

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249062

研究課題名(和文) 超大規模複雑ネットワーク系の制御のための基本原理

研究課題名(英文) Fundamental Principle for control of super-scaled complex network systems

研究代表者

井村 順一 (Imura, Jun-ichi)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：50252474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,220,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超大規模複雑ネットワーク系の制御のための数理モデリングに関する研究を展開してきた。特に、制御にとって必要なその可制御性の本質を抽出したモデリング手法、および、その低次元化手法を構築してきた。また、その知見をもとに、実用的な視点から、交通ネットワーク、バイオネットワークを研究対象として注目し、相互作用に着目した新しいモデリング手法や状態推定などについて個々の対象に特化した手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：This project has developed a mathematical modeling method for control of large-scale complex network systems. In particular, a modeling method called here clustered model reduction has been extended to a wider class of network systems. Based on this findings, the project has focused on two research topics, i.e., topics on modeling of traffic networks and biological networks, and developed a new modeling method and an estimation method focusing on interaction of subsystems.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 ネットワーク 交通ネットワーク バイオネットワーク

1. 研究開始当初の背景

超大規模複雑ネットワーク系の制御系設計では非常に大規模な計算を要するが、それに適した設計理論はない。そもそも現実的な制御入力数では不可制御となる超大規模ネットワーク系において、何が制御できるのか？、さえ厳密に解明されていない。さらに、解析や制御系設計用の数理モデルとして適した近似モデルを導出する手法は明らかでない。

2. 研究の目的

本研究では、超大規模複雑ネットワーク系を制御するための基礎理論を構築することを目的とし、研究代表者らがこれまで構築してきたクラスタ低次元化法を基礎に、超大規模ネットワーク系から、制御系設計にとって不可欠な、安定性や受動性などの特性を保存した可制御ネットワークモデルを抽出するモデリング理論を構築し、そのためのアルゴリズムを開発する。また、より具体的な研究対象として、交通流ネットワークやバイオネットワークを考え、広域信号機制御を含む次世代の交通流制御のための数理モデリング手法やバイオネットワークの制御のための数理モデリング手法を開発する。

3. 研究の方法

本研究では、下記に示すように、大きく分けて3つに研究テーマを分けて、かつ、有機的に連携して研究を進め、体系的なモデリング理論を構築する形式で進めた。

- (1) 超大規模複雑ネットワーク系の可制御性に着目した数理モデリング手法の開発
- (2) 交通流ネットワーク制御のための数理モデリング手法の開発
- (3) バイオネットワーク制御のための数理モデリング手法の開発

4. 研究成果

以下では、3章の(1)-(3)について、それぞれ研究成果をまとめる。

(1) 超大規模複雑ネットワーク系の数理モデリング手法

まず著者らが近年提案してきたネットワーク系のためのクラスタ化モデル低次元化手法を一般化し、モデリング理論として構築した。その内容は、これまで、低次元化の誤差指標として2ノルムと無限大ノルムの2種類の場合を提案してきたが、それら2つの手法を統一的に扱えるように理論を構築し、また、双方向の相互作用から一方向の相互作用のどちらの場合でも対応でき、サブシステムのダイナミクスを高次元に拡張することに成功した。また、この応用先として、簡単な電力ネットワークモデルに対する平均化状態オブザーバに適用し、本手法のモデリングの有効性を確認した。

より具体的には、108次元の元電力モデルに対して9次元モデルを再構築し、それに対して平均化状態オブザーバを設計し、それにより9次元の状態を推定したものと元の108次元のうち9次元の状態の値と比較したところ、非常に良い精度で推定できることがわかった。

これらの研究成果として主な論文は、図書が該当する。特に本研究で展開した大規模ネットワーク系の低次元化手法は、フランスの大型プロジェクトの国際ワークショップでの招待講演を依頼される(学会発表)など、非常にインパクトが大きな成果となった。今後の課題として、異質の高次元サブシステムで構成されるネットワーク系に対する低次元モデリング手法の開発が挙げられる。

(2) 交通流ネットワーク制御のための数理モデリング

具体的な例として、交通流制御は、大規模ネットワーク系の制御であり、そうした実際的な視点から、制御のための数理モデリングについて研究を展開した。主な成果として、ネットワーク交差点における数理モデリング

カスケードネットワークにおける交通流推定のためのモデリングの2つがある。

では、すべての自動車が自動運転で、交差点の中央指令塔とリアルタイムで通信可能であるとした場合の、交差点における物理的衝突を避けるための速度制御を実現するための数理モデリングを提案した。交差点上のネットワークでの情報混雑や物理的衝突を避け、かつ、ネットワークに流れる物理量を最大化するための最適化モデリングとなる。

提案手法の数理モデリングでは、各車をノードとし、それらの相互作用(エッジ)をポテンシャル関数を設定して記述したネットワークモデルを用いることで表現した。これ

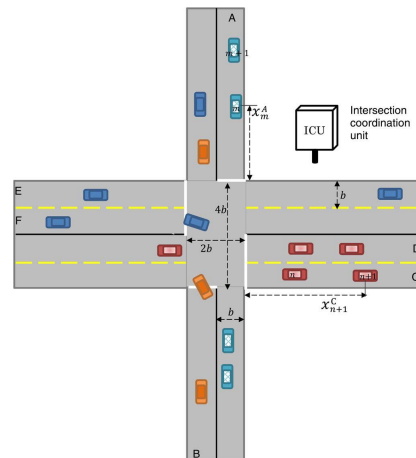


図1 交差点の例 (雑誌論文のFig.1より)

により、各車の最適速度を最適化問題に帰着することで計算することが可能となった。図1は、交差点の例であり、この交差点において、提案手法(Proposed VICS)と従来の信号機付交差点(Actuated SIS, 信号機制御は時間固定型)での性能の違いを比較した結果が図2である。横軸は交通量を示す。(a)は交差点を通過する時間を、(b)は交差点での停止時間を、(c)は必要な燃料を示す。明らかに、提案手法では、交差点で停止することがないため、性能が高い。本研究成果は、新規性が高く、特に雑誌論文は、2015年当時、月間引用数で第4位となった。

今後の課題として自動運転とヒューマンドライバーが混在する状況での交差点上の車両ネットワークモデルと交差点制御に関する研究が挙げられる。

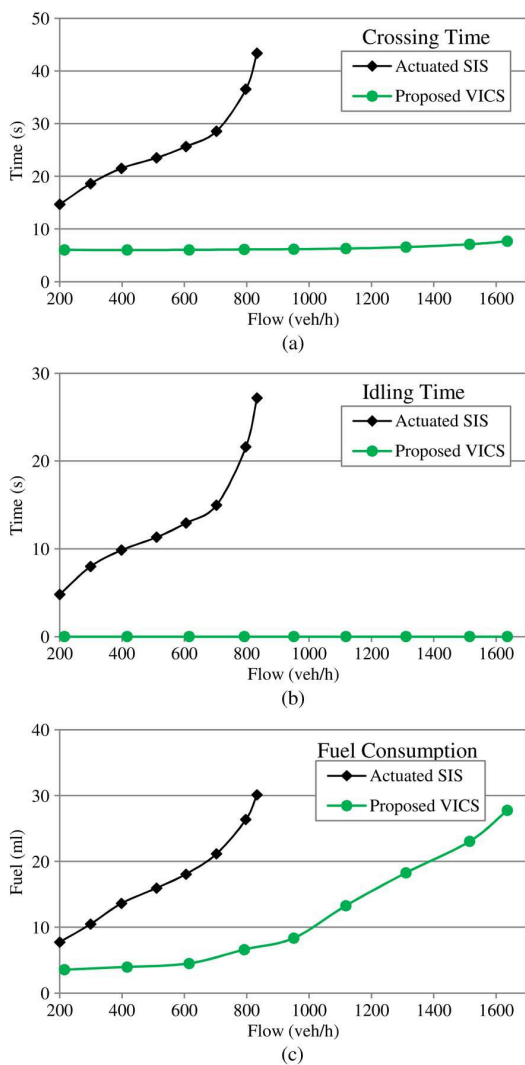


図2 提案手法と従来手法による性能比較 (雑誌論文のFig.8より)

一方、では、カスケードに相互作用する複数の車両群(ここではカスケードネットワーク系と呼ぶ)に対して、ある一定の車両のみ通信機能(V2I or V2V)を有しており、インフラ側で当該車両の車両速度が把握できる

場合を想定し、通信機能のない車両の速度分布(一定区間の速度プロファイル)を推定するための数理モデリングの問題を扱った。この問題は、相互作用する一部のノードの状態が観測できるときに、他のノードの状態を推定する問題としてモデリングした。図3に通信付車両(V2V)の普及割合を横軸とした際の速度プロファイルの推定誤差を示す。明らかに、V2V(通信機能を有する車両)が少ない場合、V2V間の距離が大きくなり、それら車両間内の車速の推定誤差が大きくなる。一方で50%程度の普及率となると、推定誤差は1%未満と非常に小さくなることがわかり、本モデリング手法および推定手法が有効に利用可能となることがわかる。

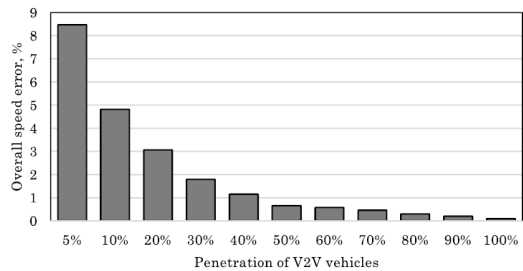


図3 推定結果 (雑誌論文のFig.5より)

さらに、大規模システムのためのモデリングとして交通システムを階層化された大規模ネットワークとみなし、階層ごとに順番にモデリングしていく手法を提案した(雑誌論文)。階層ごとに独立にモデリングするのではなく、ある階層で構築された比較的粗いモデルから定常特性など情報の一部を抽出し、他の階層でのモデリングに利用する方法となっている。このモデル継承の導入により、大規模ネットワークに対して効率的かつ効果的なモデリングが可能となった。

(3) バイオネットワーク制御のための数理モデリング

バイオネットワーク系のモデリングでは、複雑ネットワーク系の制御のための数理モデリングを具体的に検討するために、シグナル伝達系や遺伝子ネットワークを対象に研究を展開した。特に、これらの研究対象を含む細胞内分子間相互作用現象に着目し、その数理モデルとしてポジティブ2次システムモデルを提案し、特異摂動理論を利用することで、ほぼすべての細胞内分子間相互作用現象、すなわち細胞内分子間ネットワークを表現できることを証明した(雑誌論文)。また、そのモデルを用いることで、ポジティブ性や2次性を活用した安定性解析、L1ゲイン解析などの各種解析手法やオブザーバ設計まで展開してきた。さらに、そのポジティブ2次システムモデルを低次元化する手法についても検討した。23次元のEGFR信号伝達系に低次元化手法を適用し、小規模では

あるが、おおむね良好な結果を得た。しかし非線形性が強いため、より大規模なシステムに適用することは難しく、また、理論的な検討も不十分であり、今後、さらなる改善が必要であると判断している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

Md. Abdus Samad, Tomohisa Hayakawa, and Jun-ichi Imura, Road-Speed Profile for Enhanced Perception of Traffic Conditions in a Partially Connected Vehicle Environment, IEEE Transactions of Vehicular Technology, 2018 (査読有)
DOI: 10.1109/TVT.2018.2826067

Sho Yoshimura, Aayaka Matsubayashi, and Masaki Inoue, System Identification Method Inheriting Steady-state Characteristics of Existing Model, International Journal of Control, 2018. (査読有)
<https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1458158>

岡本有司, 井村順一, 岡田真理子, 特異摂動によるポジティブ2次システムモデリング, 計測自動制御学会論文集, Vol.53, No.3, pp. 251-259, 2017 (査読有)
<https://doi.org/10.9746/sicetr.53.251>

岡本有司, 井村順一, 岡田真理子: ポジティブ2次システムによる細胞内分子間相互作用の表現, 計測自動制御学会論文集 vol. 52, no. 7, pp. 368-375, 2016 (査読有)
<https://doi.org/10.9746/sicetr.52.368>

Md. Abdus Samad Kamal, Jun-ichi Imura, Tomohisa Hayakawa, Akira Ohata, and Kazuyuki Aihara, A Vehicles-Intersection Coordination Scheme for Smooth Flows of Traffic without Using Traffic Lights, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 16, No. 3, pp. 1136-1147, 2015 (査読有)
DOI: 10.1109/TITS.2014.2354380

〔学会発表〕(計 19 件)

Md. Abdus Samad Kamal, Tomohisa Hayakawa, and Jun-ichi Imura, Realization of Highly Anticipative Driving in a Partially Connected Vehicle Environment, Proc. of 20th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2017
DOI: 10.1109/ITSC.2017.8317611

Jun-ichi Imura, Clustered Model Reduction of Large-scale Networks and its Application to Control, Workshop on Modelling Reduction Tools for Large Scale Complex Networks, Grenoble, France, Sept. 21-22, 2017. (招待講演)
<http://scale-freeback.eu/grenoble-works>

hop-2017/

DOI: 10.1109/ECC.2015.7330759

Daiki Ogawa and Tomohisa Hayakawa, Adaptive Control for Linear Uncertain Discrete-Time Systems with Event-Triggered Mechanisms, Proc. of IFAC World Congress (IFAC-PapersOnLine 50-1 10108-10113), 2017

<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1787>

Yuji Okamoto, Jun-ichi Imura, and Mariko Okada-Hatakeyama, Positive Quadratic System Representation of Molecular Interaction in a Cell, Proc. of European Control Conference, 2015

Hasan E. Sungu, Masaki Inoue, Jun-ichi Imura, Nonlinear spacing policy based vehicle platoon control for local string stability and global traffic flow stability, Proc. of European Control Conference, 2015

DOI: 10.1109/ECC.2015.7331059

Yuji Okamoto, Jun-ichi Imura, and Mariko Okada-Hatakeyama, Positive Quadratic System Approximate Representation of Nonlinear Systems, IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems (IFAC-PapersOnLine 48-18 65-70), 2015

<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.11.012>

〔図書〕(計 1 件)

Jun-ichi Imura, Takayuki Ishizaki. Modeling Perspectives of Hybrid Systems and Network Systems, Mathematical Control Theory I, Camlibel, M.K., Julius, A.A., Pasumathy, R., Scherpen, J.M.A. (Eds.) Lecture Notes in Control and Information Sciences 461, Springer, pp. 137-151, 2015 (DOI: 10.1007/978-3-319-20988-3_8)

6. 研究組織

(1)研究代表者

井村 順一 (IMURA, Jun-ichi)
東京工業大学・工学院・教授
研究者番号: 50252474

(2)研究分担者

早川 朋久 (HAYAKAWA, Tomohisa)
東京工業大学・工学院・准教授
研究者番号: 30432008

(3)連携研究者

石崎 孝幸 (ISHIZAKI, Takayuki)
東京工業大学・工学院・助教
研究者番号: 10650335

井上 正樹 (INOUE, Masaki)

慶應義塾大学・理工学部・助教
研究者番号： 80725680

鈴木 雅康 (SUZUKI, Masayasu)
宇都宮大学・工学部・助教
研究者番号： 10456692

(4)研究協力者

Md. Abdus Samad Kamal (KAMAL, Md. Abdus
Samad)
Monash University (Malaysia)・School of
Engineering・Senior Lecturer