

氏名	梅 庄林
所属	システムデザイン研究科 システムデザイン専攻
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	シス博 第195号
学位授与の日付	令和5年3月25日
課程・論文の別	学位規則第4条第1項該当
学位論文題名	Identification of Network Structures in Dynamical Network Systems Using Koopman Operators (クープマン作用素を用いた動的ネットワークシステムにおけるネットワーク構造の同定)
論文審査委員	主査 教授 小口 俊樹 委員 教授 吉村 卓也 委員 教授 増田 士朗 委員 准教授 薄 良彦 (京都大学)

【論文の内容の要旨】

個々がほぼ同一のダイナミクスを持つシステムが結合されて構成されるネットワークシステムは、工学だけでなく自然科学や社会科学など広範な学問分野で関心が高い研究対象である。工学的には、電力ネットワークや、情報通信ネットワークの発展とともにセンサネットワークなどのIoT基盤技術やロボットの協調制御など、ネットワークシステムが広く用いられてきている。そのようなネットワーク化されたシステムの観測出力からネットワークの構造を推定することは、そのシステム自体の理解だけでなく、ネットワークの構築や改善、故障検知等の観点から重要である。ネットワークの構造同定に関する研究はこれまでも広くなされており、制御工学の観点から適応制御に基づく手法や、情報理論の観点から動的モード分解や圧縮センシングを用いたネットワーク構造の推定方法などが提案されている。これらの多くは、その対象システムを線形システムとしているが、実システムを考えると、サブシステム自体が非線形性を持つだけでなく、通信における飽和や伝送遅延などに起因する非線形性が存在するため、それらの手法の適用範囲は限定的である。したがって、対象を線形システムに限定しない、より広い非線形システムを対象としたネットワーク構造の同定手法の開発が必要である。また、通信の断絶などによりネットワーク構造が変化する状況などを考えると、ネットワークの状態をリアルタイムに把握するために、計測データを逐次活用することでよりより現状に近いネットワークの状況を推定する手法が望まれる。さらに、ネットワークシステムにおいて、直接観測可能な状態は限定

的であり、一般に全ての状態を観測することはできないため、限定された情報からネットワークの構造を正確に検出することが必要となる。

そこで、本論文では、これらの要望を満たし、より広範なシステムに対して適用可能なネットワーク構造同定手法の開発を目的としている。本論文では、まずネットワークシステムを非線形ダイナミクスを持つ複数のノードシステムの結合としてモデル化し、ノード間の結合を非線形関数を含む結合関数として表現したシステムを対象としている。そこでネットワーク構造の同定とは、システム全体におけるこの非線形関数を同定することとなるが、本論文を通じて、非線形関数の同定問題を線形写像の同定問題に帰着させるために、**Koopman**作用素を導入した新たなネットワーク構造の同定手法を提案している。

本論文の特徴は、非線形システムおよび非線形関数でのネットワーク結合系に対するネットワーク構造を同定する手法を提案していること、ネットワーク構造の変化をほぼリアルタイムで把握できるオンライン実装が可能な手法を提案していること、観測可能な出力が一部の状態変数に限られる場合であっても構造を推定する手法を提案していることである。これらを通じ、本論文で目的としている、より広範な動的システムに対するネットワーク構造を同定する手法が開発された。

本申請論文は全6章で構成されている。

第1章では、本論文で扱う問題の背景について述べ、研究の目的と解決すべき問題点を明確にする。また、本論文の内容を理解するために必要な基礎知識をまとめている。

第2章、第3章では、ネットワークを構成するノードの全状態が計測可能である場合について検討している。第2章では、ネットワークから孤立したノードシステム単体の全状態観測データを併用することで、ネットワークシステムの非線形結合関数を同定する手法を提案している。第3章では、ネットワークの構造が一定の制約を満たす場合、孤立ノードの観測データを用いることなく非線形結合関数が同定できることを示している。さらに、結合関数の同定のオンライン実装のためのアルゴリズムの提案を行っている。

続く第4章と第5章では、ネットワークのノードシステムの出力データのみが観測可能である場合について検討している。第4章では、各ノードの固有ダイナミクスが既知で、内部ダイナミクスが収束的なシステムを対象に、結合関数の同定手法を提案している。各ノードの遅延出力に追従するサブシステムを設けることで、各ノードの全状態の過去の値を推定し、その推定値から結合関数を推定する手法を提案している。第5章では、各ノードの出力信号をそのノードの全状態として考え、計測できない隠れ状態を未知なダイナミクスとして捉え、未知なダイナミクスの推定を含めて行うことで、結合関数の同定を行う手法を提案している。その結果、観測可能な状態が制限された環境下で、孤立ノードのダイナミクス全てが必ずしも与えられない場合であっても、ネットワークの構造の推定が可能であることを示している。

第6章では、本研究の内容をまとめ、残された課題と拡張しうる方向について述べ、本研究の総括を行っている。