

審査の結果の要旨

氏名 チャン クオック ホアン

本論文は「Variant Topological Data Analysis (バリエント位相データ解析)」と題し、英文より書かれており6章よりなる。位相データ解析はトポロジーの概念を用いて、高次元空間におけるデータの「形」に関する情報を定量的に得るものである。位相データ解析はノイズに強い特徴を得ることで、情報通信や材料科学において有効性が示されてきた。しかし、動的なシステムや複雑系では、位相データ解析によって得られる特徴は動的なスケールの変化(バリエント)に依存するため、まだ十分な精度に達していなかった。これに対し、本論文では動的なスケールを考慮し、高精度かつ多様なデータで使えるバリエント位相データ解析フレームワークを提案した。さらに、提案フレームワークを複数の具体的な課題に適用することでその性能について検証した。

第1章は「Introduction (序論)」であり、位相データ解析の必要性和有効性を示し、動的なシステムや複雑系におけるスケール変化に依存する問題の整理を行った。

第2章は「Basic and Background (基本と背景)」と題し、位相データ解析で頻繁に用いられるデータの幾何学的モデリングと計算代数の中心的な役割を担うパーシステントホモロジー手法を数学的な観点で定義した。

第3章は「Variant Topological Data Analysis (バリエント位相データ解析)」と題し、動的なスケール変化を表現可能なバリエント位相特徴を提案した。位相データ解析を使うためには、データをユークリッド空間のような距離空間へ埋め込む必要がある。この埋め込み操作は、例えば時系列や複雑ネットワークシステムの場合非自明であり、そのシステムのスケールに依存するものである。得られた特徴はパーシステント図と呼ばれる二次元平面上の多重集合である。従来の位相データ解析においては、埋め込みスケールを決定することは重要であるが、ノイズなどの影響で難しい問題であった。バリエント位相データ解析では埋め込みスケールを固定せず、スケールを考慮する軸を新たに導入することで三次元のパーシステント図とよばれるバリエント位相特徴を得る。これらの特徴はベクトル空間に属しないため、統計学習タスクでも利用できるように、特徴同士の正定値カーネルを定義した。

第4章は「Variant Topological Features in Time-series Analysis (時系列解析におけるバリエント位相特徴)」と題し、時系列データからバリエント位相特徴を構築する仕組みを提案した。時系列データを遅延時間隔によって生成された高次元時間遅れベクトルによってユークリッド空間に埋め込む操作は知られていた。しかし、現実には遅延時間隔の

決定は難しいことを示し、遅延時間隔の軸方向に拡張したバリエント位相特徴はノイズに対してロバストであることを数学的な観点から明らかにした。時系列の分類問題に適用することで、人工データや実データの分類精度において従来手法より高い精度を達成し、バリエント位相データ解析が時系列解析に有効であるという結論を得た。

第5章は「Variant Topological Features in Complex Network Analysis（複雑ネットワーク解析におけるバリエント位相特徴）」と題し、複雑ネットワークからバリエント位相特徴を構築する仕組みを提案した。まず、ネットワーク上の拡散モデルを定義し、拡散時間で各ノードから他のノードへ到達する確率を表す高次元ベクトルを作り、ネットワークをユークリッド空間に埋め込む。複雑ネットワークにおいては、個々のノードのマイクロスケール、全体のグローバルスケール、そしてコミュニティのメゾスケールといった様々なスケールがあることは知られていた。拡散時間の軸を拡張したバリエント位相特徴はこれらのスケールを表現できることを示した。さらに、これらの特徴はネットワーク構造の摂動に対してロバストであることを数学的に証明した。ネットワークの分類や変化点検出の問題に適用することで、人工データや実データの分類精度において従来手法より高い精度を達成し、バリエント位相データ解析が複雑ネットワーク解析に有効であるという結論を得た。

第6章は「Conclusion（結論）」であり、本論文の主なる貢献をまとめ、今後の展望について述べている。

以上を要するに、本論文は、位相データ解析を動的なシステムや複雑データに適用する際生じるスケール依存問題を解決するフレームワークを提案し、その有効性を時系列解析や複雑ネットワーク解析で示したものであり、工学全般の基礎への貢献が期待され、電子情報学上貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。