

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 藤井海斗

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機械学習によって抽出することが重要とされている。そのために、能動学習や特徴選択と呼ばれる手法が知られている。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。

機械学習に現れる多くの組合せ最適化においては、目的関数が劣モジュラ性に近い性質を示すことが指摘されている。一般に劣モジュラ関数の最大化問題は、NP困難であるが、様々な制約条件の問題設定において、定数近似比の近似アルゴリズムが知られている。特に、基数制約下での単調劣モジュラ関数最大化に対しては、貪欲アルゴリズムによって、定数近似比が保証された近似解が効率的に得られる。さらに、目的関数が厳密には劣モジュラ関数ではない場合にも、同様のアルゴリズムを適用した場合の近似比を劣モジュラ関数との近さの指標となる劣モジュラ比を用いて評価できることが知られている。

本論文では、適応的劣モジュラ比の概念を新たに導入することによって、能動学習における現実的な状況を反映した適応的な問題設定においても、同様の結果が得られることを明らかにしている。また、局所探索に基づく近似アルゴリズムの性能を評価するための近似的劣モジュラ性の概念も導入し、辞書選択の高速アルゴリズムの設計に応用している。

本論文は「Approximate Submodularity in Machine Learning」（機械学習における近似的劣モジュラ性）と題し、全部で7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性と近似劣モジュラ性に関して、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「Background and Related Work」（背景と関連研究）では、劣モジュラ関数最大化の近似アルゴリズムを概説した後、近似劣モジュラ性の概念を紹介し、スパース線形回帰のための特徴選択との関連を説明している。さらに、適応的劣モジュラ性に関する先行研究を解説している。

第3章「Approximation Guarantees of Greedy Policy with Adaptive Submodularity Ratio」（適応的劣モジュラ比による貪欲政策の近似保証）では、適応的劣モジュラ性への近さを定義する指標として、適応的劣モジュラ比の概念を導入し、これを用いて、適応的貪欲アルゴリズムの性能を評価している。さらに、影響力最大化や特徴選択に適用した場合の性能を計算機実験によって解析している。

第4章「Batch-mode Adaptive Optimization with Structured Queries」（構造化クエリによるバッチ適応的最適化）では、適応的貪欲アルゴリズムを小数のデータを纏めて選択してラベル付けを行う形に拡張して、近似精度を評価している。

第5章「Local Search for Feature Selection with Structured Constraints」（構造的制約を伴う特徴選択のための局所探索）では、グラフィカルモデリングにおける特徴選択の様に、構造的制約条件を伴う集合関数最大化問題に対して、局所探索による近似アルゴリズムを想定し、近似的劣モジュラ性

の概念を導入することによって、近似精度を理論的に評価している。さらに、局所探索アルゴリズムの性能を、スパース回帰やグラフィカルモデリングを例題として、計算機実験による解析を行っている。

第6章「Fast Greedy Algorithms for Dictionary Selection」（辞書選択のための高速貪欲アルゴリズム）では、局所探索のための近似的劣モジュラ性の概念を応用して、辞書選択問題に対する効率的な貪欲アルゴリズムを設計している。さらに、アルゴリズムの実際上の性能を画像処理をベンチマークとした計算機実験を通じて検証している。

最後に第7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で現れる組合せ最適化問題に対する近似アルゴリズムの設計と解析のために、近似劣モジュラ性の概念を拡張した新たな枠組みを提示することによって、実用上の意義のある理論的成果を与えている。本論文の成果は、劣モジュラ性を基軸とした組合せ最適化研究の応用範囲を大きく広げるものであり、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。