

生物の持つ高い環境適応性に着想を得た 管理型自己組織化制御

Managed self-organizing control method inspired by adaptive biological behavior

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
先進ネットワークアーキテクチャ講座 村田研究室
久世尚美

研究の背景

- ネットワークの大規模化、複雑化
 - ネットワーク全体の情報を収集、管理するための通信・計算コスト増大
- ネットワークに対する要求の多様化
 - 常に変化し続けるネットワーク環境下で動作し続けること
 - サービスの多様化、利用者の増加、移動端末などを含むデバイスの多様化
 - 予期せぬ障害の発生に際しても持続的に動作し続けること
 - 電力網・交通網などの管理におけるネットワーク利用
- ネットワークのさらなる発展に対して適応可能な制御の仕組みが必要
 - 拡張性:** ネットワークのサイズにかかわらず動作
 - 適応性:** ネットワークの環境の変化に合わせて、ネットワークへの要求を満たすよう自律的に挙動を変更可能
 - 頑健性:** ネットワークの一部が故障したとしても機能を維持

生物に着想を得た自己組織化制御

- 生物システムは**自己組織的**^[9]
 - 個々の構成要素が局所情報のみに基づいて自律的に動作
 - **拡張性**
 - 構成要素同士の相互作用により機能が創発
 - **拡張性**
 - 局所的な故障や変動に対しては近隣の構成要素により即応的に対処可能
 - **適応性、頑健性**

[9] C. Zheng and D. C. Sicker, "A survey on biologically inspired algorithms for computer networking," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1160-1191, Jan. 2013.

管理型自己組織化制御

- 自己組織化制御の実用上の問題点
 - 創発する機能の良さ
 - システム全体として必ずしも所望の機能が創発するとは限らない
 - 機能の創発に要する時間
 - 機能の創発、環境変動への適応に時間を要する
 - 特に、ネットワークの規模が大きいくほど、長い時間を要する傾向がある



- 管理型自己組織化制御**
 - 自己組織化システムに対し、自己組織化の優位な性質を残しつつ、トップダウンに制御を行う
 - 制御コスト（通信・計算コスト）を抑えつつ短時間で所望の機能が創発するよう管理を行うことについては十分な検討が行われていない
 - 特に大規模なネットワークにおいては、局所的な相互作用のみによる機能の創発により多くの時間を要するため重要

博士論文の目的と構成

- 研究の目的：
さらなるネットワークの発展に向け環境適応性に優れた生物の仕組みに着想を得た管理型自己組織化制御の実現

背景

1. Introduction

局所的な相互作用のみに基づく自己組織化の制御を導入し、その特性と有用性を示す

2. A predictive mechanism for enhancing adaptability of self-organizing routing
3. Website vulnerability scanning detection inspired by biological adaptation toward diversifying communication services

外部コントロールによる管理機構の導入により自己組織化の制御の有用性を向上

4. Controlling large-scale self-organized networks with lightweight cost for fast adaptation to changing environment
5. Hierarchical optimal control method for controlling large-scale networks

まとめ

6. Conclusion

Chapter 2 A predictive mechanism for enhancing adaptability of self-organizing routing

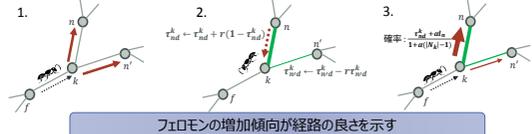
- Naomi Kuze, Daichi Kominami, and Masayuki Murata, "A predictive mechanism for enhancing adaptability of self-organized routing," *International Journal of Bio-Inspired Computation*, vol. 6, no. 6, pp. 384-396, January 2015.
- Naomi Kuze, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "Proposal and evaluation of anti-based routing with prediction," in *Proceedings of the Fifth International Workshop on Guided Self-Organization (GSO-2012)*, September 2012.
- Naomi Kuze, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "Proposal and evaluation of anti-based routing with autonomous zoning for convergence improvement," in *Proceedings of The 15th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS-2012)*, p.290-297, September 2012.
- Naomi Kuze, Naoki Wakamiya, Daichi Kominami and Masayuki Murata, "Proposal and evaluation of a predictive mechanism for anti-based routing," in *Proceedings of International Conference on Emerging Network Intelligence (EMERGING 2013)*, pp. 7-12, September 2013.
- Naomi Kuze, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "Proposal and evaluation of anti-based routing with autonomous zoning," *Technical Report of IEICE (IN2011-196)*, vol. 111, no. 469, pp. 353-358, March 2012 (in Japanese).

Chapter 2 の目的

- 局所的な相互作用のみに基づく自己組織型の制御を導入、その特性と有用性を示す
- 環境変動への適応速度を向上させる予測機構を提案、自己組織型システムへと導入し、その有用性を示す
 - 自己組織型システムの例として、アリの採餌行動に着想を得た経路制御手法 AntNet を用い、AntNet に対して予測機構を導入する
- シミュレーション評価を通して、予測機構の導入により、経路の構築速度が向上することを示す

アリの採餌行動に着想を得た経路制御

- AntNet [1]
 - 制御メッセージ (アント) が経路情報 (フェロモン) に基づき経路構築
 - 始めのフェロモンが残されていない状態ではアントはランダムに探索
 - アントは目的ノードを発見すると経路上のフェロモンを増加させながら送信元ノードへ帰還
 - 後続のアントはフェロモンの値に基づいて確率的に経路を選択
 - 目的ノードまでの遅延が小さい経路ほど多くのフェロモンが残される
 - フェロモンの値が大きい経路ほどアントに選択されやすくなり、さらに大きなフェロモンの値をとる



[1] G. Di Caro and M. Dorigo, "AntNet: Distributed stigmergic control for communications networks," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 9, pp. 317-365, Dec. 1998.

予測によるフェロモンの更新

- 目的ノード d の場合のノード k における隣接ノード n に対するフェロモンの増加傾向

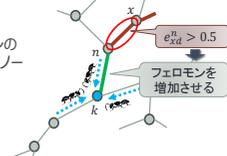
$$e_{nd}^k \leftarrow \begin{cases} (1-\beta)e_{nd}^k + \beta, & \text{if } n = f \\ (1-\beta)e_{nd}^k, & \text{otherwise} \end{cases}$$

f : アントによりフェロモンが残された隣接ノード
 β : 一度のフェロモン更新の量

- 予測アントによるフェロモンの制御
 - 予測アントが隣接ノードにおけるフェロモンの増加傾向を調査、増加傾向にある隣接ノードに対するフェロモンを増加させる

$$t_{nd}^k \leftarrow \begin{cases} t_{nd}^k + p(1-t_{nd}^k), & \text{if } \max_{x \in N_n} e_{xd}^n > 0.5 \\ t_{nd}^k - p t_{nd}^k, & \text{otherwise} \end{cases}$$

t_{nd}^k : 目的ノード d のときノード k におけるノード $n \in N_n$ に対するフェロモン
 p : 予測アントによるフェロモンの増加量を決定するパラメータ

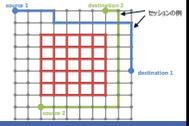


シミュレーション設定

- トラフィック変動時の経路の再構築時間を評価

- 比較対象: AntNet
- 評価シナリオ
 - セッションを 100 本はり、経路を一旦構築させる
 - シミュレーション開始から 1,000s 経過後、ネットワークの中心部分 (下図の赤で示された部分) のトラフィックを増加させる
 - 経路を再構築する際の再構築時間、および制御オーバーヘッドを評価
 - 再構築時間: トラフィック変化後から、経路が再構築されるまでの時間
 - 経路の再構築の定義: 全セッション中 90% 以上のセッションで 10 回連続で同じ経路が選択される
 - 制御オーバーヘッド: 経路の再構築に要したアント、予測アントの累積ホップ数

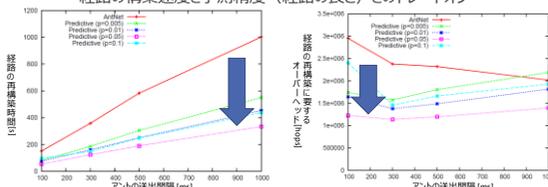
Parameter	Value
アントの送出間隔	100ms ~ 1s
予測案との送出間隔	100ms
予測アントによるフェロモンの制御量を決定するパラメータ p	0.005 ~ 0.1
増加傾向 e の変更量を決定するパラメータ β	0.2



シミュレーション結果

- 予測機構の導入により、経路の再構築時間が短縮
 - 経路の再構築に要するオーバーヘッドも減少か、AntNet とほぼ同等
 - 提案手法では予測アントによるオーバーヘッドが生じるものの、アント、予測アントによるフェロモンの更新結果はアント間で共有される

- パラメータの設定を厳密に行う必要性
 - 経路の構築速度と予測精度 (経路の良さ) とのトレードオフ



Chapter 2 のまとめ

- AntNet に対する予測機構を提案・導入し、経路の構築速度の向上
 - AntNet におけるフェロモンの増加傾向に着目
 - フェロモンの増加傾向が経路の良さを示す
 - 予測アントを新たに導入し、隣接ノードにおけるフェロモンの増加傾向を調査、フェロモンが増加傾向にあるノードに対するフェロモンを増加させる
- シミュレーションにより、提案手法と AntNet を比較評価
 - 予測機構の導入により、経路の構築速度向上
 - 予測アントの導入により、単位時間あたりのオーバーヘッドは増加するが、フェロモンの更新結果がセッション間で共有できるため、経路の構築に必要な制御オーバーヘッドもほとんどの場合 AntNet より小さい
 - 一方で、パラメータの設定を厳密に行う必要がある

Chapter 3 Website vulnerability scanning detection inspired by biological adaptation toward diversifying communication services

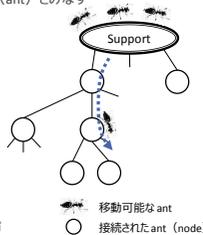
1. Naomi Kure, Shu Ishikura, Takeshi Yagi, Daiki Chiba, and Masayuki Murata, "Crawler Classification using Ant-based Clustering Scheme," in Proceedings of International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST-2015), December 2015.
2. Naomi Kure, Shu Ishikura, Takeshi Yagi, Daiki Chiba, and Masayuki Murata, "Website vulnerability scanning detection inspired by biological adaptation toward diversifying communication services," Computer Security Symposium 2015 (CSS 2015), October 2015 (in Japanese).

Chapter 3 の目的

- 局所的な相互作用のみに基づく自己組織型の制御を導入、その特性と有用性を示す
- 自己組織型のクラスタリング手法である AntTree をクローラ識別に適用、Web サイトのせい弱性発見への適用可能性を明らかにする
 - 実データを用いた評価を通して、AntTree により多様なデータを高い精度で分類可能なことを示す

アリの行動に着想を得たクラスタリング手法

- AntTree [72]
- アリの行動に着想を得た教師なしクラスタリング手法
 - アリを模したデータが互いに類似度に基づいて木構造を構築
 - データの一つ一つをモバイルエージェント (ant) とみなす
- 自己組織的に木構造の構築
 1. 初期状態では、全てのアントが木構造の根 (support) 上に存在
 2. Support から ant が一つずつ移動を開始し局所情報を用いて木構造上を移動しながら自身と類似する ant (ノード) を探索
 3. 類似するノードに到達すると、ant はそのノードの子となり、移動を終了
 - 移動中の ant がノードとなり、移動を終了すると support 上の ant が一つ移動を開始



[72] H. Azzag, N. Monmarche, M. Slimane, and G. Venturini, "AntTree: a new model for clustering with artificial ants," in Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2003), vol. 4, Dec. 2003, pp. 2642-2647.

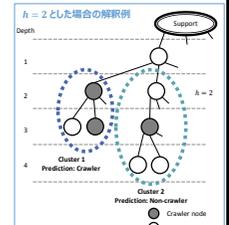
AntTree のクローラ識別への適用

- 収集した HTTP 通信ログからクローラとの通信ログを識別
- Ant a_i と a_j との類似度 $Sim(a_i, a_j)$
 - Ant a_i は M 個の特徴量からなる特徴ベクトル $\{v_{i_1}, \dots, v_{i_M}\}$ を持つ
 - 特徴量は収集した HTTP 通信ログから抽出

$$Sim(a_i, a_j) = 1 - \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (v_{i_k} - v_{j_k})^2}$$

Ant a_i と a_j の特徴ベクトル空間上のユークリッド距離

- クラスタの解釈
 - 構築されたツリーにおいて、深さ h のノードを根とした部分木を一つのクラスタとみなす
 - 各クラスタをそのクラスタに属する最多のノード種別 (クローラ or 非クローラ) へと分類する



評価実験

- 生物の仕組みに着想を得たクラスタリング手法 AntTree によるクローラ識別の精度について評価
- 比較対象
 - 有名クローラ (Google) の特徴からその他のクローラを行う従来手法 [2]
 - 学習アルゴリズムとして、Random Forest (教師あり学習) を用いる
- 使用データ
 - ハニーポット [81] 37 台より、2013 年 8 月 29 日～2014 年 1 月 14 日の期間に収集した HTTP 通信を解析した際のログ
- 評価指標
 - 再現率：同一ラベルを付加されたデータの内、正しく分類されたデータの割合
 - 適合率：同一カテゴリへ分類されたデータの内、正しく分類されたデータの割合

$$\text{再現率} = \frac{|L_A \cap C_A|}{|C_A|}, \quad \text{適合率} = \frac{|L_A \cap C_A|}{|L_A|}$$

L_A : ラベル A を付加されたデータの集合
 C_A : カテゴリ A へと分類されたデータの集合

[2] J. P. John, F. Yu, Y. Xie, A. Krishnamurthy, and M. Abadi, "Heat-seeking honeypots: Design and experience," in Proc. of the 20th International Conf. on World Wide Web, Mar. 2011, pp. 207-216.
 [81] T. Yagi, N. Tanimoto, and T. Hariu, "Intelligent high-interaction web honeypots based on URL conversion scheme," IEICE transactions on communications, vol. 94, no. 5, pp. 1339-1347, May 2011.

評価結果

<パラメータ設定>
 木構造の深さ $h=5$ 、クラスタ解釈時の深さ $h=3$
 類似度、非類似度閾値更新時のパラメータ $(\alpha_1, \alpha_2): (0.95, 0.2)$

- AntTree により従来手法と比較し高い精度での識別が可能
- 特定の特徴に依存せず、多様なデータの識別を達成
- データの数が多くなるほど、識別に長い時間が必要
 - ツリー構造が大きくなり、ant の探索範囲が広がる

		予測		再現率
		Crawler	Non-Crawler	
ラベル	Crawler	1,241,437	260,817	82.64%
	Non-Crawler	105,952	1,396,302	92.95%
	適合率	92.14%	84.26%	
AntTree				
		予測		再現率
		Crawler	Non-Crawler	
ラベル	Crawler	1,259,976	242,278	83.87%
	Non-Crawler	76,417	1,425,837	94.91%
	適合率	94.28%	85.48%	

Chapter 3 のまとめ

- アリの行動に着想を得たクラスタリング手法をクローラ識別に適用し、多様なデータの分類を高精度で行う
 - AntTree
 - アリを模したデータ同士が局所情報に基づいて互いに連結を行うことにより木構造を構築
 - シミュレーションによる評価
 - 特定の特徴のみに着目した従来の手法と比較して高い制度での識別が可能になった
 - 特に、AntTree ではサイズの小さなクラスターの識別が行われる傾向にある
 - データ全体としての特徴の重要度にかかわらず識別が可能 → 多様なデータ群を高精度で識別することが可能、通信の傾向の変化に対しても適応が可能になると期待
 - 一方で、識別対象となるデータの数が多くなるほど、識別に時間を要する
 - ツリー構造が大きくなり、アリの探索範囲が広がる

Chapter 4 Controlling large-scale self-organized networks with lightweight cost for fast adaptation to changing environment

1. Naomi Kuz, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, and Masayuki Murata, "Controlling large-scale self-organized networks with lightweight cost for fast adaptation to changing environments," to appear in ACM Transaction on Autonomous and Adaptive Systems, 2015.
2. Naomi Kuz, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, and Masayuki Murata, "Enhancing convergence with optimal feedback for controlled self-organizing network," in Proceedings of The 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall), pp. 1-7, September 2014.
3. Naomi Kuz, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, and Masayuki Murata, "Robustness of potential-based routing with model predictive control," Technical Report of IEICE (IN2013-195), vol. 113, no. 473, pp. 305-310, March 2014 (in Japanese).
4. Naomi Kuz, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, and Masayuki Murata, "Potential-based routing with optimal feedback using reduced-order model for controlled self-organizing networks," Technical Report of IEICE (IN2014-33), vol. 114, no. 139, pp. 13-18, July 2014 (in Japanese).

Chapter 4 の目的

- 外部コントローラによる管理機構の導入により自己組織型の制御の有用性を向上
 - 収束速度の向上のためにシステムの観測、制御を行う外部コントローラを自己組織型システムに導入
 - 自己組織型システムであるポテンシャルルーティングを対象とする
 - 制御機構の導入により、ポテンシャルの収束速度が向上することを示す

ポテンシャルルーティング [67]

- 無線センサネットワークを対象とした自己組織型の経路制御手法
 - ノードはパケットの経路を決定するポテンシャル (スカラー値) を保持
 - シンクノードに近いノードほど小さなポテンシャル値が割り当てられる

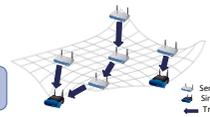
ノード n のポテンシャル $\theta_n(t)$ の更新

$$\theta_n(t+1) = \underbrace{(\alpha + 1)\theta_n(t) - \alpha\theta_n(t-1)}_{\text{ノード } n \text{ のポテンシャル値}} + \beta\sigma \sum_{k \in \mathcal{N}(n)} \underbrace{\{\theta_k(t) - \theta_n(t)\}}_{\text{隣接ノードとのポテンシャル値の差}} + \beta\alpha f_n(t)$$

ノード n のフロー量

α : Parameter that determines the weight of the past potential value
 β : Parameter that determines the weight of flows
 $\mathcal{N}(n)$: The set of neighbor nodes of node n

- “ポテンシャルの小さい隣接ノードへとデータパケットを転送する”ことでデータパケットがシンクノードへ到達可能

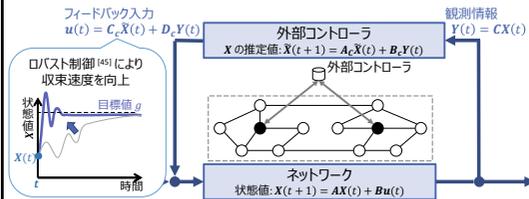


ポテンシャルの収束にはポテンシャルの更新を数多く繰り返す必要がある

[67] D. Kominami, M. Sugano, M. Murata, and T. Hatachi, "Controlled and self-organized routing for large-scale wireless sensor networks," ACM Transactions on Sensor Networks, vol.10, no.1, pp.13:1-13:27, Nov. 2013.

外部コントローラによる最適フィードバック [45]

- 外部コントローラ
 1. シンクノードを介して、ネットワーク上の一部のノードのポテンシャル情報を収集
 2. 収集した情報からネットワーク全体のポテンシャル情報を推定
 3. 収束速度を向上させるような制御入力を計算、フィードバック



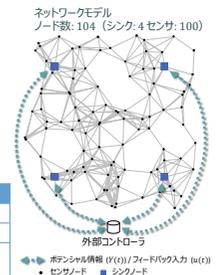
[45] K. Zhou, J. C. Doyle, K. Glover et al., Robust and optimal control. New Jersey: Prentice Hall, Aug. 1995.

シミュレーション設定

- トラフィック変動後のポテンシャルの適応速度について評価
 - 外部コントローラは、シンクノードを介して観測、制御
 - 外部コントローラ - シンク間には有線で接続
 - 比較対象:
 - コントローラによる制御を行わない場合

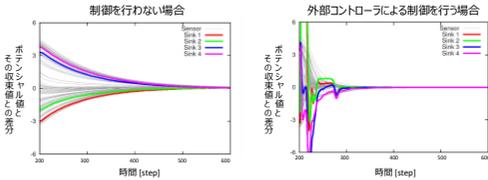
- 評価シナリオ
 1. 時刻 200 step に各センサノードにおけるフロー量を変化
 2. フロー量を変化させたときのポテンシャル場再構築について評価

パラメータ	値
ポテンシャル更新間隔	1 step
コントローラによる制御間隔	1 step
ポテンシャルルーティングのパラメータ (α, β, σ)	(0.4, 0.2, 0.1)



ポテンシャルの変化

- 外部コントローラによる制御を導入することにより、ポテンシャルの収束速度が約 6.0 倍に向上
- 外部コントローラはネットワークの情報全てを直接収集する訳ではない
- 外部コントローラの収集する情報には誤差が生じる
 - 遅延やパケットドロップなど



Chapter 4 のまとめ

- 自己組織化制御に外部コントローラによる制御を導入することで、収束速度の向上
 - ポテンシャルルーティングを対象として、制御を導入
 - 外部コントローラは、シンクノードを介してネットワーク上の一部のポテンシャル情報を収集し、収集した情報に基づいて全体のポテンシャル情報を推定
 - 収束速度を向上させるような制御入力力を計算してフィードバック
 - シミュレーションにより、提案手法とポテンシャルルーティングとを評価
 - 制御の導入により、ポテンシャルの収束速度が大きく向上

Chapter 5 Hierarchical optimal control method for controlling large-scale networks

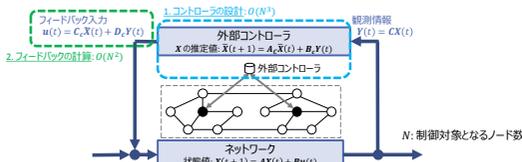
1. Naomi Kuroe, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, and Masayuki Murata, "Hierarchical optimal control method for controlling self-organized networks with lightweight cost," in Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2015), December 2015.

Chapter 5 の目的

- 外部コントローラによる管理機構の導入により自己組織型の制御の有用性を向上
 - Chapter 4 の内容を発展させ、階層型制御機構を提案・導入し、非階層型制御と同様の状態に収束が可能であることを示すとともに、計算コストについて評価を行う
 - ポテンシャルルーティングを対象とし、階層型制御機構を導入する
 - 階層型制御機構を導入することにより、計算コストを抑えつつ、ポテンシャルの収束速度の向上が達成可能なことを示す

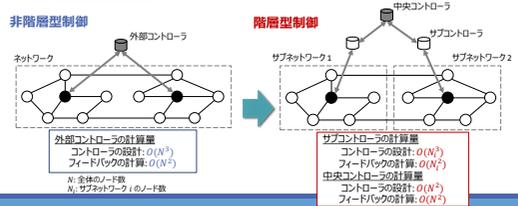
一つの外部コントローラによる制御の問題点

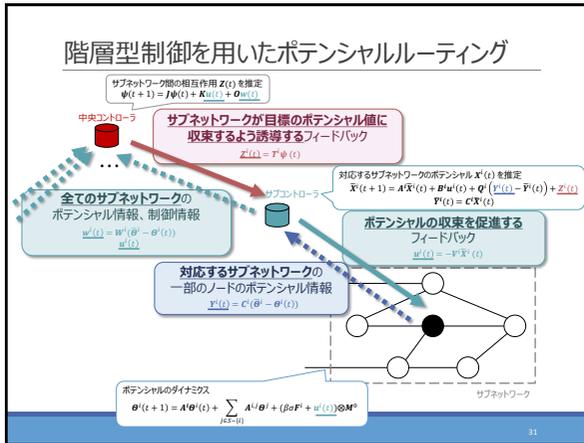
- ネットワーク全体の情報を収集、管理するためのオーバーヘッドが非常に大きくなる
 - コントローラ的设计 (設計パラメータの計算) : $O(N^3)$
 - トポロジ、フロー量に変化が生じると再計算
 - 設計パラメータはトポロジ、フロー量に依存
 - フィードバックの計算: $O(N^2)$
 - 制御間隔ごとに計算を行い、ネットワークに対してフィードバック制御



階層型制御の導入

- 階層型制御による計算コストの低減
 - ネットワークの分割: ネットワークを S 個のサブネットワークに分割
 - コントローラの役割を分割:
 - S 個のサブコントローラが対応するサブネットワークを観測、制御
 - 計算コストの削減
 - 中央コントローラがサブネットワーク間の相互作用を観測、制御

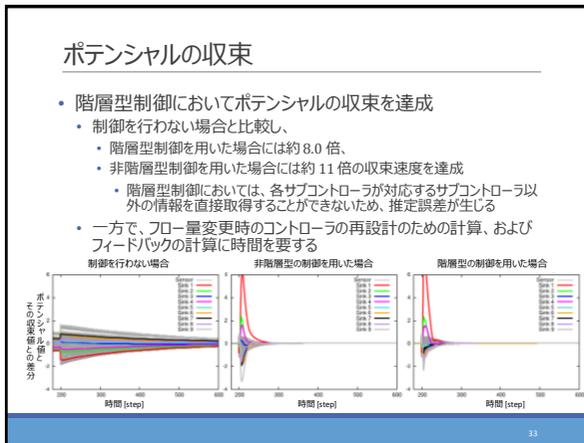




シミュレーション評価

- 階層型制御導入時のポテンシャルの挙動、計算コストを評価
 - ネットワークは9個のサブネットワークに分割
 - 各サブネットワークは、シンクノードを介してサブコントローラにより観測、制御
 - サブコントローラ、シンク、サブコントローラ、中央コントローラ間は有線で接続
 - 比較対象：
 - コントローラによる制御を行わない場合
 - 一つの外部コントローラによる非階層型制御を行う場合
- 評価シナリオ
 - 時刻 200 step に各センサノードにおけるフロー量を変化させ、ポテンシャル場再構築を評価

パラメータ	値
ポテンシャルの更新間隔	1 step
中央、サブコントローラによる制御間隔	1 step
ポテンシャルルーティングのパラメータ (α, β, σ)	(0.4, 0.2, 0.1)



計算時間の計測

- 階層型制御を導入することで、非階層型制御と比較して、計算時間を大幅に短縮
- ネットワーク全体のノード数 $N >$ サブネットワーク i のノード数 N^i であるため $O(N^3)$ 、 $O(N^2) \gg O(N^2)$ 、 $O(N^2)$

手法	コントローラの種類	計算時間 [sec]	
		コントローラ設計	フィードバック入力の計算
制御なし	-	0	0
非階層型制御	外部コントローラ	6.4×10^3	6.3×10^{-5}
	中央コントローラ	35	3.8×10^{-5}
階層型制御	サブコントローラ	0.089	3.9×10^{-6}

Chapter 5 のまとめ

- Chapter 4 の内容を発展させ、階層型の制御手法を提案、導入し、低い計算コストで収束速度の向上を達成
- 制御の階層化によるコストの低減
 - ネットワークを複数のサブネットワークに分割
 - 外部コントローラの役割を複数のコントローラに分割
 - サブコントローラ: 対応するサブネットワークの制御
 - 中央コントローラ: サブネットワーク間の相互作用を管理
- シミュレーションにより、階層型制御、非階層型制御、制御なしの場合を比較評価
 - 制御の階層化により、コントローラの役割が分割されているにもかかわらず、所望のポテンシャル場への収束を達成
 - ネットワークの分割とそれに伴う各コントローラの制御範囲の縮小により、計算コストを大幅に削減しつつ、非階層型に近い収束速度を達成

博士論文のまとめ

- 環境適応性の高い生物の仕組みに着想を得た管理型自己組織化制御について検討
 - 局所的な相互作用のみからなる自己組織化制御について、その特性と有用性を調査
 - 外部コントローラによる制御を導入してネットワークの状態を観測、推定し、フィードバックを与えることで、自己組織化制御の有用性を向上