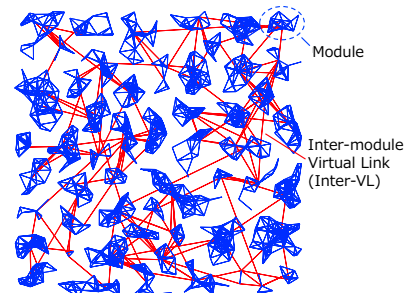
- Inter-VL の端点をモジュール内のノードに割り当て
  - 両端点のモジュール内における次数の和が最も高くなるようにノードを選択
  - 既存の Inter-VL と重複するノードの組み合わせは除外
  - 特定のモジュール間に複数の Inter-VL が存在可能



9

## 生成されるトポロジ

- 生成されるトポロジの一例
  - $100[m]$  正方領域、 $N = 1000$ 、 $r = 8[m]$ 、 $m = 5$ 、 $M = 53$
  - リンクは重み・向き無し



10

## トポロジの構造上の性質の評価

- VNS-Layer の構築手法
  - EDR モデル
    - パラメータ  $\alpha$  を変化
  - Random モデル
    - 無作為に Inter-VL を生成
  - BA モデル
    - 初期ノード数 5、ノード追加毎に 2 本のリンクを追加
  - Full-Link モデル
    - 全てのモジュール間に Inter-VL を生成
  - Min-Link モデル
    - 最小全域木を生成したのち、余分な Inter-VL を最短距離のモジュール間に割り当て
- 評価環境
  - $300[m]$  四方の領域
    - ノード数:  $N = 4000$
    - ノード通信半径:  $r = 8[m]$
    - Inter-VL の本数:  $L = m \times M$
    - パラメータ:  $m = 5$
    - モジュール数:  $M \approx 233$
  - $300/\sqrt{2}[m]$  四方の領域
    - $N = 2000$ 、 $M \approx 117$
  - 両者でモジュール内のノード数が等しくなるように設定
  - Full-Link モデルでは  $L = mC_2$

11

## 評価指標

- APL (Average Path Length)
  - ノード間の最短物理経路距離の平均値
  - 経路は Infra-Layer 上のリンクと Inter-VL により構成
- WC (Wiring Cost)
  - VS-Layer を構築する Inter-VL の総経路長
- AHC (Average Hop Count)
  - ノード間の最小ホップ数の平均値
  - 経路は Infra-Layer 上のリンクと Inter-VL により構成
- モジュラリティ
  - VS-Layer のコミュニティ構造の度合い
  - $Q = \sum_i (e_{ii} - a_i^2)$
  - $e_{ii}$ : モジュール  $i$  内のネットワーク密度
  - $a_i^2$ : リンクの両端がモジュール  $i$  に属する期待値
  - InfoMap 法でモジュラリティを最大化するモジュール分割を計算

12

## トポロジの構造上の性質

- EDR $_{\alpha=0.025}$  が特徴的な性質を提示
  - 最適解に近い APL と WC を提示
  - 高いモジュラリティを提示
    - コミュニティ構造を形成
  - AHC が比較的高い値を提示
    - コストの低下に対するトレードオフ
    - BA が Random モデルよりも AHC を低減

[N = 4000 におけるトポロジの構造上の性能評価]

	Min-Link	EDR $_{\alpha=0.025}$	EDR $_{\alpha=0.10}$	EDR $_{\alpha=0.40}$	Random	BA	Full-Link
APL [m]	504	193	197	247	297	296	171
AHC	35.3	9.53	7.01	6.86	6.91	6.57	4.15
WC [m $\times 10^5$ ]	0.113	0.542	1.50	2.76	3.42	3.40	73.8
モジュラリティ	0.365	0.690	0.426	0.285	0.285	0.255	1.00

13

## 異なる規模のトポロジの比較

- N = 4000 の結果を N = 2000 の結果で割った値を算出
  - モジュール数についての規模の違いの影響を評価
- EDR $_{\alpha=0.025}$  が特徴的な性質を提示
  - APL と WC の増加量を低減
  - AHC の増加を抑制
  - モジュラリティの高さが要因の一つであると推測

モジュール数が増加した場合、提案手法の適応性が高いことを確認

[N = 4000 の評価結果 / N = 2000 の評価結果]

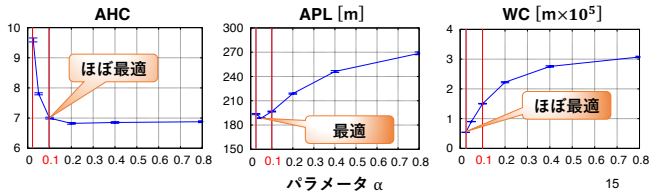
	Min-Link	EDR $_{\alpha=0.025}$	EDR $_{\alpha=0.10}$	EDR $_{\alpha=0.40}$	Random	BA	Full-Link
APL	1.51	1.29	1.39	1.47	1.48	1.48	1.38
AHC	1.44	1.09	1.11	1.13	1.12	1.12	1.05
WC	1.83	2.43	2.56	2.60	2.62	2.62	4.88
モジュラリティ	0.84	1.03	1.04	1.04	1.05	1.01	1.00

14

## パラメータ $\alpha$ の影響の評価

- N = 4000 の場合の APL、AHC、WC をパラメータ  $\alpha$  に対して詳細に評価
  - 0.025  $\leq$   $\alpha$   $\leq$  0.10 の範囲で
    - コスト (WC) の低下と効率 (AHC) の向上のトレードオフを確認
    - APL が最適な値を達成することを確認

トレードオフの元で高い性能を発揮することを確認



15

## フラッディングによる評価

- 同一の WC で構築されるトポロジの性能を比較評価
- フラッディング実施時の情報拡散速度を計測
  - 発生・到着したデータは各ノードの全隣接ノードに転送
  - リンク上の伝搬遅延、ノード上の処理遅延を考慮
    - 伝搬遅延: 100[m] の伝搬に対して  $\Delta[s]$  の遅延が生じると仮定
    - 処理遅延: サービス率  $\mu = 1/\Delta[s^{-1}]$  の遅延が生じると仮定
- VNS-Layer の構築手法
  - 200[m] 四方領域、N = 5000、r = 8[m]、m = 25、M  $\approx$  100
    - EDR モデル
      - パラメータを  $\alpha = 0.05$  に固定
    - Random Weight モデル
      - l の WC を固定し、既存のリンクの重みのみをランダムに張り替え
    - Random Shape モデル
      - l の WC を固定し、リンクをランダムに生成し直したモデル

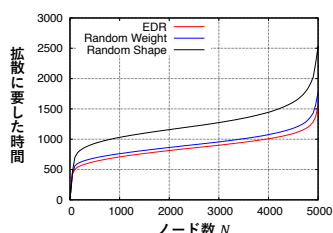
16

## 情報拡散速度

- Random Shape の性能が最も低いことを確認
  - EDR によって構築されるトポロジの形状が効率的に情報を拡散
- EDR が Random Weight よりも高い情報拡散速度を提示
  - EDR に従って近接したモジュール間に多数の Inter-VL を生成する方式が、情報拡散効率の高いトポロジを形成



モジュール内ノード数が多い場合に、提案手法のモジュール間 Inter-VL 割り付け方式の適応性が高いことを確認



17

## 結論と今後の課題

- 結論
  - 提案手法は  $\alpha = 0.05$  付近のパラメータを用いる場合に、コストと効率性のトレードオフの元で望ましい性能を示した
  - 大規模な環境に適用する場合に、提案手法が望ましい性能を発揮することを示した
    - モジュール数の増加、モジュール内ノード数の増加に適應
- 検討すべき今後の課題
  - ノードのトポロジ上の特性を考慮した VS-Layer の構築
    - 隣接ノードの共有割合、次数相関、etc.
  - 複数の VS-Layer を同時に構築した場合の性能評価

18