

脳機能ネットワークの構造的特徴を有する
無線センサーネットワークトポロジー構築手法

大阪大学
石倉秀

1

研究背景と目的

- WSN に対する要求の変化^[3]
 - IoT や M2M の台頭により共用の通信基盤としての期待
 - 電池容量の制約による省電力化の要求に加えて、
 - 多様なトラフィックに応える通信効率
 - 様々な環境変化に対するロバスト性

↓

高い通信効率、ロバスト性を有する脳機能ネットワーク (BFN) に着目しトポロジー構築の観点からこれらの要求を満たすことを目指す

2

[3] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The internet of things : A survey," Computer Networks, vol.54, no.15, pp.2787-2805, Oct. 2010.

脳機能ネットワーク (BFN)

- ヒトの脳の機能的相関関係を表現したネットワーク
 - ノード：脳の解剖学的な機能領域を表す
 - リンク：ヒトが特定の行動をとった際の、ノードの活性時間の相関を表す
- 「トポロジー的な価値」と「代謝の低コスト化」のトレードオフを調整する中で様々な構造的特徴^[5]を発現
 - スモールワールド性
 - BFN において高い通信効率、ロバスト性に寄与
 - モジュール構造
 - BFN において進化可能性、スケラビリティに寄与

3

スモールワールド性

- 短い平均ホップ長, 高いクラスター係数
 クラスター係数：隣接ノード同士が互いに接続されている割合の平均

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i \neq j \in G} \frac{2L_{ij}}{k_i(k_i-1)}$$
 Nはノード数, k_i ノードiの隣接ノード数, L_{ij} は隣接ノード間のリンク数
- 様々なスモールワールドネットワーク構築方法
 Newman & Wattsモデル：格子状トポロジーに長距離リンクを追加

格子状トポロジー → リンク追加 → スモールワールドトポロジー

追加される長距離リンク

4

BFN トポロジーモデルの提案

既存のモデル^[8,9]は脳の大きさやノード配置に依存

- ノード間距離や度数に基づいた確率的リンク追加モデルが提案されている

WSN への適応が困難

- 自由なノード配置が求められる

文献^[8]のモデルにより構築されるトポロジー

- BFN のスモールワールド性を有するモデルを構築
 - 格子状トポロジーの構築
 - 長距離リンクの追加

5

[8] P. E. Vertes, A. F. Alexander-Bloch, N. Gogtay, J. N. Giedd, J. L. Rapoport, and E. T. Bullmore, "Simple models of human brain functional networks," Proceedings of the National Academy of sciences, vol. 109, no. 15, pp. 5868-5873, Aug. 2012.

提案手法の概要

- 格子状トポロジーの構築
 - 最小スパンニングツリーを構築
 - リンク数の合計が M_0 本に達するまで、ノード間の距離に近い順にリンクを追加
- 長距離リンクを追加
 - 脳機能ネットワークのスモールワールド性に最も近づくリンクをリンク数の合計が M 本に達するまで、長距離リンクを追加

スパンニングツリーの構築 → 短いリンクから順に接続 → 長距離リンクの追加

WSN

6

長距離リンクの追加

以下を繰り返し長距離リンクを $(M - M_0)$ 本追加

- 脳機能ネットワークとの差分 $I_{i,j}$ が最小になるノード i とノード j の間にリンクを追加

脳の通信効率との差

$$I_{i,j} = \alpha [E_{i,j} - E_{brain}] + (1 - \alpha) [C_{i,j} - C_{brain}]$$

通信効率とクラスター係数の重み付け

脳のクラスター係数との差

E_{brain}	C_{brain}
0.29	0.35

文献^[8]中の脳の通信効率度, クラスター係数

- 通信効率度 (E) : 平均ホップ長を正規化した値

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{i,j}}$$

Nはノード数, $d_{i,j}$ ノード i, j 間のホップ長
- クラスター係数 (C) : 隣接ノードを 2 つ挙げた時にそれらが互いに接続されている割合の平均値

[8] P. E. Vertes, A. F. Alexander-Bloch, N. Gogtay, J. N. Giedd, J. L. Rapoport, and E. T. Bullmore, "Simple models of human brain functional networks," Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 109, no. 15, pp. 5869-5873, Aug. 2012.

シミュレーションによる評価

- シミュレーション環境
 - 140 個のセンサーノードを正方領域にランダムに配置
 - リンク数 $M_0 = 339$, $M = 389$
 - ノード数、リンク数は文献^[8]中の値を使用
- 2 つのモデルを比較評価
 - 提案手法により構築したトポロジー
 - I_{ij} における重み付け定数 α を 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 として、長距離リンクを追加
 - Newman & Watts (N&W) モデルにより構築したトポロジー
 - 格子状トポロジーに対してランダムにリンクを追加
 - スモールワールド性を有するトポロジーを構築する代表的モデル

[8] P. E. Vertes, A. F. Alexander-Bloch, N. Gogtay, J. N. Giedd, J. L. Rapoport, and E. T. Bullmore, "Simple models of human brain functional networks," Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 109, no. 15, pp. 5869-5873, Aug. 2012.

評価指標

- スモールワールド性に関する特徴量
 - クラスター係数
 - 平均ホップ長
- 消費電力
 - 追加リンクを通信に用いた場合の消費電力量の合計をフリスの伝達公式^[11]で受信電力を定数にして算出
- 耐故障性
 - 接続性の耐故障性: 次数順にノードが故障する際の最大連結成分の変化
 - 平均パス長の耐故障性: 次数順にノードが故障する際の平均パス長の変化

[11] H. T. Friis, "A note on a simple transmission formula," Proceedings of the Institute of Radio Engineers, vol. 34, no. 5, pp. 254-256, May 1946.

リンク追加による各指標の変化

- クラスター係数 (実線)
 - α の値が小さいほど、クラスター係数が低下
 - クラスター係数が最も低下するようなリンクの中で、通信効率度がより上がるリンクが追加される
- 通信効率度 (破線)
 - α の値が大きいほど、早期に基準値に達する
 - 通信効率度が基準値に到達した後は、通信効率度への影響が小さく、クラスター係数を下げようようなリンクが追加される

[8] P. E. Vertes, A. F. Alexander-Bloch, N. Gogtay, J. N. Giedd, J. L. Rapoport, and E. T. Bullmore, "Simple models of human brain functional networks," Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 109, no. 15, pp. 5869-5873, Aug. 2012.

提案手法により構築されるトポロジー

$\alpha = 0.3$

$\alpha = 0.7$

- クラスター係数を下げるために次数が低いノード同士が優先的に接続
 - その中でも、互いに離れたノード同士が接続
- 通信効率度を上げるために、一部のノードにリンクが集中して追加される
 - 通信効率度を基準値まで上げた後は、通信効率度に影響しないリンクを追加

ネットワーク性能評価

- 平均ホップ長
 - α が 0.5 以上の場合に N&W モデルよりも短くなる
- クラスター係数
 - α が 0.7 以下の場合に N&W モデルよりも小さくなる

ランダムなリンクの追加だけでは表現できないスモールワールドの特徴を表現可能となっている

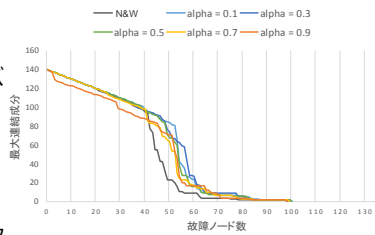
トポロジー	平均ホップ長	クラスター係数	消費電力量 [10^{-6} mW]
格子状	10.526	0.558	0
N&W	4.042	0.387	0.904
$\alpha = 0.1$	4.105	0.365	1.125
$\alpha = 0.3$	4.061	0.365	1.118
$\alpha = 0.5$	3.960	0.379	0.732
$\alpha = 0.7$	3.963	0.384	0.549
$\alpha = 0.9$	3.973	0.393	0.434

- 消費電力量は α の値を大きくするほど小さな値となる
 - α の値が大きい場合には、通信効率度が基準値に到達した時点以降、比較的短いリンクのみが追加されるため

接続性のロバスト性



- 接続性のロバスト性
 - 次数が大きい順でノードが故障する際の最大連結成分の大きさを評価
- 全ての場合で高いロバスト性
 - 格子状トポロジーの高いクラスター係数
 - リンクの追加による冗長性向上
 - $\alpha = 0.9$ の際は、リンクが集中するノードの故障時に接続性が失われる

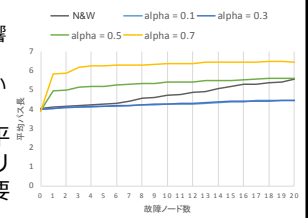


13

平均ホップ長のロバスト性



- α が小さいほど短い平均ホップ長を維持
 - ハブノードができていく
 - リンク追加毎の通信効率への影響が少ない
 - 長距離リンクの端点は次数が低いいため選択されにくい
- 次数が小さいノードに対して平均ホップ長が短くなるようなリンクを多数追加することが重要



14

まとめ



- 結論
 - 提案手法によって構築したトポロジーはNewman & Wattsモデルと同程度の平均ホップ長であり、 $\alpha = 0.1, 0.3$ の場合は、消費電力量に関して劣るものの、平均ホップ長について高いロバスト性を有する
 - 平均ホップ長については次数が小さいノードに対して平均ホップ長が短くなるようなリンクを多数追加することが重要
- 今後の課題
 - モジュール構造などスモールワールド性以外の構造的特徴のモデルへの追加
 - 構造的特徴による利点を反映
 - トラフィックを考慮した場合の性能の評価

15