

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22300023

研究課題名（和文） 情報ネットワーク社会を支える自己組織型協調制御技術の創出

研究課題名（英文） Self-organizing network architecture for large-scale information networks

研究代表者

若宮 直紀 (Naoki Wakamiya)

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：50283742

研究成果の概要（和文）：

サービスの高度化やネットワークの発展を許容する柔軟性を持った情報ネットワークの構築を目的として、ノードやネットワークなどネットワークシステムの全ての構成要素が、局所的な情報にもとづいて制御や振る舞いを決定し、さらにそれらの階層間、階層内の相互作用によって、ネットワークシステム全体の機能が生み出される自己組織的なネットワークアーキテクチャを創出し、計算機シミュレーションにより有用性を示した。

研究成果の概要（英文）：

We developed self-organizing network architecture that has the flexibility to allow the evolution and progress of network services and network applications. In our architecture, all components of the network system and network node, determine the behavior and control based on local information. We investigated and examined the way of hierarchical control with the local information, and showed effectiveness by computer simulations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2011年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2012年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：情報ネットワーク

科研費の分科・細目：

キーワード：情報ネットワーク、自己組織化制御、ネットワーク制御、生物ダイナミクス、協調制御、ネットワーク推定、適応制御、論理ネットワーク制御

1. 研究開始当初の背景

インターネットの普及を背景に、様々なサービスやシステムがインターネットを基盤として構築されている。近年、情報通信サービ

スの品質を高めるための様々な試みや研究開発により情報通信サービスがより高度化しているが、その一方で管理の複雑さや脆弱さなどの限界も指摘されつつある。しかしながら、従来の情報通信ネットワークの研究開

発においては、伝送速度などの工学的な性能指標の向上や、パケット配送遅延やスループットなどの性能指標の向上が広く考えられてきた。ネットワーク環境（動作・運用条件、機器構成、利用形態、障害など）はますます大規模化・複雑化・多様化しており、従来のネットワークの研究開発で目標とされてきた性能指標を単に向上するだけでなく、情報ネットワーク社会への導入を見据え、柔軟性、拡張性、管理容易性に優れたネットワークの構築が重要視されつつある。

我々は、これまでに生物の自己組織化のメカニズムに学んだ自己組織型のネットワークアーキテクチャを提示し、局所情報にもとづいて自律制御するノードが局所的に相互作用することによってネットワークを自己組織化することで、従来のネットワーク制御手法では達成できなかったトラフィック変動に対する柔軟性や障害に対する頑健性の性能向上について成果を挙げた。

しかし、情報ネットワーク社会においては、ユーザ数の増加やユーザ要求に応えるサービスやアプリケーションもますます多様化・高度化していくと考えられる。従って、サービスを実現する制御ネットワークの多様性およびそれらの調和が不可欠であり、かつ、サービスの高度化やネットワークの発展を許容する柔軟性を持った情報ネットワークの構築が極めて重要となる。

2. 研究の目的

これまでに取り組んできた柔軟性・頑健性を有する自己組織型のネットワーク制御技術を更に発展させ、ネットワークの拡張性、管理容易性を実現する情報ネットワークを構築することを目的とする。具体的には、ノードおよびネットワークが階層的かつ自己組織的に協調動作し拡張性の向上するエンティティ協調制御手法、および、さらには、様々なレイヤのネットワーク制御手法が自己組織的に協調することで新たなサービスを創発するエマージェント制御手法を確立し、上記目的を達成する。

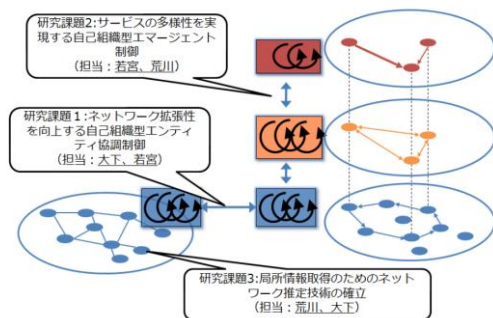


図 1: 研究課題一覧、研究の方法

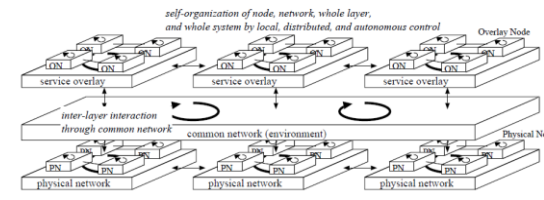
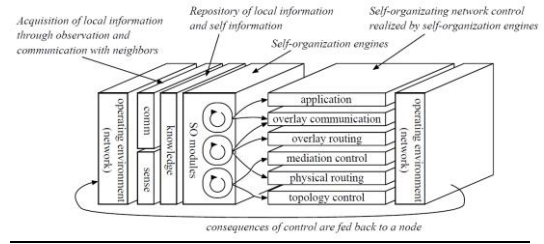


図 2: 自己組織的なネットワークアーキテクチャ：ノード構成（上図）とネットワーク構成（下図）

3. 研究の方法

生物の自己組織化のメカニズムに学んだ自己組織型ネットワーク制御技術を発展させ、垂直レイヤ間協調および水平レイヤ間協調を実現する自己組織型ネットワーク制御手法に関する研究を推進する。具体的には、以下の3つの研究課題を設定する。

- ・ ネットワーク拡張性を向上する自己組織型エンティティ協調制御
- ・ サービスの多様性を実現する自己組織型エマージェント制御
- ・ 局所情報取得のためのネットワーク推定技術の確立

4. 研究成果

研究課題1：ネットワーク拡張性を向上する自己組織型エンティティ協調制御

本課題では、サービスを所望するノード群が自己組織的に協調してネットワークを構築し、更に、ネットワーク群が自己組織的に協調してエンティティを構築するという階層型の制御構造を有する制御技術を提案し、その有用性を示した。

自己組織型エンティティ協調制御では、エンティティ（ノード、ネットワークを含む）が階層的かつ自己組織的に協調動作することで、小規模な環境変動はその影響を直接受けるエンティティ周辺での局所的な適応によって、また、大規模な環境変動に対しては上位エンティティと下位エンティティ間の相互作用によって階層全体に伝播する制御の連鎖によって適応することで、環境変動に対する柔軟性・頑健性を備えつつ、ネットワークの拡張性を達成する。

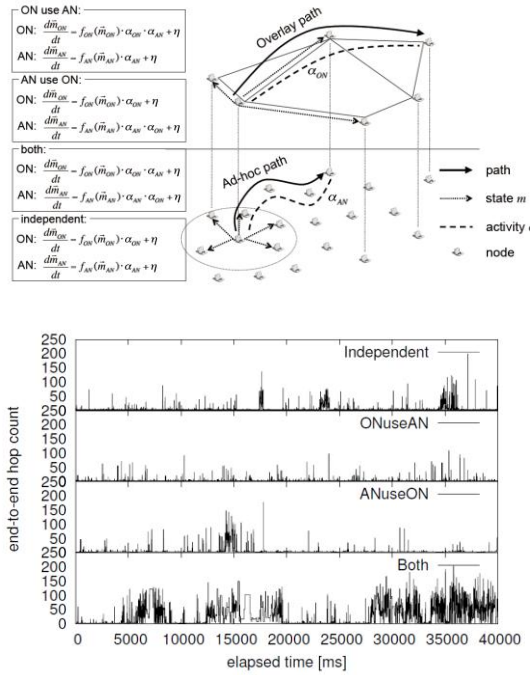


図 3: 階層型制御による経路制御機構の性能評価。階層制御機構の概要図（上図）とエンド間ホップ長の時間推移（下図）

まず、ノードやネットワークなどネットワークシステムの全ての構成要素が、周囲の観測や近隣要素との情報交換によって得られる局所的な情報にもとづいて制御や振る舞いを決定し、さらにそれらの階層間、階層内の相互作用によって、ネットワークシステム全体の機能が生み出される自己組織的なネットワークアーキテクチャを考案した(図2)。これは、自己組織的なネットワーク制御の基本原則としては、特に生物学を中心とした他の学術領域において得られている自己組織化に関する知見を応用し、非線形数理モデルにもとづいた制御機構を提案している。次に、このネットワークアーキテクチャの一例として階層型経路制御を対象とし、制御の評価値(通信品質など)を階層間で共有することの効果を検証した。シミュレーションの結果、下位層制御が上位層制御の評価値を加味することにより、ノード故障に対して通信遅延の小さい経路に短い時間で回復できるなどの効果が得られることを明らかにした(図3)。

研究課題2: サービスの多様性を実現する自己組織型エマージェント制御

本課題では、所望のサービスを実現するための輻輳制御、経路制御、トポロジー制御のそれぞれが、自己組織的に協調することで新たなサービスを創発するエマージェント制御

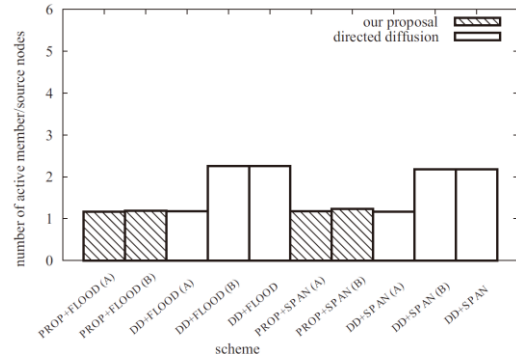


図 4: 反応閾値モデルを用いたデバイス提供手法。提案手法 (PROP) により、サービス提供に必要な端末を効率的に選出している

手法を提案し、その応用例を示した。

研究課題1で述べた自己組織的なネットワークアーキテクチャにもとづく無線センサーネットワークを対象とし、周囲の観測や近隣端末との情報交換から得られる局所情報、さらには随時発生するサービス要求に応じたネットワークを動的に構成するために、具備するデバイスや稼働状況を考慮して、その場で利用可能な端末の中からサービス要求を満たす適切なものが選出される機構として、社会性昆虫における分業の仕組みの数理モデルである、反応閾値モデルを用いて端末自身が自律分散的にサービスヘドデバイス提供を判断する手法を提案し、シミュレーション評価により、複数のサービス間で端末が共有される効率的な端末の選出が可能であることを確認した。また、各種パラメータを2倍程度誤って設定しても大きな影響を受けないことを確認した。さらに、反応閾値モデルの特性解析を行い、メッセージ欠損に対する耐性が高いことを明らかにした(図4)。

研究課題3: 局所情報取得のためのネットワーク推定技術の確立

本課題では、エンティティが直接観測可能なネットワーク環境の情報を用いて自己組織型制御に必要な情報を推定するネットワーク推定技術を提案した。

局所情報取得のためのネットワーク推定技術について、リンク負荷などの一部の測定情報から対地間トラフィック量を推定するトラフィックマトリクス推定手法として、ネットワークの一部のノードを選択し、選択されたノードから収集したトラフィック情報のみから全リンクのトラフィック量を推定することにより、トラフィック情報収集負荷を削減する手法を提案した。評価結果より、全ノードのうちの30%のノードから収集したトラフィック

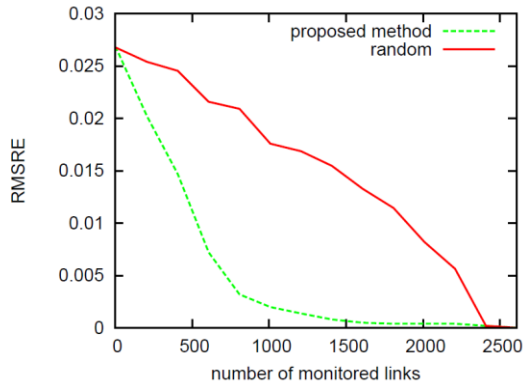


図 5: トラヒック量推定手法: 観測点の数に対する誤差率 (RMSRE)

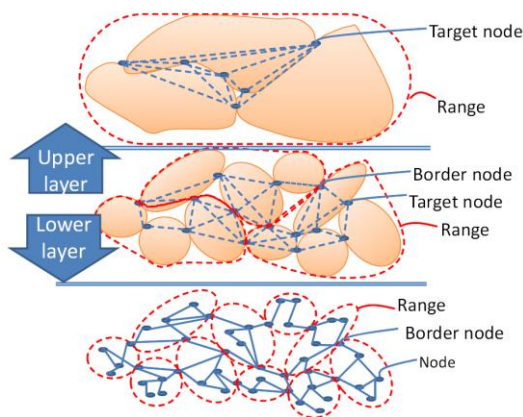


図 6: 集約された制御情報にもとづく経路制御

情報から提案手法によって推定されたリンク使用率を用いることにより、トラヒック変動によって発生した輻輳を解消するような仮想ネットワーク再構成が可能であることが明らかになった (図 5)。

次に、大規模ネットワークにおいて分単位の短いタイムスケールで生じるトラヒック変動にも対応し、輻輳を回避する階層型 TE 手法を提案した。提案手法では、最下位層では狭い範囲、上位層は下位層の複数の範囲を束ねたより広い範囲となるように、制御対象のネットワークを階層的に分割する。各範囲には、対応する制御サーバーを配置し、上位層および下位層の制御サーバーと集約した情報を交換することにより、自身が制御する対象の範囲内のトラヒック状況を把握する (図 6)。

トラヒック情報の集約方法と集約したトラヒック情報を用いたトラヒックエンジニアリング手法に関する研究に取り組み、計算機シミュレーションにより、ネットワーク全体の情報を用いた制御よりも早くリンク利用度を削減することを示した。

さらに、上記の階層型トラヒック制御手法を進展させ、ネットワークを地理的に分割、階層化を行い、頻繁に行うことが可能な局所的な制御と、長い周期で行う広い範囲の制御を組み合わせる手法を提案した。上位層では集約されたトラヒック情報を交換し、下位層では制御範囲内の詳細な制御情報を交換する。シミュレーション評価により、階層化せずに全リンクの情報を用いた TE と比較して、半分以下の時間で輻輳を解消することを明らかにした。

想定される多様な全てのサービスに対して、あらかじめ個別にデバイスを配置、設定し、ネットワークを構成するのは困難かつ冗長である。本研究課題では、その場にあるデバイスを活用して柔軟にサービスを実現する自己組織型協調制御技術を提案し、その有用性を示した。本研究の成果によって、環境内に配置された多数のセンサやアクチュエータなどのデバイスによって、その時、その場、その人に応じた情報サービスや環境制御が可能となる。

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 4 件)

- N. Wakamiya, M. Murata, "Self-organized control for virtual sensor networks," IEEE Communication Society MMTC E-letter, Vol. 5, pp. 7-9, 2010.
- H. Yamamoto, N. Wakamiya, and M. Murata, "An internetworking mechanism with stepwise synchronization for wireless sensor networks," Sensors, Vol. 11, pp. 8241-8260, 2011.
- Y. Tarutani, Y. Ohsita, S. Arakawa, and M. Murata, "Optical-layer traffic engineering with link load estimation for large-scale optical networks," IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 4, pp. 38-52, 2012.
- T. Iwai, N. Wakamiya, M. Murata, "Response Threshold Model-Based Device Assignment for Cooperative Resource Sharing in a WSN," in Proceedings of International Journal of Swarm Intelligence and Evolutionary Computation, Vol. 1, 2012.

[学会発表] (計9件)

- ・ 若宮 直紀, “生物の頑強性, 自律性に着想を得た情報ネットワークアーキテクチャ,” 第23回情報伝送と信号処理ワークショップ (石川県, 2010年11月10日) .
- ・ Y. Tarutani, Y. Ohsita, S. Arakawa, M. Murata, “Estimation of Traffic Amounts on All Links by Using the Information From a Subset of Nodes,” in Proceedings of the Second International Conference on Emerging Network Intelligence, Oct. 2010. (Italy)
- ・ Y. Minami, Y. Koizumi, S. Arakawa, T. Miyamura, et al, “Adaptive virtual network topology control in WDM-based optical networks,” in Proceedings of International Conference on Evolving Internet (INTERNET2010), Sep. 2010. (Spain)
- ・ N. Wakamiya and M. Murata, “Autonomous and adaptive wireless networking with bio-inspired algorithms,” in Proceedings of International Workshop on Assurance in Distributed Systems and Networks, June 29, 2011. (Hyogo, Japan) (招待講演)
- ・ T. Iwai, N. Wakamiya and M. Murata, “Proposal for dynamic organization of service networks over a wireless sensor and actuator network,” in Proceedings of International Conference on Ambient Systems, networks and Technologies, Sep. 11, 2011. (Ontario, Canada)
- ・ H. Yamamoto, N. Wakamiya, and M. Murata, “Study on interaction between layered self-organization based control,” International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL), Oct. 26, 2011. (Barcelona, Spain)
- ・ Y. Ohsita, T. Miyamura, S. Arakawa, K. Shiimoto and M. Murata, “Hierarchical dynamic traffic engineering considering the upper bounds of link utilizations,” in Proceedings of IEEE GLOBECOM, Dec. 5, 2011. (Houston, USA)
- ・ M. Waki, N. Wakamiya, M. Murata, “Proposal and evaluation of attractor perturbation-based rate control for stable end-to-end

Delay,” in Proceedings of the International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems (BIONETICS 2012), Dec. 10, 2012. (Switzerland)

- ・ T. Tanabe, N. Wakamiya, M. Murata, “Comparative evaluation of information dissemination methods for effective and efficient information sharing in wireless sensor networks,” in Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies, Oct. 5, 2012 (Santiago)

[図書] (計1件)

- ・ N. Wakamiya, K. Leibnitz, M. Murata, A Self-Organizing Architecture for Scalable, Adaptive, and Robust Networking, Book chapter in Autonomic Network Management Principles: From concepts to Applications, Elsevier 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若宮直紀 (Naoki Wakamiya)
大阪大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：50283742

(2) 研究分担者

荒川伸一 (Shin'ichi Arakawa)
大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号：20324741

大下裕一 (Yuichi Ohsita)
大阪大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号：80432445