

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 伊藤 伸志

現代の情報化社会では、企業経営から日常生活に至るまでの様々な局面において、多数の選択肢の中から最善なものを見出す最適化問題に直面する。通常最適化問題では、与えられた制約条件を満たしつつ、定められた目的関数を最大または最小にする解を求める。しかし、現実問題では、制約条件や目的関数に関する情報が完全に与えられるとは限らない。そのため、不完全な情報に基づいて、何らかの意味で最適な選択を見出す手法の構築が求められる。

本論文で扱うオンライン最適化問題では、制約条件は確定的であるのに対し、目的関数が未知の状態では解を繰り返し選ぶ状況を想定している。この種のオンライン最適化問題のアルゴリズムの性能を評価する指標として、リグレットと呼ばれる量が広く採用されている。リグレットとは、各試行での目的関数値の総和と固定した解を毎回出力した場合の目的関数値の総和の最良値との差として定義される。従来のモデルとしては、各試行後に目的関数が開示される完全情報型の問題でリグレット比が解析されてきたが、近年では、各試行後に選択した解の目的関数値のみが開示されるバンディット型のモデルが、現実問題の設定をよりの確に反映したものとして注目を集めている。本論文は、計算量の多項式時間性をも考慮に入れた上で、不完全情報に基づくバンディット型の設定におけるリグレット比を解析し、完全情報型に劣らない性能を発揮し得ることを明らかにしている。

本論文は「Online Optimization with Limited Information」（限られた情報を用いたオンライン最適化）と題し、全部で9章からなる。

第1章「Introduction」（序論）は、本論文での研究対象となるオンライン最適化の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「Existing Results on Online Optimization」（オンライン最適化の既存研究）では、オンライン最適化の基本的な問題設定を述べると共に、主要な手法を紹介している。

第3章「Algorithms for Online Linear Optimization with Bandit Feedback」（バンディットフィードバックを用いたオンライン線形最適化）では、線形目的関数を有するバンディット型オンライン最適化という一般的な問題設定において、計算量が試行回数の線形オーダーであると共に、リグレットの上界が試行回数の平方根のオーダーとなるアルゴリズムを設計した。完全情報型の問題設定においてさえ、リグレットの下界が試行回数の平方根のオーダーになることが知られており、最適リグレットを達成している。これは、完全情報型の問題設定に較べて一見して難しいバンディット型においても性能に全く遜色のないアルゴリズムが設計できることを示したという点で、驚くべき結果である。

第4章「Tight Regret Bounds for Bandit Combinatorial Optimization」（バンディット組合せ最適化に対するタイトなリグレット下界）では、バンディット型オンライン組合せ最適化の様々な設定において、確率的な手法を用いて、リグレット下界を改善している。

第5章「Submodular Function Minimization with Noisy Evaluation Oracle」(雑音のある評価オラクルを用いた劣モジュラ関数最小化)では、バンディット劣モジュラ関数最小化問題に対して、目的関数が未知確率分布の独立同一分布に従うという仮定を導入し、評価指標として単純リグレットを採用することによって、従来手法よりも大きく改善された上界を示している。さらに、下界を構成することによって、試行回数に関するオーダーに関しては、単純リグレットを改善できないことを示している。

第6章「Price Optimization via Submodular Function Minimization」(劣モジュラ関数最小化による価格最適化)では、商品の値引き設定の最適化に劣モジュラ関数最小化を応用した手法を提案している。実際のデータを用いた実験によって、既存手法に対する計算量の面での優位性を示している。

第7章「Optimal Algorithm for Online Convex Optimization with Bandit Feedback」(バンディットフィードバックを用いたオンライン凸最適化の最適アルゴリズム)では、バンディット型のオンライン凸最適化問題に対して、目的関数が平滑で強凸かつ最適解が実行可能領域の内点であるという仮定の下で、最適リグレットを達成する多項式時間アルゴリズムを設計し、計算量も改善している。

第8章「Online Portfolio Selections with Combinatorial Constraints」(組合せ制約の下でのオンラインポートフォリオ選択)では、アセット数に上限があるといった組合せ的な制約を考慮した上で、逐次的にポートフォリオ選択を行うというオンライン最適化問題に対して、完全情報型とバンディット型の両方の問題設定において、アルゴリズムを設計してリグレットを解析している。特に、完全情報型の場合には、最適リグレットを達成している。

最後の第9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、機械学習分野を中心に最近注目を集めているオンライン最適化に関して、計算機科学の正統的な手法を駆使して、精度保証付きの効率的なアルゴリズムを設計している。いずれの研究成果も極めて高い水準にあり、オンライン最適化に関する知見に新たな境地を切り拓くことで、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であるのみならず、早期修了に値する特に優れた研究と認められる。