

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 等々力 賢

実世界の複雑システムから得られた時系列データには必ずノイズが含まれる。こうしたノイズのうち観測時に混入する観測ノイズとは異なり、システム自体に内在するダイナミカルノイズは、システムがカオス力学系のような鋭敏な初期値依存性を有する場合には特に、位相変化やアトラクタの崩壊等のようなシステムの著しい構造変化を引き起こすことが知られている。従って、ダイナミカルノイズの解析は極めて重要であると考えられてきたが、ダイナミカルノイズがシステムへ影響を及ぼすメカニズムは非常に複雑である為、未だ十分に解析が行われていないのが現状である。そこで本論文では、ダイナミカルノイズに着目し、その複雑システムへ及ぼす影響を抽出する評価法を提案し、数値実験を通して実世界を想定した種々の環境下における本評価法の有効性を検証している。本論文は英文で記述され、5章から構成されている。

第1章では、カオスを代表とする複雑システムとノイズに関する既往の研究と現状が述べられている。特にダイナミカルノイズの複雑システムへの影響解析についての重要性を中心に、本論文の背景と目的を述べられている。

第2章では、ダイナミカルノイズの複雑システムへの影響を抽出する為の新しい評価法が提案されている。本評価法の中心は、従来、観測ノイズの影響の評価、即ち、観測ノイズのノイズレベルの推定や除去にも用いられてきた特異値分解 (SVD) の拡張である。まず、観測ノイズとダイナミカルノイズがそれぞれ特異値分解にどのような影響を与えるのかを理論的に調べている。その結果、ダイナミカルノイズが含まれるシステムの場合には、観測ノイズが含まれるシステムとは異なり、特異値分解により得られた特異値が時間的にゆらぐことが推察されている。そこで、このようなダイナミカルノイズに特徴的な影響の出方を利用して、ダイナミカルノイズの複雑システムへの影響を抽出する評価法が提案されている。具体的な評価指標として、特異値が時間的にゆらぐ結果生じる特異値の分布の半値幅 HW 、データセット毎に得られた特異値の列と全データセットでの特異値の平均値の列との間の相関係数 CC 、及び、正規化平均自乗誤差 E を導入する。実際にはこれらの平均値 AHW 、 ACC 、及び AE を評価指標として用いることが提案されている。

第3章では、複雑システムの代表として3つのカオスシステム、Chua's circuit、Lorenz system、Rossler system に対して、提案した評価法の有効性が調べられている。特に、観測ノイズの存在下や、ダイナミカルノイズが加法的、乗法的に複雑システムと関連する場合、さらにはダイナミカルノイズの発生過程がガウス分布あるいは一様分布に従う場合についての解析が行われ、実世界において複雑システムへのダイナミカルノイズの影響を抽出する可能性について論じている。実際には、ノイズのないデータ、観測ノイズのみが含まれたデータ、ダイナミカルノイズのみが含まれたデータ、両ノイズが共に含まれたデー

タについて様々なノイズレベルに対して解析が行われている。特異値分解の解析結果によれば、一部を除いて、特異値が予め知られたシステムの次元数にほぼ等しい結果が得られており、また、ダイナミカルノイズのノイズレベルの上昇と共に、全体として特異値の時間的なゆらぎの増加が認められている。3つのカオスシステムの間ではノイズレベルの相違や、影響の出方に違いは見られるものの、本評価法で導入した3つの評価指標、 AHW 、 ACC 、及び AE のいずれかを用いることにより、ダイナミカルノイズの影響が抽出可能であることが示されている。これらは、ダイナミカルノイズの発生過程にはほとんど依っていない。また、観測ノイズの存在下においても観測ノイズに僅かな程度しか影響されることなくダイナミカルノイズのみの影響が抽出されている。

加法的ダイナミカルノイズの場合に、ノイズレベルが Chua's circuit では0.1%の付近で、Lorenz system では3%~10%の範囲で、また、乗法的ダイナミカルノイズの場合には、Chua's circuit では1%付近で、Lorenz system では10%~100%の範囲で、ノイズレベルの上昇に反して特異値の時間的なゆらぎが減少する特異な結果が示されている。この特異性に対して、従来から用いられてきたエントロピ、及びゆらぎ複雑測度により詳細に解析が行われている。その結果、いずれの解析法においても同様の変化が認められシステムに本質的な変化であることが示されている。特にゆらぎ複雑測度の結果から、この変化は、ダイナミカルノイズにより位相空間の状態点の均質性が増加し周期的に近い軌道を有する、より安定したシステムへの構造変化に対応するものであることが示されている。よって、本評価法は、エントロピやゆらぎ複雑測度などによる従来の解析法と同様に、ダイナミカルノイズに導かれたシステムの安定化の変化もまた忠実に抽出可能であることが示されている。一方、本評価法は観測ノイズの存在下においても有効であることから、従来の解析法と比べて、実世界での複雑システムの解析に有利であると、と述べられている。

第4章では、本評価法を適用する最適条件が、窓の条件、データセットの数の観点から論じられており、本論文で対象とした3つのカオスシステムに対して、妥当と考えられる条件が示されている。

第5章では、第3章、第4章で解析した結果から提案した評価法の効果を複雑システム毎に整理し、実世界の複雑システムへ適用する場合の検討事項について論じ、将来の工学的な適用可能性を示した上で結論をまとめている。

以上を要約すれば、本論文は、実世界の複雑システムの解析において重要となるシステムに本質的なダイナミカルノイズに着目し、ダイナミカルノイズが複雑システムへ及ぼす影響を抽出する評価法を提案し、実際に3つの複雑システムに対して、数値実験によりその有効性を示している。また、今後、実世界の複雑システムへ適用する場合の検討事項について論じその適用可能性を示している。このような成果は、将来における複雑システムの工学的な利用に多大な貢献を与えるものと考えられる。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。