

無線センサー・アクチュエーターネットワークのための生物モデルを用いた優れた機能回復性を有するネットワーク制御

Resilient Network Control based on Stochastic Mathematical Model of Biological Behavior for Wireless Sensor and Actuator Networks

情報ネットワーク学専攻
先進ネットワークアーキテクチャ講座
村田研究室
岩井卓也

2014/12/15

博士學位論文公聴会

1

無線センサー・アクチュエーターネットワーク

- センサーやアクチュエーターを搭載する無線ノードで構成
- スマートシティ等の社会インフラの基盤技術として期待
 - 様々な状況下での運用が想定されている ※状況の例：位置情報の誤差が生じる状況、パラメータの最適化が難しい状況、故障ノードが存在する状況、メッセージが欠落する状況、など
 - 状況に依らずに適切に機能する事が重要
- 求められる性質

頑健性
 ・様々な状況において、要求を満たせる状態を発見できる性質
 ・しかし、状況は頻繁に変化する事も想定されるため、頑健性を高めるだけでは不十分

適応性
 ・システムが状況の変化に迅速に対応できる性質
 ・向上のためには、システムが特定の状態で安定せず、より良い状態を探索し続ける事が重要

レジリエント（=高い頑健性+高い適応性）な無線センサー・アクチュエーターネットワークを実現

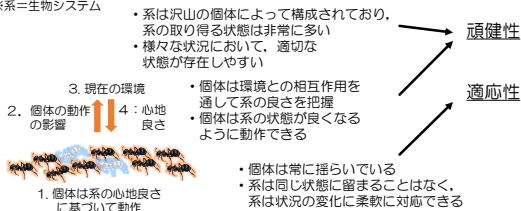
2014/12/15

博士學位論文公聴会

2

生物モデルを応用したレジリエント・ネットワーク制御

※系=生物システム



アトラクタ選択モデル^[48]や反応閾値モデル^[60]などの生物モデルとして知られている

生物モデルを応用することでレジリエント・ネットワーク制御を実現

[48] A. Kashiwagi et al., "Adaptive response of a gene network to environmental changes by fitness-induced attractor selection," PLoS ONE, Dec. 2006.
 [60] E. Bonabeau et al., "Adaptive task allocation inspired by a model of division of labor in social insects," in Proceedings of the International Conference on BCC, Jan. 1997.

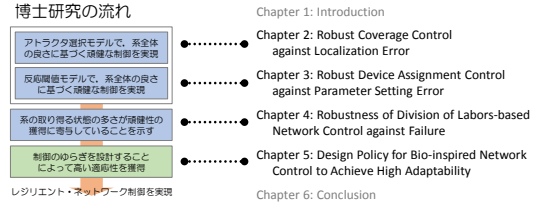
2014/12/15

博士學位論文公聴会

3

博士研究の目的と流れ

- 博士研究の目的
無線センサー・アクチュエーターネットワークのための生物に着想を得たレジリエント・ネットワーク制御の実現
- 博士研究の流れ



2014/12/15

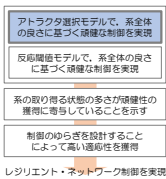
博士學位論文公聴会

4

2章：カバレッジ制御を題材とした位置情報の誤差に対して頑健な制御

関連業績：

- [1] Takuya Iwai, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "Error-tolerant and energy-efficient coverage control based on biological attractor selection model in wireless sensor networks," International Journal of Distributed Sensor Networks, Feb. 2012.
- [2] Takuya Iwai, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "Error-tolerant coverage control based on bio-inspired attractor selection model for wireless sensor networks," in Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer and Information Technology, June 2010.
- [3] Takuya Iwai, Naoki Wakamiya and Masayuki Murata, "Error-tolerant and energy-efficient coverage control based on attractor selection model for wireless sensor networks," in Proceedings of IEICE Society Conference, Sep. 2010.
- [4] Takuya Iwai, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "Bio-inspired Autonomous and Adaptive Coverage Control for Wireless Sensor Networks," in Proceedings of the 2nd International Workshop on Sensor Networks and Ambient Intelligence, Dec. 2009.
- [5] Takuya Iwai, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "Proposal and Evaluation of Attractor Selection-based Coverage Control in Wireless Sensor Networks," IEICE Technical Report (N2009-120), Dec. 2009. (in Japanese)



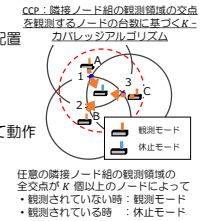
2014/12/15

博士學位論文公聴会

5

題材とするカバレッジ制御の概要と生物的な制御が有効な理由

- K -カバレッジ制御
 - センサーを搭載するノードを領域内に冗長に配置
 - 個々の観測対象を K 個以上のノードで観測
 - 冗長なノードを休止させて省電力化を達成
- 従来手法の問題点
 - ノードは制御に対して直接的な情報に基づいて動作
 - ✓ 情報の例：センサーの観測領域の形状
 - ✓ 情報の例：近隣ノードや自身の位置
 - 直接的な情報はノイズ等の影響を受け易く、実環境では観測もれや過度な観測が発生



生物的なネットワーク制御が有効な理由

- 生物システムの個体は間接的な情報（系の良さ等）に基づいて動作できる
- この仕組みを応用することによって、ノードは誤差の影響を受け難い情報（例：シンクの受信した観測情報の満足度など）で動作できる

2014/12/15

博士學位論文公聴会

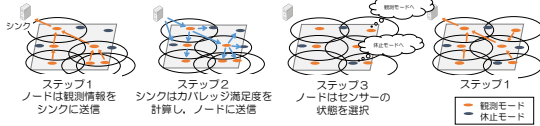
6

提案した K-カバレッジ制御の概要

- 定時観測型のアプリケーションを対象
- カバレッジ制御の流れ

1. ノードは定期的に観測情報をシンクに送信
2. シンクは観測情報からカバレッジ満足度 (0~1 の実数) を計算して拡散
3. ノードはカバレッジ満足度に基づいて観測するか、休止するかを選択

※生物モデルの1つであるアトラクタ選択モデルによって実現
※詳細は次スライド



2014/12/15

博士學位論文公開会

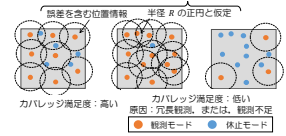
7

アトラクタ選択モデルを用いた K-カバレッジ制御

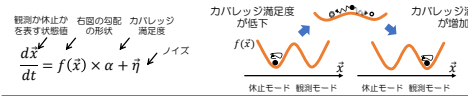
- シンクは次式に従ってカバレッジ満足度 α を計算

$$\alpha = \frac{S}{\max\{1, wE\}} \quad \text{※ } w: \text{定数}$$

- 十分さ S: K 台以上のノードにより観測されている地点の割合
- 冗長さ E: K 台よりも多いノードにより観測されている地点を観測する余剰なノードの数の平均



- ノードはカバレッジ満足度 α に基づいて自律的に状態を選択^[48]



- ノードは間接的な情報であるカバレッジ満足度だけで状態を選択可能
- これにより、位置情報や観測領域の形状の誤差に対する頑健性を期待可能

2014/12/15

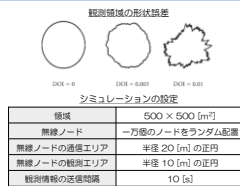
博士學位論文公開会

8

シミュレーション評価の内容

ノードの位置情報の誤差やセンサーの観測領域の形状の誤差に対する提案した K-カバレッジ制御手法の頑健性を評価

- 比較対象: CCP^[27]
- 隣接ノード組の観測領域の交点を観測するノードの台数に基づく手法
- ノードの位置情報の誤差
- u [m]: 位置情報の最大誤差
- $-u$ [m] ~ u [m] の一様乱数
- センサーの観測領域の形状誤差
- DOI モデル^[52]



時間の都合により、位置情報の誤差に対する頑健性の評価結果を表す

[27] G. Xing et al., "Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks," ACM Transactions on Sensor Networks, Aug. 2005.
[52] G. Zhou et al., "Impact of radio irregularity on wireless sensor networks," in Proceedings of International Conference on Mobile, June 2004.

2014/12/15

博士學位論文公開会

9

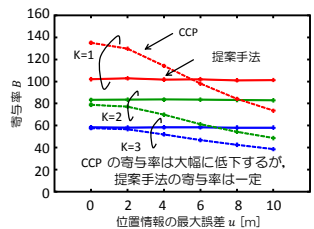
シミュレーション評価の結果

- 性能指標: 奇与率 $B (\geq 0)$

- 定義

$$B = \frac{M \times S}{N} [m^2]$$

- M: 領域の広さ
- N: 観測するノードの台数
- S: K 台以上のノードで観測されている地点の割合
- 1 台のノードがどのくらい効果的にカバレッジに貢献しているのかを表す指標



- 提案手法は位置情報の誤差の生じない場合の奇与率を維持できている
- 位置情報の誤差に対する頑健性は高い

2014/12/15

博士學位論文公開会

10

2章のまとめ

アトラクタ選択モデルによって、系全体の良さに基づいてノードが状態を選択する頑健な制御機構を実現

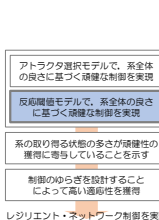
- アトラクタ選択モデルを用いたカバレッジ制御を提案
- ノードは定期的に観測情報をシンクに送信
- シンクはカバレッジ満足度を算出して拡散
- ノードはカバレッジ満足度のみで状態を選択
- シミュレーション評価によって:
 - ノードの位置情報の誤差に依らず奇与率を維持
 - 比較手法よりネットワークの寿命を6倍に延長
 - 比較対象より観測領域の形状誤差の影響を受けにくい

2014/12/15

博士學位論文公開会

11

3章: デバイス割当て制御を題材としたパラメータ設定に頑健な制御



関連業績:

- [1] Takuya Iwai, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "Response threshold model-based device assignment for cooperative resource sharing in a WSN," International Journal of Swarm Intelligence and Evolutionary Computation, April 2012.
- [2] Takuya Iwai, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "Proposal of autonomous task allocation for dynamic formation of service networks over wireless sensor and actuator networks," IEICE Technical Report (N2010-219), March 2011.
- [3] Takuya Iwai, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "Proposal for dynamic organization of service networks over a wireless sensor and actuator network," in Proceedings of the 2nd International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies, Sept. 2011.
- [4] Takuya Iwai, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "A self-organization based device assignment mechanism for cooperative resource sharing in a wireless sensor and actuator network," IEICE Technical Report (N2012-8), April 2012.

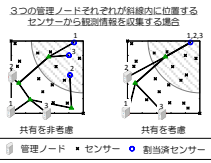
2014/12/15

博士學位論文公開会

12

デバイス割当て制御の概要と生物的な制御が有効な理由

- サービス要求に応じて必要なデバイスを「既設サービスとのデバイス共有」や「ノードの残余電力」を考慮して組み合わせるための制御
- デバイス：ノードが搭載するセンサーやアクチュエーターの総称
- 従来手法の問題点
 - ノードは自身の状態（デバイスを割り当てたサービスの数等）をサービスの管理ノードに送信
 - 管理ノードは事前に設定したルールに基づいて組み合わせを決定
 - ルール内の閾値等の各種パラメータ設定が性能に大きく影響



生物的なネットワーク制御が有効な理由

- 直接的な情報（ルールの閾値）を用いずに適切な個体が自律的に仕事をすること、この仕組みを応用することで、パラメータ設定に頑健な制御が実現可能

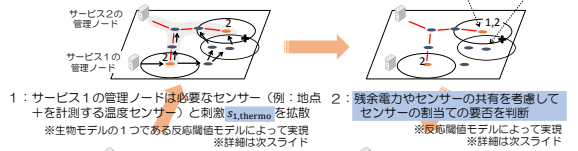
2014/12/15

博士學位論文 公開版

13

提案したデバイス割り当て制御の概要

前提：ノードは自身を中心とする正円内の温度を計るセンサーを搭載
 前提：サービス1は1秒毎の地点「+」の温度情報を収集するサービス
 前提：一部のノードはサービス2にセンサーを割り当て済み



- サービス1の管理ノードは必要なセンサー（例：地点+）を計測する温度センサーと刺激 $s_{i,1}(t)$ を拡散
※生物モデルの1つである反応閾値モデルによって表現 ※詳細は次スライド
- 残余電力やセンサーの共有を考慮してセンサーの割当ての要否を判断
※反応閾値モデルによって表現 ※詳細は次スライド

- 割当てた旨を管理ノードに送って通知
- 仕事を開始（例：計測結果の送信）

2014/12/15 博士學位論文 公開版 14

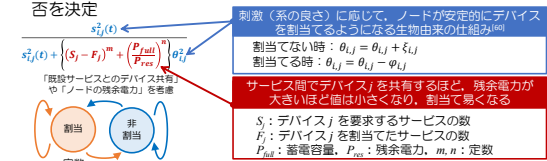
反応閾値モデルを用いたデバイス割り当て制御

- サービス i の管理ノードは次式でデバイス j に関する刺激 $s_{i,j}(t)$ を計算

$$s_{i,j}(t) = s_{i,j}(t-1) + \delta_{i,j} - N_{i,j}(t-1) \quad \delta_{i,j} : \text{サービス } i \text{ に必要なデバイス } j \text{ の数}$$

$$N_{i,j} : \text{サービス } i \text{ に割り当てられたデバイス } j \text{ の数}$$

- ノードは次モデルに従ってサービス i に対するデバイス j の割当ての要否を決定



直接的な情報（例：ルール内の閾値）を利用せずに、適切なノードが自律的にデバイスを割当ててる様になるため、パラメータ設定に対する頑健性を期待可能

2014/12/15

博士學位論文 公開版

15

シミュレーション評価の内容

パラメータの設定値に対する、提案したデバイス割り当て制御の頑健性を検証

- 比較対象：Directed Diffusion^[36]
- ノードは管理ノードにセンサー j の共有度 $\frac{p_{res,j}}{P_{tot}}$ や残余電力 p_{res} を通知
- 管理ノードは事前に定めた右表の優先度に基づいてセンサーを決定
- シミュレーションの設定
 - 3台の管理ノードが各1台のセンサーに地点 (25,25) の観測情報を要求

ノードの残余電力	センサーの共有度	
	閾値以上	閾値以下
閾値以上	優先度	2番目に優先
閾値以下	3番目に優先	4番目に優先

領域	25m x 25m の領域
ノード	センサーを1つ搭載するノードを25台配置
観測エリア	半径15mの正円
送信エリア	半径15mの正円
ノードの残余電力	20%から80%の間でランダムに設定

[36] C. Intanagonwiwat et al., "Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks," in Proceedings of International Conference on MobileCom, Aug. 2000.

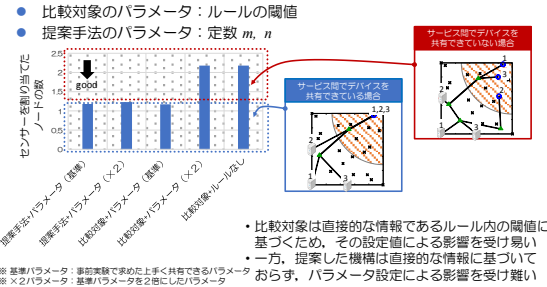
2014/12/15

博士學位論文 公開版

16

シミュレーション評価の結果

- パラメータ設定がセンサーを割り当てるノードの数に与える影響



比較対象は直接的な情報であるルール内の閾値に基づいたため、その設定値による影響を受け易い一方、提案した機構は直接的な情報に基づいておらず、パラメータ設定による影響を受け難い

2014/12/15

博士學位論文 公開版

17

3章のまとめ

反応閾値モデルによって、系全体の良さに基づいてノードが状態を選択する頑健な制御機構を実現

- 反応閾値モデルを用いたデバイス割り当て制御を提案
 - 管理ノードは割り当てられたデバイスの過不足に応じた刺激を拡散
 - ノードは刺激に基づいて自律的にデバイス割り当ての要否を判断
 - その際にノードはデバイスの共有やノードの残余電力を考慮
- シミュレーション評価によって：
 - 複数サービス間での共有を考慮したデバイス割り当てが可能
 - 比較対象と異なりパラメータ設定の影響を受けにくい

2014/12/15

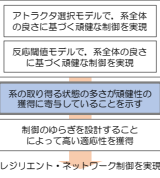
博士學位論文 公開版

18

4章：デバイス割当て制御を対象としたノード故障に対する頑健性の分析

関連業績：

- [1] Takaya, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "Characteristic Analysis of Model of Division of Labors for Self-organizing Network Control," Nano Communication Networks, submitted for publication, Dec. 2014.
- [2] Takaya, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "Analysis of response threshold model and its application for self-organizing network control," in Proceedings of the 7th International Workshop on Self-Organizing Systems, May 2013.
- [3] Takaya, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "Characteristic Evaluation of Response Threshold Model for Self-organizing Network Control," in Proceedings of IEICE General Conference, Sep. 2012 (in Japanese).



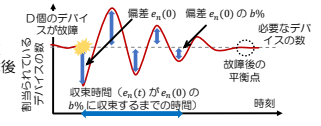
2014/12/15

博士學位論文 公開

19

分析内容と分析方法

- 内容：D個のデバイスが故障した後に、必要な数のデバイスが割当てられている
 - 状態が存在するための条件
 - 状態に戻るための条件
 - 状態に戻るまでの時間
- 方法：線形システム論を用いた解析的アプローチ
 - パラメータと頑健性の関係を明確化する



時間の都合により、特に状態の数が頑健性に与える影響の解析結果を公表

2014/12/15

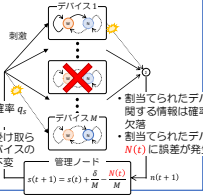
博士學位論文 公開

20

解析モデルを作成

1：デバイス割当て制御

- M個のデバイスの内、D個のデバイスが故障つまり、取り得る状態は 2^{M-D} 状態
- M-D個のデバイス中、d個の割当てを要求
- 全てのデバイスの閾値 θ は等しい定数



- 割当てられたデバイスに関する情報は確率 q_w で欠落
- 割当てられたデバイス数 $N(t)$ に誤差が発生
- 刺激は確率 q_s で欠落
- 刺激を受け取らないデバイスの状態は不変

2：ある時刻における条件付き確率を導出

- 割当て済みデバイスの数の条件付き確率 $P(N_{t+dt} = n^+ | S_t = s, N_t = n)$
- 刺激の値の条件付き確率 $P(S_{t+dt} = s^+ | S_t = s, N_t = n)$

3：期待値の時間変化を導出

- 割当て済みデバイスの数の期待値の変化 $\frac{dE[S_t]}{dt} = \delta - \frac{1-q_w}{M} E[N_t]$
- 刺激の値の期待値の変化 $\frac{dE[N_t]}{dt} = (q_s - 1) \left\{ pE[N_t] - E \left[\frac{S_t^2}{S_t + \theta^2} \right] (M - D - E[N_t]) \right\}$

2014/12/15

博士學位論文 公開

21

偏差のダイナミクスを導出

3：期待値の時間変化を導出（再掲）

- 割当て済みデバイスの数の期待値の変化 $\frac{dE[S_t]}{dt} = \delta - \frac{1-q_w}{M} E[N_t]$
- 刺激の値の期待値の変化 $\frac{dE[N_t]}{dt} = (q_s - 1) \left\{ pE[N_t] - E \left[\frac{S_t^2}{S_t + \theta^2} \right] (M - D - E[N_t]) \right\}$

4：故障後の平衡点を導出

- 割当て済みデバイスの数の期待値の平衡点 $E[S_t] = \frac{\delta M}{1-q_w}$
- 刺激の値の期待値の平衡点 $E[N_t] = \theta \sqrt{\frac{p\delta}{(1-D/M)(1-q_w) - \delta(1+p)}}$ > 0 が平衡点の存在条件 (分析内容①)

5：期待値 $E[S_t], E[N_t]$ と故障後の平衡点 $[E[S_t], E[N_t]]$ の偏差 $[e_s, e_n]$ のダイナミクスを導出し、線形化

- 遷移行列の固有値の実数部分が偏差 $[e_s, e_n]$ の減衰の仕方を定めている
- 固有値を分析して、偏差が収束するための条件や要する時間を分析

2014/12/15

博士學位論文 公開

22

平衡点が漸近安定性を持つ条件を解析

5：期待値 $E[S_t], E[N_t]$ と故障後の平衡点 $[E[S_t], E[N_t]]$ の偏差 $[e_s, e_n]$ のダイナミクスを導出し、線形化（再掲）

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_s \\ e_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1-q_w \\ \frac{2E[S_t]\theta^2}{(E[S_t]^2 + \theta^2)} & (1-q_s) \left(p + \frac{E[S_t]^2}{E[S_t]^2 + \theta^2} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_s \\ e_n \end{bmatrix}$$

- 遷移行列の固有値の実数部分が偏差 $[e_s, e_n]$ の減衰の仕方を定めている
- 固有値を分析して、偏差が収束するための条件や要する時間を分析

6：漸近安定性の解析

- 平衡点の漸近安定性を持つ条件 $Re \lambda = Re \frac{1}{2} \left(c \pm \sqrt{c^2 + 4ab} \right) < 0$
- 故障後に平衡点が存在する時は常にデバイス故障から復帰可能であり、故障に対して頑健である

7：頑健性とデバイス数Mの関係

- 平衡点の存在条件 $\left(1 - \frac{D}{M} \right) (1 - q_w) - \frac{\delta}{M} (1 + p) > 0$
- 総デバイス数が多い (⇒状態が多い) 程、デバイス割当て制御の頑健性は向上

2014/12/15

博士學位論文 公開

23

4章のまとめ

反応閾値モデルを用いたデバイス割当て制御を解析して、系の取り得る状態の多さが頑健な制御につながることを確認

- ノード故障に対する頑健性の観点からデバイス割当て制御を解析
 - ノード故障とメッセージ欠落を考慮した解析モデルを作成
 - 故障後に平衡点が存在する条件を導出
 - 平衡点に留まる条件と収束時間を導出
- 数学解析、シミュレーション評価によって：
 - 必要な数のデバイスが残っている場合は平衡点に留まることが可能
 - 故障規模が拡大しても再収束に要する時間は発散しないことを確認
 - ノード故障によって孤立ノードが生じるマルチホップネットワークにおいても同様の結果が得られることを確認

2014/12/15

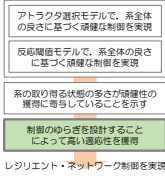
博士學位論文 公開

24

5章：生物モデルを用いたネットワーク制御のゆらぎの大きさの設計方針

関連業績：

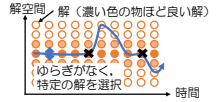
- [1] [Ishiyama, Daichi, Koike, Masayuki, Murata, and Tetsuya Yomo, "Free Energy-based Design Policy for Robust Network Control against Environmental Fluctuation," The Scientific World Journal \(submitted for publication\), Dec. 2014.](#)
- [2] [Ishiyama, Daichi, Koike, Masayuki, Murata, and Tetsuya Yomo, "Thermodynamic Principle-based Strategy to Achieve Balance between Robustness and Performance for Self-organized Network Control," in Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, Sep. 2014.](#)
- [3] [Ishiyama, Daichi, Koike, Masayuki, Murata, and Tetsuya Yomo, "Thermodynamics-based Entropy Adjustment for Robust Self-organized Network Controls," in Proceedings of the 38th IEEE International Computers, Software, and Applications Conference, July 2014.](#)
- [4] [Ishiyama, Daichi, Koike, Masayuki, Murata, and Tetsuya Yomo, "Interpretation of Self-organized Network Controls in Terms of Thermodynamics," in Proceedings of Workshop on IEEE Technical Committee on Information Network Science \(NETS\), August 2014.](#)
- [5] [Ishiyama, Daichi, Koike, Masayuki, Murata, "Thermodynamics-based Coordinated Control for Self-organizing Information Networks," in Proceedings of IEEE General Conference, March 2014.](#)



ゆらぎの大きさを設計しなければいけない理由

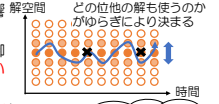
■ 既存のネットワーク制御はゆらぎを排除する傾向がある

- 安定状態における性能を最大化するために、把握できている解の中から特定の良解を安定して選択するようになる
- 障害が発生すると、解を再度探索し直す必要が生じるため、性能は大きく低下



■ 備えておきたい障害に応じてゆらぎを残しておくべき

- 複数の解を併用することにより、障害の影響を受けにくくなり、性能低下を抑制可能
- 現状、生物モデルを用いたネットワーク制御においてこれを考慮した設計はされていない



ゆらぎを排除して最良な解を選択する傾向（最適性）とゆらぎを残して最良な解以外も選択して障害に備える傾向（適応性）のバランスの判断の仕方が必要

ゆらぎを内包する生物の状態は熱力学の自由エネルギーの観点から捉えられている

自由エネルギーの観点からネットワーク制御の安定状態を捉える

■ ネットワーク制御の自由エネルギー（E）は解の発見力に相当

- 解の発見力：=性能の期待値

$$\text{自由E} = \text{内部E} - \text{温度} \times \text{エントロピー}$$

変動が生じないと仮定した場合に得られる性能の平均（=最適性の高さ）

変動が生じた場合に生じる性能低下の大きさ（=適応性の低さ）

自由E最大化のためには、ゆらぎを排除して特定の解を選びやすくして最適性を高める

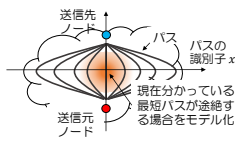
自由E最大化のためには、ゆらぎを大きくして他の解を選びやすくして適応性を高める

どちらの方法が効果的かは温度に依存

- 温度を設計要求に応じて備えておきたい環境変動の度合いとみなす
- 内部Eやエントロピーが決まり、ゆらぎの大きさも決める事が可能

マルチパス制御を題材とした、自由Eに基づく制御の設計

■ 送信元ノードが複数のパス候補の中から1つを確率的に選択



説明	モデル
パスxを選択した時に得られる性能 ※性能はパスの短さに相当し、分散σ _i ² が大きいほど短いパスが多い	接続: $g_{max} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}}$ 途絶: 0
パスxが途絶する確率 ※分散σ _i ² が大きいほどより多くのパスが途絶しやすい	$q_{max} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}}$
パスxを選択する確率 ※分散σ _i ² が大きいほど最短パス以外も選択（ゆらぎが大きい）	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_i^2}}$

■ 自由E A_{nw}を定式化

温度（備えておきたい変動の度合い）

$$A_{nw} = g_{max} \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} - q_{max} \times g_{max} \sqrt{\frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 + \sigma_1^2 (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}}$$

最適性

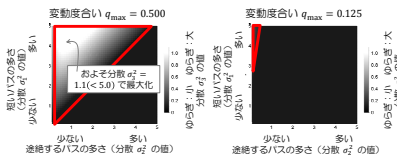
適応性

備えておきたい変動の度合いに応じて、最適性や適応性を設計することが、ネットワーク制御の設計に繋がる

分析モデルを数値解析した結果（参考）

■ 変動度合いに応じてゆらぎの大きさが決まる事を確認

- 自由E A_{nw}が最大化する分散σ_i² (0 ≤ σ_i² ≤ 5)を計算
- 大きい値ほどより大きくゆらぐべきであることを表す



変動度合いに応じてゆらぎの量が決まる

今回の場合、変動度合いが高いほど、（最大ではないものの）より大きくゆらぐ方がより良い解の発見に繋がる

5章のまとめ

ゆらぎの大きさを設計することによって最適性と適応性の両面に優れたネットワーク制御を実現

■ ネットワーク制御のゆらぎの大きさの決め方

- 熱力学の観点からネットワーク制御の安定状態を解釈
- ネットワーク制御の自由エネルギーを定義、分析
- 既存の制御機構との対応関係を整理

■ 理論解析、シミュレーション評価によって：

- 変動度合いに応じて最適性や適応性が決まることを確認
- 既存の制御機構において、適応性と最適性のバランスに影響するパラメータをゆらぎの大きさの決め方に基づいて調整
- 既存の制御機構でも最適性と適応性を両立した安定状態に到達させることが可能であることを確認

無線センサー・アクチュエーターネットワークのための
生物に着想を得たレジリエント・ネットワーク制御を実現

- 2章：Robust Coverage Control against Localization Error
 - アトラクタ選択モデルを用いることによって、位置情報の誤差に頑健なカバレッジ制御を提案して評価
- 3章：Robust Device Assignment Control against Parameter Setting Error
 - 反応閾値モデルを用いることによって、パラメータ設定に頑健なデバイス割当て制御を提案して評価
- 4章：Robustness of Division of Labors-based Network Control against Failure
 - ノード故障に対する頑健性の観点からデバイス割当て制御を分析
- 5章：Design Policy for Bio-inspired Network Control to Achieve High Adaptability
 - 熱力学の観点から、ネットワーク制御のゆらぎの大きさの定め方を検討

ご清聴ありがとうございました