

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：12201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26820164

研究課題名(和文) ネットワーク系のノックダウン構造同定のための基礎理論の構築

研究課題名(英文) Basic theory for knock-down structure identification of network systems

研究代表者

鈴木 雅康 (Suzuki, Masayasu)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10456692

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：大規模なネットワーク(NW)系の解析・制御への関心が高まる中、そのモデリングのためにNW構造を同定する手法の確立が求められている。しかし、既存手法はすべてのサブシステムの状態を観測できるという仮定の上に提案されているものが多く、経済的・技術的な観点で実現性に問題を含んでいる。本研究では、遺伝子工学で利用されてきたノックダウン法の考え方を応用することで、サブシステムに比べてセンサとアクチュエータの数が少ない状況におけるNW構造同定法を提案した。また、非線形NW系への応用を目指し、そのための時系列解析手法について検証した。

研究成果の概要(英文)：While interest in analysis/control for large-scale network systems is increasing, developing identification methods of network structure is required. Most of the existing methods however assume that all of the states of the subsystems are available, which includes a problem on financial/technical viability. In this research, we proposed a structure identification method for networks that have a relatively smaller number of actuators/sensors than that of the subsystems, where we employed the idea of knock-down procedure in gene engineering. In addition, for the realization of nonlinear network identification, nonlinear time-series analysis methods were discussed.

研究分野：制御工学

キーワード：ネットワークシステム ネットワーク構造同定 ノード・ノックアウト/ダウン 非線形時系列解析

1. 研究開始当初の背景

生体ネットワーク、ソーシャルネットワークをはじめ、大規模なネットワーク(以下、NW)系の解析・制御への関心が高まっている。その中、NW系のモデリングのために、完全ないし部分的に未知であるNW構造を同定する手法の開発が求められており、近年、様々な関連研究が報告されている。しかし、それらのほとんどの手法はすべてのサブシステムの状態を観測できるという仮定の上に提案されていて、経済的・技術的な視点で観測装置の実現性に問題を含んでいる。これを背景に、サブシステムに比べてセンサとアクチュエータの数が少ない状況におけるNW構造の同定手法の開発が望まれていた(図1)。

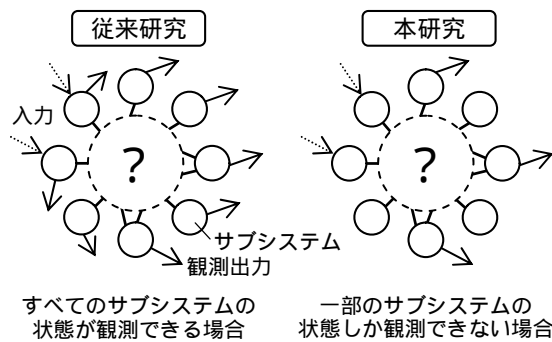


図1: 従来研究と本研究の比較

状態変数の数より少ない入力部と出力部の時系列間関係によって系の内部構造の同定を試みるとき、複数の異なる構造が同じ入出力関係を再現し得るために、真の構造を決定できない場合がしばしばある(これを可同定性の問題という)。実際、NW構造を一意的に復元するには、スパース性等の構造に関する先験情報を持ち合わせておくか、あるいは、対象のNW系の入出力データ以外に別種の時系列データを収集する必要があることが知られている。

2. 研究の目的

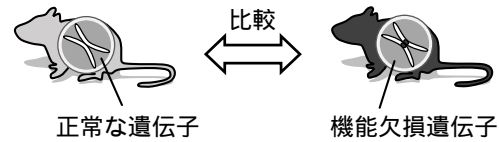
制御入力部・観測出力部の数がサブシステムの数より少ないNW系に対し、入出力時系列データに加え、NW構造の先験情報や内部ダイナミクスを変化させたノックダウンNW系を合わせて用いてNW構造を同定するための基礎理論を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究代表者は、本研究に先行して、多次元サブシステムが無向グラフを介して形成する線形NW系に対し、ノックアウトを用いた局所構造同定法の開発に取り組んできた。ノックアウトとは、遺伝子工学の分野で確立されている実験手法で、機能欠損遺伝子を導入した生物の個体と正常な個体の状態や行動を比較することによって、その機能や遺伝

子NW内の相互作用の推測を行うものである。ノックアウト構造同定法では、この戦略を数理的な解釈とともに導入し、対象のNW系の他に特定のサブシステムの機能を無効化したNW系を用意して、それらの動的特性の差異からエッジ強度推定を行う手法である(図2)。

遺伝子ノックアウト



ノックアウト構造同定

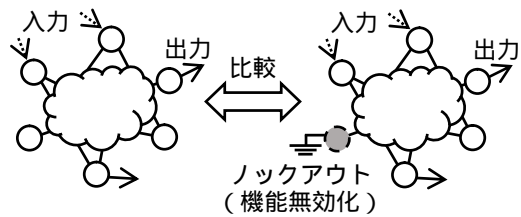


図2: ノックアウト局所構造同定法の概要

扱えるNW系のクラスを拡張し、研究の目的を達成するために以下の課題に焦点を当てた。

- ・ 線形NW系に対する構造同定法の開発
 - NW構造識別に有効な特徴量の追究: 動的システムから得られる情報は、入力時系列、出力時系列、そして、構造・パラメータに関する先験情報である。NW構造を一意的に再現する、すなわち、異なる構造を識別し解の候補から除外するために、どのような出力時系列や先験情報を取得すればよいか、そのためにどのような補助NW系・入力時系列を用意する必要があるか、といった特徴量を把握することが、具体的な同定手法を開発する上で重要になる。
 - NW構造同定手法の開発: 上記課題で得られた特徴量を基に、データ抽出方法から構造同定までの一連の手続きを構築する。
- ・ 非線形NW系の構造同定のためのデータベース時系列解析手法の開発
 - 非線形ダイナミクスをもつ系の同定は(NW構造同定に限らず)挑戦的な課題である。非線形NW系の平衡点近傍で、同定入力を小さく保てば、線形近似NW系の構造同定は可能であるが、入力を小さくしたことで、同定精度の低下を招き得る。そこで、非線形時系列解析分野で用いられているモデルフリーの推定・予測手法を取り入れ、不確かさを有する数理モデルへの依存を避けた解析手法の

開発を目指す。

4. 研究成果

(1) ノックダウン局所構造同定法の確立

確立した線形無向 NW 系(各サブシステムは高次かつ非一様ダイナミクスをもつとしてよい)に対する NW 構造同定法の概要を以下に記す。まず、構造同定の対象である NW 系と、一部のサブシステムに関してそのダイナミクスを別のダイナミクスに置換したノックダウン NW 系を用意する(図 3)。続いて、既存のシステム同定法を用いて、各 NW 系の入出力伝達関数を求める。そして、各々の伝達関数の差異と NW 構造の間にある関係性(＃)を利用して、ノックダウンしたサブシステム間のエッジ重みを推定する。

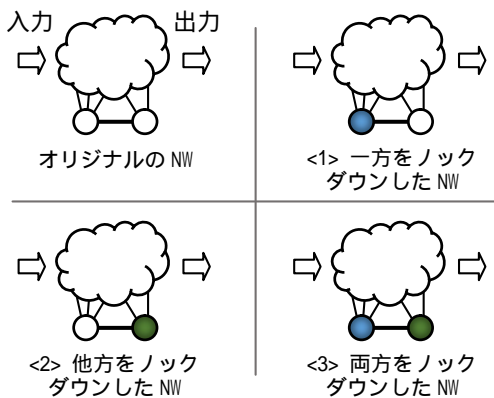


図 3：入出力関係を同定する 4 つの NW 系

本研究では、一般化周波数変数を用いた NW 系の伝達関数の縮約表現(高次サブシステムの扱いに対応)や行列式に関する Jacobi の恒等式(サブシステムダイナミクスの非一様性に対応)等を用いて、4 つの NW 系とエッジ重みの関係性(＃)を明らかにした。また、提案手法の拡張性を探る目的において、他研究グループによって開発されている、状態量を測定可能なノード間の干渉の度合いを動的エッジとして再現する手法(文献)との比較を行い、両手法が再現できる情報の違いを明らかにした。

さらに、線形無向 NW 系を対象に開発した

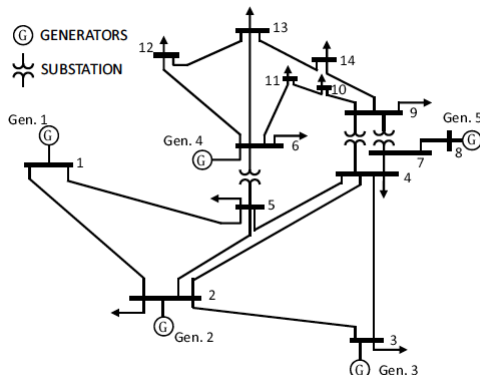


図 4：電力 NW 系の例(IEEE 14-bus システム)

同定手法の推定精度について定量的評価を目的に、具体的な電力 NW 系(図 4)の変電所間最大送電電力の推定に関する数値実験をおこない、比較的小規模な運用における推定で提案手法が有効であることを確認した。一方、NW 系のパラメータやサイズに対する依存性を調査し、大規模系の場合には適切なスケーリングが重要であることも確認した。

(2) 非線形時系列解析手法の研究

非線形 NW 系の構造同定を視野に、非線形系の数理モデルが未知の場合に、入出力時系列データのみから状態を予測・スムージング(ノイズ等の影響を低減した時系列の再生)するための手法について研究を進めた。具体的には、非線形時系列解析論における遅れ座標を用いたアトラクタ再構成法と局所線形予測法、システム論における非線形カルマンフィルタ・粒子フィルタを組み合わせるというアプローチを採った。図 5 は Hénon 写像(二次元の非線形自律系)に時系列解析手法を適用した結果を示している。観測値は真値に正規白色雑音を加えたものとして用意した。従来の修正類推法(図 5 左下)と提案手法(図 5 右下)を適用した結果、予測誤差のフィードバック機構をもつ提案手法の方がアトラクタの再現性が高く、実際に予測精度も高くなることが確認された。この成果を非線形 NW 系の構造同定に応用することは今後の課題である。

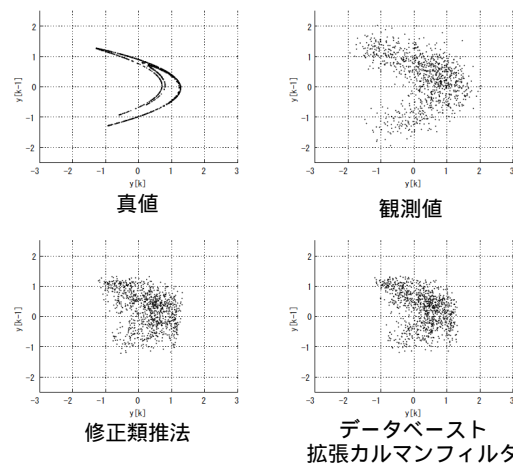


図 5：非線形写像(Hénon 写像)に対する適用

以上の得られた成果をまとめ、著名な学術誌に投稿するための準備を行っている。

<引用文献>

J. Gonçalves, S. Warnick, Necessary and sufficient conditions for dynamical structure reconstruction of LTI networks, IEEE. Trans. Autom. Control, Vol.53, 2008, pp.1670-1674.

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0件)

〔学会発表〕(計2件)

[1]

五十嵐 健太, 鈴木 雅康, 平田 光男, 局所線形予測手法を用いたデータベース拡張カルマンフィルタ, 第5回電気学会東京支部群馬・栃木支所合同研究発表会, 2015, pp.221-223.

[2]

五十嵐 健太, 鈴木 雅康, 平田 光男, 非線形時系列解析を用いたデータベースパーティクルフィルタ, 第58回自動制御連合講演会, 2E2-5, 2015 (第58回自動制御連合講演会・優秀発表賞 受賞)

〔図書〕(計1件)

[1]

Masayasu Suzuki, Jun-ichi Imura, Kazuyuki Aihara, Network structure identification from a small number of inputs/outputs (Chapter 14), in "Analysis and Control of Complex Dynamical Systems -Robust Bifurcation, Dynamic Attractors, and Network Complexity," K. Aihara, J. Imura, & T. Ueta (Eds.), Springer Japan, 2015.

〔産業財産権〕

該当なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://hinf.ee.utsunomiya-u.ac.jp/member/msuzuki/top.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし

(4)研究協力者

平田 光男 (HIRATA, Mitsuo)
井村 順一 (IMURA, Jun-ichi)

五十嵐 健太 (IGARASHI, Kenta)

薄井 峻介 (USUI, Shunsuke)

合原 一幸 (AIHARA, Kazuyuki)