

氏名(本籍)	Lincon Sales de Souza		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第 9810 号		
学位授与年月日	令和 3 年 3 月 25 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	Learning algorithms on Grassmann manifolds (グラスマン多様体上における学習アルゴリズムの構築)		
主査	筑波大学 教授	博士(工学)	福井和広
副査	筑波大学 教授	博士(工学)	牧野昭二
副査	筑波大学 教授	博士(工学)	亀山啓輔
副査	筑波大学 教授	博士(工学)	佐久間淳
副査	統計数理研究所 教授	博士(工学)	日野英逸

## 論文の要旨

本審査論文は部分空間表現に基づく学習理論について、動画像認識、信号識別、深層学習との接続の3つの観点から、各タスクの特性を詳細分析し、新しい方法論とアルゴリズムの提案を行っている。数学的には部分空間の集合はグラスマン多様体と呼ばれる曲がった空間を構成し、一つの部分空間はグラスマン多様体上の一点に対応する。本論文はこのグラスマン多様体を議論の基盤とすることで、数理的な側面からの深い議論・考察を行っている。本論文は以下の6章から構成される。

第1章では、部分空間表現が色々なパターン認識や機械学習の問題において、重要な要素として現れることが示され、本研究の背景、動機、および目的が整理されている。

第2章では、まず本論文で基盤となる部分空間の基本数理が説明されている。続いてグラスマン多様体の定義や数理特性が述べられている。

第3章では、動画像認識のための Enhanced Grassmann discriminant analysis (eGDA)が提案されている。動画像列から得られる画像セットは、高次元ベクトル空間の低次元の部分空間で表現できる。提案法の基本アイデアは、クラス部分空間の分離度向上をベクトル空間とグラスマン多様体の異なる2つの空間でそれぞれ行うことにある。まずベクトル空間において一般化差分部分空間への射影を用いてクラス分離度を高める。続いてグラスマン多様体上において判別分析を適用してクラス分離度を高める。このように異なる空間の判別法を併用することで、提案法では高い識別性能を実現している。

第4章では、部分空間表現に基づく信号識別が議論されている。与えられた信号データに対して、特異スペクトル分析(SSA: singular spectrum analysis)を適用することで、その信号を部分空間に変換出来る。これにより、2つの信号の比較問題はそれぞれに対応する2つの部分空間の構造類似度を測る問題に変換される。ここで単に構造類似度を測るだけでは高い識別性能は期待出来ない。より高い識別性能を目指して、判別分析的なメカニズムを組み込んだ2つの拡張法が提案されている。一つがグラスマンカーネルによる判別分析を組み込んだ方法(Grassmann singular spectrum analysis

(GSSA)、もう一つがグラスマン多様体上の接平面上での判別分析を組み込んだ方法(Tangent singular spectrum analysis (TSSA))である。提案法の有効性は、カエルの鳴き声データベースを用いた評価実験を通して示されている。

第5章では、部分空間表現をベクトル表現に変換するグラスマン log モデルが提案されている。基本アイデアはグラスマン多様体上の接空間を変換インターフェースとして見なして、多様体から接空間への log 写像を変換に利用することにある。接平面は多様体上の接点によって定義されるが、この接点を逐次的に最適学習することで、最適な変換を求めている。手形状認識を用いた評価実験により、提案法の有効性が示されている。

第6章では、本研究の結論と今後の課題が述べられている。

## 審 査 の 要 旨

### 【批評】

提案されている部分空間表現に基づく学習法は、いずれも高い新規性が認められ、学術的にも興味深い。またいずれの提案法も公開データベースを用いた従来法との総合的な比較実験を通して、高い実用性が確認できる。グラスマン多様体を基盤とする数理的な深い議論により、提案法の本質がクリアに示されており、今後の更なる理論発展が期待される。動画像認識、信号識別、深層学習との接続という3つの観点から構成される各論は、課題整理から解決法の提案までの議論の流れに淀みが無く、説得力がある。動画像認識に関しては、ベクトル空間とグラスマン多様体という2つの空間でそれぞれ判別能力を高めるというアイデアはシンプルであるが、両者が異なる特性を持つ有空間であることを考えると、理に適った方法であると納得できる。信号識別については枠組み自体の独自性に加えて、部分空間表現の導入により、高速・高精度計算と少ないメモリ量を同時に実現している点も評価できる。野外調査における生体音響信号の解析においては、高性能な計算機は使えない場合が多い。この点を鑑みると提案法は小型デバイスでも動作可能であり、幅広い実応用の可能性を持っている。また深層学習に部分空間表現を如何に組み込むかは重要な課題であり、グラスマン多様体上の接平面をインターフェースとする学習フレームワークは極めて独創的で、学術的にも興味深い研究成果である。以上、緻密な分析・考察に基づく課題分析、およびその解決法の高い独自性や実用性を鑑みて、本研究は学位を受けるに値する十分な研究成果であると評価できる。

### 【最終試験の結果】

令和3年2月5日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

### 【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。