

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700072

研究課題名(和文)大規模ネットワークにおけるマイクロとマクロの相互作用理解に基づいた制御設計法

研究課題名(英文) Design Framework of Network Controls Based on the Interactions between Microscopic Behavior and Macroscopic Behavior in Large-Scale Networks

研究代表者

作元 雄輔 (Sakamoto, Yusuke)

首都大学東京・システムデザイン学部・助教

研究者番号：30598785

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)：本研究は、大規模なネットワークのための制御設計法の実現を目的としている。そのために、まず、統計力学の方法に基づいて、ネットワークにおけるネットワークにおけるマイクロな挙動(ノードの制御動作)とマクロな挙動(ネットワーク全体の性質)の相互関係を理解できる数学的モデルを構築した。また、構築した数学的モデルに基づいて制御設計法の枠組みを整備した。さらに、実際のネットワーク制御に応用し、数学的モデルと制御設計法の有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to realize a framework of designing network controls for large-scale networks. First, on the basis of statistical mechanics, I built a hierarchical model to be able to understand the interaction between microscopic behavior(i.e., node control) and macroscopic behavior(i.e., property of the entire network) in large-scale networks. Then, I consolidated the framework of network controls for large-scale network on the basis of the hierarchical model. Through experiment using a network control designed by my framework, I clarified the effectiveness of the hierarchical model and the framework for large-scale networks.

研究分野：計算機システム・ネットワーク

キーワード：ネットワーク制御 制御設計 統計力学 通信工学

1. 研究開始当初の背景

情報通信技術の普及により膨大な数のノードが情報通信ネットワーク(以下、ネットワーク)に接続している。また、これらのノードが大規模なネットワーク内で互いに作用することによって、個々のノードのミクロな挙動と、ネットワーク全体のマクロな挙動が複雑化している。ネットワークの大規模化に今後も持続的に対応していくためには、ネットワークにおける複雑なミクロとマクロの相互関係を理解し、その理解に基づいたネットワーク制御が必要である。

統計力学は、膨大なミクロの自由度とマクロな大域的性質の関係性を分析するための学問として発展してきた。そのため、統計力学の手法は、大規模なネットワークにおける膨大なノードの振る舞いとネットワーク全体の振る舞いの相互関係を理解する上で役立つと考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、統計力学の手法を利用し、大規模ネットワークのための制御設計法を構築することである。そのために以下の課題に取り組む。

- (1) ミクロな挙動(ノードの制御動作)とマクロな挙動(ネットワーク全体の特性)の相互関係を記述する数学的モデルの構築
- (2) 数理モデルに基づく制御設計法の枠組みの整備
- (3) 制御設計法の有効性の検証

3. 研究の方法

まず、課題(1)の数学的モデルを構築した。ネットワークは、 N 個のノードから構成され、各ノードの状態は NS 個の状態の中から選択される。状態間には依存関係が定義されており、各ノードは、周囲のノードの情報を収集し、それらの状態との依存関係を踏まえて、自身の状態を適切に制御する。このような振る舞いに基づいて、ネットワーク全体における大域的な性能指標 $M(\mathbf{X})$ を次式で定義する。

$$M(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{X}_i} m_{ij}(x_i, x_j)$$

ここで、 x_i はノード i の状態であり、 $m_{ij}(x_i, x_j)$ はノード (i, j) 間の相互作用によって生み出される性能指標である。このような数学的モデルにおいて、ミクロの挙動とマクロの挙動の相互関係とは、個々のノードによる状態制御と大域的な性能指標 $M(\mathbf{X})$ の特性の相互関係に対応する。これらの間に理解が容易な相互関係を持たせるために、マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)を用いた。MCMCとは、統計力学的モデルにおいて、状態量(例：エネルギー)の確率分布を制御するためのシミュレーション技法であり、個々の粒子の状態変化とマクロな性質を結びつけること

に利用されている。MCMC を応用することによって、ネットワークにおけるノードの制御動作と大域的な性能指標 $M(\mathbf{X})$ の特性に相互関係を持たせられる。

また、課題2における制御設計法を構築するために、課題1の数学的モデルが持つミクロとマクロの相互関係を活用する。

さらに、課題3における制御設計法の有効性を明らかにするために、制御設計法に基づいて実際のネットワーク制御を設計し、実験を通じて動作を確認する。

4. 研究成果

課題(1)で構築した数学的モデルにおけるミクロとマクロの相互関係を明らかにした。各ノードの振る舞いは MCMC によって記述され、その際に、大域的な性能指標 M は次の確率分布で与えられることを示した。

$$p(M) = \frac{G(M) \exp[-\lambda M]}{\sum_{Y \in \Omega_M} G(Y) \exp[-\lambda Y]}$$

ここで、 $G(M)$ は大域的な性能指標が M となる状態数であり、 Ω_M は大域的な性能指標が取り得る値の集合である。また、 λ はノードが行なう制御の強さを表わすパラメータである。上記の確率分布 $p(M)$ は、統計力学で良く知られたボルツマン分布である。ボルツマン分布に従う大域的な指標 M は、統計力学での議論と同様に、次式で定義される自由エネルギー $F(M)$ によってマクロな性質を調べることができる。

$$F(M) := M - 1/\lambda \log G(M)$$

自由エネルギー $F(M)$ の最小点を調べることによって、ネットワーク全体で実現される M の値が決まる。具体的に、 M の平均値 μ は次の式で与えられることを示した。

$$\mu = \mu_G - \lambda \sigma_G^2$$

ここで、 μ_G および σ_G はランダムに状態を選択した時の M の平均値および標準偏差である。上式を見ると、ノードの制御パラメータ λ の変化によって M の平均値 μ を調整できることが分かる。そのため、提案する数学的モデルは、望ましいミクロとマクロの相互関係を有していると言える。

次に、課題(1)の数学的モデルに基づいて制御設計法の枠組みを整備した。この枠組みの中では、各ノードは MCMC に基づく制御動作によって自身の状態を調整し、ネットワーク管理者は λ と μ の関係式に基づいて大域的な制御・管理を行なう。

さらに、課題(2)で構築した制御設計法の枠組みに基づいて、データセンターネットワークの仮想計算機配置制御を設計した。データセンターネットワークにおいては、仮想計算機は他の仮想計算機と連携して 1 つのタ

スクを処理しており、仮想計算機間ではデータのやり取りが行われている。この状況下で、通信頻度の高い仮想計算機をなるべく近くの物理計算機に配置すればトラヒックをシステムの一部に集中できるが、多くの仮想計算機を近くに配置しすぎると物理計算機間での負荷分散が悪くなってしまふ。このようにトラヒック集中と負荷分散にはトレードオフの関係があり、それらの効果をうまくバランスするように仮想計算機を配置する必要がある。課題(1)の数学的モデルにおけるノードとノードの状態を、仮想計算機と配置された物理計算機にそれぞれ対応させることによって、課題(2)の制御設計法に基づく仮想計算機配置制御を構築した。この仮想計算機配置制御においては、ノード間の相互作用 $m_{ij}(x_i, x_j)$ は次式で与えられる。

$$m_{ij}(x_i, x_j) = f_{ij} d(x_i, x_j)$$

ここで、 f_{ij} は仮想計算機 (i, j) 間の通信頻度、 $d(k, l)$ は物理計算機 (k, l) 間の通信遅延である。このような m_{ij} を用いることで、通信頻度の高い仮想計算機がなるべく通信遅延の小さい物理計算機に配置される。

図 1a および 1b にノードの制御パラメータ λ を変化させた時の大域的指標 M の平均値および物理計算機の負荷の分散を示す。これらの図においては、データセンターネットワークの代表的な評価トポロジ(Tree topology, Fat-tree topology および Full-mesh topology) の結果を示している。図 1a を見ると、数学的モデルが持つミクロとマクロの相互関係の通りに、 λ を増加させることによって M の平均値を小さくできることが分かる。 M の平均値を小さくすることは、多くの仮想計算機を近くの物理計算機に配置され、トラヒック集中の実現に対応する。一方で、図 1b を見ると、 λ を増加させると、物理計算機の負荷分散が悪くなっていくことが分かる。これらの結果を踏まえると、設計した仮想計算機配置制御における λ を調整することによってトラヒック集中と負荷分散の効果をうまくバランスさせられることが示された。

また、データセンターネットワークの管理者による大域的な制御を、課題(1)の数学的モデルにおいて成立する λ と μ の関係式に基づいて設計した。データセンターネットワーク内を流れるトラヒック量は、ユーザのアクセス要求の変化によって時々刻々と変化する。そのため、このようなトラヒック量の変化に対してロバスト性を保証する大域的な制御を構築した。

図 2a と図 2b に、環境変動下において大域的な制御を用いた場合と用いない場合に、トラヒック集中の強さ $R (= M/\mu G)$ の平均値および物理計算機の負荷の標準偏差の時間変動を示す。図 2a と 2b には、参考のために、環境変動を発生させない場合の結果も示している。これらの結果を見ると、大域的な制

御を用いた場合、環境変動を吸収でき、ロバスト性が実現できていることが分かる。

以上の実験結果より、課題(1)の数学的モデルと課題(2)の制御設計法の有効性を示すことができた。

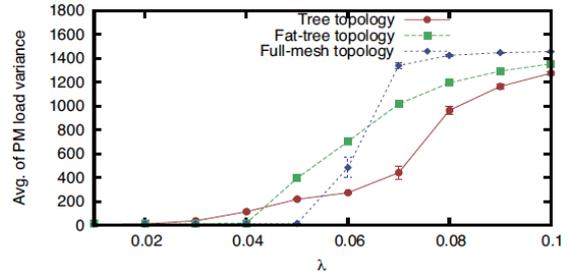


図 1a: 制御パラメータ λ vs. M の平均値

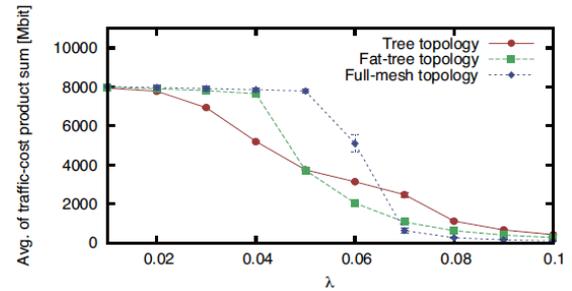


図 1b: 制御パラメータ λ vs. 物理計算機の負荷の標準偏差

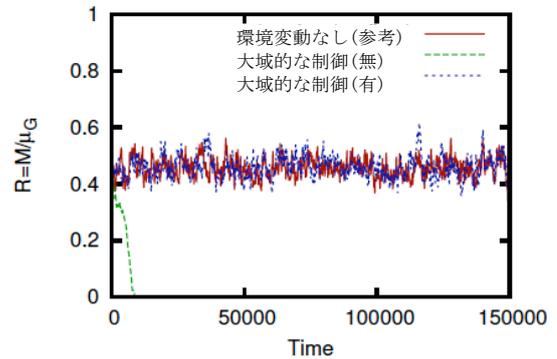


図 2a: 環境変動下におけるトラヒック集中の強さ $R (= M/\mu G)$ の時間変動

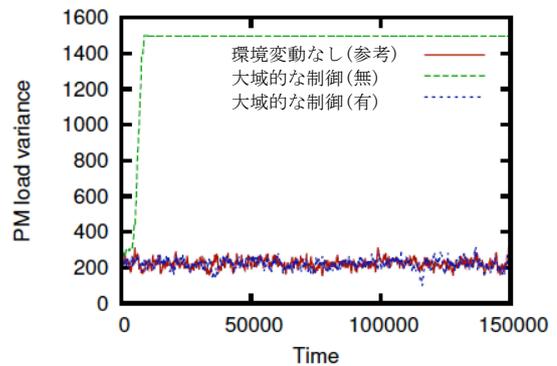


図 2b: 環境変動下における物理計算機の負荷の標準偏差の時間変動

今後の展望として、構築した数学的モデルを他分野のシステム制御に応用することを検討している。特に、近年注目が高まっているマイクログリッドにおける電力制御モデルや、社会システムにおけるロコミとマスコミの関係性を理解するための数理モデルへの応用を検討している。

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 6 件)

- ① Yusuke Sakumoto and Ittetsu Taniguchi, "Autonomous decentralized mechanism for energy interchanges with accelerated diffusion based on MCMC," Vol. E98-A, No. 7, July 2015[査読有, 掲載予定]
- ② Yusuke Sakumoto, Hiroyuki Ohsaki, and Makoto Imase, "Design and implementation of flow-level simulator FSIM for performance evaluation of large scale networks," International Journal of Computer Science and Telecommunications, Vol. 4, No. 8, pp. 1-10, Aug. 2013[査読有]
- ③ Yusuke Sakumoto, Hiroyuki Ohsaki, and Makoto Imase, "A method for accelerating flow-level network simulation with low-pass filtering of fluid model," Journal of Information Processing, Vol. 21, No. 3, pp. 481-489, July 2013[査読有]
- ④ Yusuke Sakumoto, Shinpei Kuribayashi, Satoshi Hasegawa, Hiroyuki Ohsaki, and Makoto Imase, "Performance evaluation of broadcast communication protocol DSCF (Directional Store-Carry-Forward) for VANETs with two-dimensional road model," Journal of Communications, vol. 8, no. 3, pp. 168-176, Mar. 2013[査読有]
- ⑤ Yusuke Sakumoto, Takeaki Nishioka, Hiroyuki Ohsaki, and Makoto Imase, "On the effectiveness of stable numerical solution for flow-level network simulator," International Journal of Advancements in Computing Technology (IJACT), Vol. 5, No. 2, pp. 771-784, Jan. 2013[査読有]
- ⑥ Yusuke Sakumoto, Hiroyuki Ohsaki, and Makoto Imase, "Performance of Thorup's shortest path algorithm for large-scale network simulation," IEICE Transactions on Communications, Vol. E95-B, No. 5, pp. 1592-1601, May 2012[査読有]

[学会発表] (計 27 件)

- ① 作元 雄輔, 会田 雅樹, "イジングモデルを利用した社会ネットワークにおける

ロコミの大域的効果の理解と応用に向けて," 電子情報通信学会 第 8 回 通信行動工学研究会, 大阪大学(大阪), 2015 年 3 月 9 日

- ② Yusuke Sakumoto and Ittetsu Taniguchi, "An autonomous decentralized mechanism for energy interchanges with accelerated diffusion based on MCMC," in Proceedings of the 20th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC 2015), pp. 279-284, 幕張メッセ(千葉), 2015 年 1 月 20 日[査読有]
- ③ Yusuke Sakumoto, Masaki Aida and Hideyuki Shimonishi, "An autonomous decentralized adaptive function for retaining control strength in large-scale and wide-area system," in Proceedings of the 57th IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2014), pp. 1958-1964, オースティン(米国), 2014 年 12 月 10 日[査読有]
- ④ 作元 雄輔, 大崎 博之, "スケールフリー構造が TCP エンド間性能に与える影響: スループット・パケット棄却率・ラウンドトリップ時間の解析," 電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ研究会 技術研究報告 (CQ2014-81), pp. 59-64, 高知市文化プラザかるぼーと(高知), 2014 年 11 月 14 日
- ⑤ Yusuke Sakumoto, Masaki Aida and Hideyuki Shimonishi, "An autonomous decentralized control for indirectly controlling system performance variable in large-scale and wide-area network," in Proceedings of the 6th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks 2014), pp. 1-7, マデイラ(ポルトガル), 2014 年 9 月 17 日[査読有]
- ⑥ 作元 雄輔, 谷口 一徹, "拡散方程式に基づく自律分散電力ルーティングに関する基礎検討," システム制御情報学会 第 58 回 研究発表講演会 (SCI' 14) 講演論文集(324-4), 京都テルサ(京都), 2014 年 5 月 23 日.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
作元 雄輔 (SAKUMOTO Yusuke)
首都大学東京・システムデザイン学部・助教
研究者番号: 30598785
- (2) 研究分担者
該当なし
- (3) 連携研究者
該当なし