

審査結果の要旨

論文提出者氏名 赤穂 昭太郎

本論文は、有限混合分布モデルと呼ばれる統計モデルの学習に関する能力を数理的に明らかにするとともにどのような問題に適用可能なのかを探求することを目的とするものであり、「有限混合分布モデルの学習に関する研究」と題し、本文7章から構成されている。

第1章は「序論」であり、研究の意義、位置づけ、目的、および本論文の構成について述べている。

第2章「有限混合分布とその基本的性質」では、有限混合分布の定式化を行い、グラフィカルモデルとの関連やモジュール性など、有限混合分布の有用な特徴について述べている。

第3章「学習における汎化とEMアルゴリズム」では、統計モデルを有限個のサンプルから学習する際に問題となる汎化の問題と、有限混合分布モデルの学習アルゴリズムとして知られているEM (Expectation-Maximization) アルゴリズムについて従来の知見をまとめている。まず、学習を統計モデルの最尤推定とみなし、学習によって生じるバイアスについて述べ、有限混合分布が最尤推定において冗長性や特異性をもつことに触れ、有限混合分布について調べることの意義について述べている。次に、有限混合分布に対するEMアルゴリズムについて定式化を行い、更に幾何学的な意味づけについても述べている。

第4章「正規混合分布の汎化バイアスの非単調性」では、Radial Basis Boltzmann Machine (RBBM) と呼ばれるあるクラスの正規混合分布モデルの汎化能力について調べている。まず、RBBMが温度と呼ばれるパラメータを変化させることによって階層的クラスタリングに対応する分岐現象を示し、モデルの複雑度が温度によって制御可能であることを述べている。次に、分布に関する対称性の仮定の下で、その分岐が4次のキュムラントによって分類できることを示している。さらに、その結果に基づいて、分岐点の前後での尤度のバイアスについて調べ、分岐点以下の温度では温度に比例してバイアスが増えるのに対し、分岐点を越えたところでは垂直の傾きでバイアスが減少することを示している。従来、モデルの複雑度が増えるにつれてバイアスは単調に増加するものと考えられているが、本論文で示している結果は、複雑なモデルの方が単純なモデルよりも高い汎化能力をもつ場合が存在するという、従来の考え方に反する例となっている。また、これらの結果を計算機実験によって確認している。

第5章「確率分布の位置、尺度、回転パラメータの学習法」では、正規混合分布モデルのEMアルゴリズムを応用し、任意に与えられた分布の位置・尺度・回転パラメータに対する学習アルゴリズムを提案している。まず、与えられた分布を必要な精度で近似し、その上でEMアルゴリズムの拡張であるECM (Expectation-Constrained Maximization) アルゴリズムを適用することにより、任意の次元で位置・尺度パラメータを持つ場合と、2次元で位置・尺度・回転パラメータを持つ場合の2つの場合について、2次方程式の解として閉じた形の更新式が得られている。この結果は、単純な正規分布がEMアルゴリズムによって1次方程式の解として得られているものの拡張ととらえることもでき、EMアルゴリズムが一般に、難しい学習の問題を単純化できる可能性を持つことを示すものである。

第6章「複数情報源からの概念獲得」では、有限混合分布をパターン的な情報の中に隠れた記号的情報を扱うためのモデルととらえ、属性概念獲得課題を設定し、モデルの適用を試みている。まず、そのような課題の単純だが典型的な例題として、複数情報源からの属性概念獲得の問題を設定している。この問題は、発達心理学における概念形成の研究や、マルチモーダルなユーザインタフェースにおける環境適応の研究などに対して有用な問題である。次に、この問題を解くための段階として、情報源固有の特徴抽出、情報源間の共通特徴の抽出を行った上で、最終的には有限混合分布によって属性情報を獲得するという枠組を設定している。この際、EMアルゴリズムが不適切な局所最適解に収束しないよう、問題に依存した初期値の設定法にも工夫を加えている。さらに、これらの枠組を実際の画像と音声の組に対して適用実験を行い、比較的基本的な手法の組合せであるにも関わらず、未知サンプルに対しても高い学習性能結果が得られている。

第7章「結論」では、本研究の成果についてまとめを行い、今後の課題、展望を述べている。

以上を要するに、本論文は、理論的にも応用上も重要な統計モデルである有限混合分布とその学習について調べ、その汎化能力については従来考えられたのとは異なる振舞いを示すことを理論的に明らかにし、学習アルゴリズムについては従来の単純な正規混合分布の学習法を拡張した形のアルゴリズムを導出し、更に有限混合分布によるモデル化によって新たな学習モデルの枠組を提示している。これらの成果は、統計学や人工知能をはじめとする学習に関わる研究において有用な知見や手段を提供するものである。よって本論文は、博士(工学)の学位論文として合格と認める。