

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26730048

研究課題名(和文)モデル予測制御を用いた管理型自己組織的ネットワークに関する研究

研究課題名(英文)Controlled self-organizing networks with model prediction control

## 研究代表者

小南 大智(Kominami, Daichi)

大阪大学・経済学研究科・助教

研究者番号：00709678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、ネットワークシステムへのモデル予測制御の導入により、環境変動に対するネットワークシステムの収束性向上を図った。本研究課題では、ポテンシャルに基づく自己組織型経路制御による情報収集センサーネットワークシステムを対象とした。この経路制御手法では個々のノードが局所情報を元に自身のポテンシャルを計算し、計算の収束に時間を要することがわかっている。一部のノードに対して外部ノードから制御入力を与えることで、個々のノードの自己組織的な動作を失うことなく、すなわち、自己組織型制御の利点を失うことなく、全ノードのポテンシャル値が収束するまでの時間を大きく短縮できた。

研究成果の概要(英文)：In this research, we introduced the model predictive control into network systems to improve their convergence performance against environmental changes. In this research, we focused on sensor network systems for collecting environmental information with potential-based routing that is one of self-organizing routing methods. In this routing method, it is known that each node calculates its own potential value based on local information and it takes much time to converge the calculation. By giving an optimal control input from an external controller to a part of nodes, the calculation time for potential of all nodes can be greatly reduced without losing the advantages of self-organizing method.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：センサーネットワーク 自己組織型制御 最適制御

### 1. 研究開始当初の背景

これまでの通信ネットワークシステムの多くは集中制御型をその動作原理としていた。分散指向とよく説明されるインターネットも例外ではなく、その実は集中型の制御を動作原理としている。すなわち、サーバを中心としたサービスシステム、ルータがそれぞれ全体のトポロジーイメージを持って最適経路を探索する経路制御、などの多くの例がその事実を示している。その結果、管理の複雑さや脆弱さを生み出しており、特に近年、急速に大規模化・複雑化が進むにつれ、インターネットは近い将来破綻をもたらすことが指摘されている。ネットワークシステムの持続的発展に重要な技術的特性として、適応性、スケーラビリティ、耐故障性が挙げられる。それらを獲得したネットワークの設計指針として、システムの個々の要素が自律分散的に動作し、その局所的情報交換によって全体として望ましい制御が実現される(創発と呼ばれる)自己組織化制御が注目されている。

### 2. 研究の目的

自己組織化制御が本質的に抱える問題として、局所的な決定に基づいて全体の機能を創発するというボトムアップな設計原理であるため、特にネットワークの規模が大きくなったときに、ネットワーク全体が望ましい形で動作すること、すなわち機能創発していることを保証できない、大域的な最適性が保証できない、収束までの時間が非常に長い、という点がある。これらの問題を解決することによって、自己組織化制御そのものの仕組みをさらに発展させ、新たな枠組みを与えることが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

申請者はこれまでに、自己組織化制御に対して外部からゆるやかな制約を与えることで、自己組織化制御によって生ずる意図しないシステム変化を防ぎ、ネットワークの望ましい機能を実現する、管理型自己組織化制御の概念を提案した。無線センサーネットワークを対象として、管理ノード(control node)の導入により機能創発をコントロールし、さらに局所的な最適化と管理制御に基づく大域的な最適化を組み合わせることで、システム全体を最適な状態に近づける制御を実現する手法について成果をあげることができた。本研究課題では、予測機構を自己組織化制御システムに組み込むことで、収束速度の問題を解決する。無線センサーネットワークにおける自己組織型経路制御手法を対象として、モデルベースの予測機構を導入し、特に収束性に注目してシステムの特性を明らかにする。

### 4. 研究成果

(1) 自己組織型システムとして、ポテンシャルを用いた経路制御手法によって観測情報の収集を行う無線センサーネットワークシステムを対象とした。ネットワーク内の各ノードにおけるポテンシャル更新は、自身の直前のポテンシャル値とフロー生成量、通信範囲内に存在するノードの持つポテンシャル値の線形結合で表される。そのため、ネットワークシステムのダイナミクスは線形であり、システム制御の分野における知見が適用可能である点に着目した。各ノードのダイナミクスについて既知とした外部コントローラをネットワークに接続し、各ノードは自身の現時点のポテンシャルを外部コントローラに伝える。外部コントローラは取得した情報をもとに、ネットワーク内の一部のノードに対してのみ入力を与える。入力を得たノードは自身のポテンシャルの計算時に入力値を加算する。このように一部のノードに入力を与えることで、ネットワーク全体としてのポテンシャル計算の収束速度を大幅に短縮できることを示した(図1)。

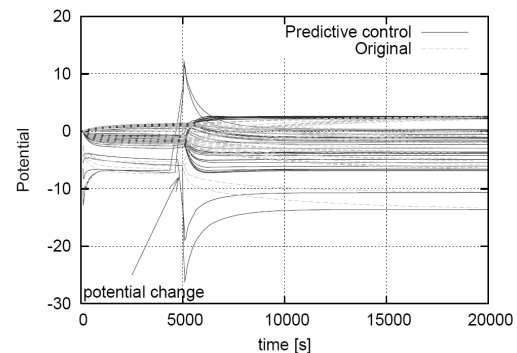


図1：収束速度の向上

(2) (1)では収束速度の向上を示したが、2点の問題が残っていた。一つは情報収集のコストであり、外部コントローラに対してすべてのノードから現時点のポテンシャル情報が送られるため、情報収集時間の増加、トラフィックの増加という問題が生じた。もう一つは外部コントローラによる入力計算に要する時間である。入力の計算は、H<sub>2</sub>制御理論に基づき行った。この際の計算量はノード数の三乗のオーダーであることが知られており、ノード数の増加とともに実用的な時間内で計算が終了しない問題が生じた。一点目の問題を解決するために、情報収集を行う範囲をネットワークの一部のノードに制限した。外部コントローラではノード間の接続関係を既知としているため、このような観測制限下においても、最適な入力を計算することが可能であり、この制限下でも収束速度の短縮が可能であることを示した。外部コントローラにおける計算時間の短縮については、外

部コントローラが内部に持つ、ネットワークシステムのモデルを低次元化することで解決を図った。平衡化打ち切り法を用いることで、設計者の与えた定数値の次元にまでネットワークシステムの内部モデルの次元を縮約することが可能である。当然ながら、元の次元に対してより少ない次元にするほど、最適な入力からの誤差が増加することになる（図2）。

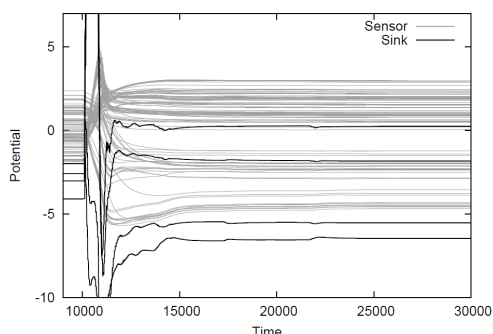


図2：低次元化による誤差の影響

(3) 情報収集コストおよび計算量のさらなる削減のために、ネットワークシステムを階層化した方式を提案した。まず、全体ネットワークをサブネットワークに分割し、それぞれのサブネットワークに対して一つのサブ管理ノードを設置する、管理ノードの分散化を行った（図3）。このとき、完全な分散化では、それぞれのサブネットワークが自身の最適化を目指して動作するため、システム全体の最適性は保証されない点が問題となる。そこで、サブ管理ノードの上位に全体を管理するノードを設置し、このノードがサブネットワーク同士をつなぐリンクによる、サブネットワーク間の相互の影響を管理することとした。全体管理ノードはサブ管理ノードにのみ、サブネットワーク間の影響を考慮した入力を与える。サブネットワークはこの入力および、自身が管理するサブネットワークから得た情報に基づき、サブネットワークへの入力を決定する。この手法によって、大規模なネットワークシステムに対しても、本提案手法の適用が可能となった。

(4) 以上の成果は評価の高い学術論文誌に掲載された（5.の雑誌論文 および現在同雑誌に関連論文を一本投稿中）。これは、申請者らが申請時に認識したとおり、本研究課題が既存ネットワークシステムの重要な問題であり、その解決が非常に重要であることが、国際的にも同様に認識されていることであると考えている。本研究課題における成果としては、線形システムへの外部コントローラの適用で終えることとなったが、非線形ダイナミクスによって動作するネットワークシステムを考慮することも重要であると考えている。

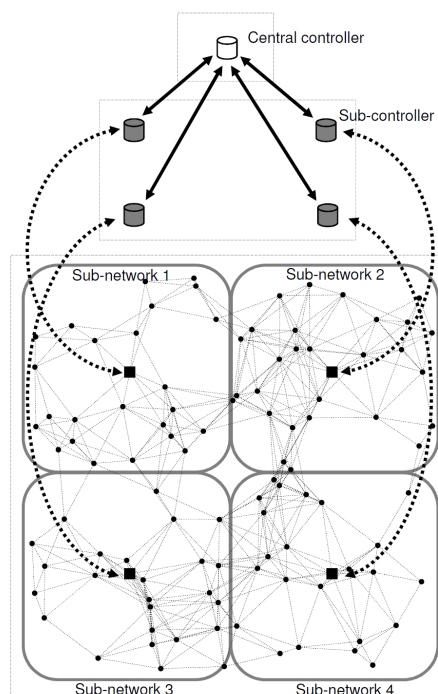


図3：自己組織型ネットワークの階層型管理

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計1件)

Naomi Kuze, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, and Masayuki Murata, "Controlling large-scale self-organized networks with lightweight cost for fast adaptation to changing environments," ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, Volume 11 Issue 2, July 2016 (査読有)。

〔学会発表〕(計4件)

Naomi Kuze, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, and Masayuki Murata, "Hierarchical optimal control method for controlling self-organized networks with light-weight cost," in Proceedings of the 2015 IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM), pp. 1-7, 7 December 2015 (San Diego, CA, USA).

Naomi Kuze, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, and Masayuki Murata, "Enhancing convergence with optimal feedback for controlled self-organizing networks," in Proceedings of the IEEE 80th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC 2014-fall), pp. 1-7, 17 September 2014 (Vancouver, Canada).

Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, and Masayuki Murata, "Enhancing adaptability of self-organizing

network systems," Technical Report of IEICE (IN2014-77), vol. 114, no. 253, pp. 19-24, 16 October 2014 (Osaka University, Osaka).

Naomi Kuze, 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 (IN2014-32), vol. 114, no. 139, pp. 7-12, 17 July 2014 (Hokkaido University, Sapporo).

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

小南大智 (KOMINAMI, Daichi)

大阪大学 経済学研究科・助教

研究者番号 : 00709678