

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 相馬 輔

現代の科学技術においては、大量のデータから有益な情報を抽出し、正確に伝送することが求められている。大量のデータから有益な情報を抽出する手法として、機械学習による方法が注目を集めている。また、情報通信の分野においては、中継地点で演算を許すネットワーク符号化と呼ばれる通信方式や、解構造の疎性を仮定して計測データの解析を行う圧縮センシングが新たに提案され、研究されている。これらの技法を実際に有用なものとするには、多数の選択肢の中で最も適切なものを選ぶ最適化手法を洗練させていくことが必要不可欠である。本論文は、このように重要性の高まっている機械学習と情報通信の分野における複数の課題に対して、効率的で質の高い最適化手法を新たに提案している。

本論文は「Submodular and Sparse Optimization Methods for Machine Learning and Communication」(機械学習と通信のための劣モジュラ・スパース最適化手法)と題し、11章からなる。

第1章「Introduction」(序論)では、本論文での研究対象となる劣モジュラ関数最大化、行列補完、圧縮センシングに関して、研究背景と研究目的を説明するとともに、研究成果の概要を紹介している。

第2章「Submodular Functions, Matroids, and Polymatroids」(劣モジュラ関数、マトロイド、ポリマトロイド)では、本論文を通じて重要な役割を果たす離散構造に関して、重要な性質を纏め、数学的な準備を提供している。

第3章「Submodularity over the Integer Lattice and Budget Allocation」(整数格子点上の劣モジュラ性と予算配分)では、影響力最大化、文書要約、センサー配置など、機械学習分野で研究されてきた劣モジュラ集合関数最大化によるモデル化と近似アルゴリズムの概況を述べた後に、広告予算配分問題を例として、整数格子点上の劣モジュラ関数最大化の必要性を解説している。また、集合関数における劣モジュラ性と限界効用逓減性が等価であるのに対して、整数格子点上に自然な一般化を考えた際には、両者が異なる概念となることを指摘し、整数格子点上で限界効用逓減性を有する劣モジュラ関数の最大化問題を提唱している。

第4章「Monotone Submodular Function Maximization over the Integer Lattice」(整数格子点上の単調劣モジュラ関数最大化)では、基数制約、ポリマトロイド、ナップサック制約等の制約条件下で整数格子点上の劣モジュラ関数最大化問題に対する近似アルゴリズムを設計し、近似比と計算時間に関する理論的な保証を与えている。

第5章「The Diminishing Return Submodular Cover Problem」(限界効用逓減劣モジュラ被覆問題)では、劣モジュラ被覆問題を一般化して、限界効用逓減性を満たす整数格子点上の劣モジュラ関数を用いた枠組みを導入するとともに、一般化された問題に対する近似アルゴリズムを設計し、近似性能と計算時間を理論と実験の両面から解析している。

第6章「Introduction to Matrix Completion」(行列補完への導入)では、第7章と第8章の準備と

して、行列補完問題に関する先行研究を紹介している。

第7章「Faster Algorithm for Multicasting in Linear Deterministic Relay Network」（線形決定性中継ネットワークにおけるマルチキャストの高速アルゴリズム）では、1地点から指定された複数の地点へ同時に情報を送るマルチキャスト通信において、各中継点で線形演算を行うネットワーク符号化の方式を見出す方法として従来のもよりも効率的な決定性アルゴリズムを与えている。

第8章「The Low-Rank Basis Problem for a Matrix Subspace」（行列部分空間における低階数基底問題）では、ユークリッド空間の線形部分空間に対して疎な基底を求める問題の一般化として、定められたサイズの行列全体のなす線形空間の中で与えられた線形部分空間に対して階数の和が最小となるような基底を求める問題を新たに導入し、実用的な数値解法を与えている。さらに、提案手法の性能を人工的に作成されたデータと実際の画像データを用いた計算機実験によって評価している。

第9章「Introduction to Compressed Sensing」（圧縮センシングへの導入）では、解構造の疎性を仮定して計測データを解析する手法である圧縮センシングに関する先行研究を簡潔に紹介している。

第10章「Nonconvex Compressed Sensing with the Sum of Squares Method」（二乗和多項式法による非凸圧縮センシング）では、圧縮センシング問題の緩和問題として、非凸最適化問題を用いる枠組みに対して、二乗和多項式の手法を用いて、安定な信号復元を見出す多項式時間アルゴリズムの存在を示している。

最後に第11章「Conclusion」（結論）では、本論文の成果を簡潔に纏めると共に、今後の研究課題を提示している。

以上を要するに、本論文は機械学習分野や情報通信分野で現れる最適化問題に対して、最新の理論的成果を踏まえた効率的なアルゴリズムを新たに提案している。その内容は多岐に渡るが、一貫して劣モジュラ関数・マトロイドといった離散構造や二乗和多項式・行列補完などの連続最適化手法を有効に利用しており、理論と実用の両面から、数理情報学の発展に大きく寄与している。

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。