

審査の結果の要旨

氏名 包 含

本論文では、剰余リスク転移の学習理論を構築し、信頼性の高い学習アルゴリズムの構築や学習のメカニズムの解明においてリスク関数の設計の重要性を示している。一般的な機械学習手法が最適化する学習基準である代理リスクは、最終的な評価指標である目的リスクと異なっていたとしても、損失が適切に設計されていれば両者には単調な関係が存在することが明らかにされている。この単調性によって剰余リスク転移、すなわち代理リスクの剰余量の最小化によって目的リスクの剰余量の最小化が実現されるという関係性を得ることができ、結果的に、一般的に離散構造を持つが故に最適化が容易ではない目的リスクを用いる代わりに、最適化しやすい代理リスクを用いることが正当化されている。さらに、近年の学習問題は、二値分類や多値分類といった古典的な学習問題よりも複雑な構造を持つことが多い。本論文では、この拡張のために剰余リスク転移を予測に対するより多様な制約や性質と関連付けている。この関連付けは、従来理論が予測の正しさにのみ着目してきた点と大きく異なる。さらに、一見異なる二つの学習問題の間に関連性を見出すために剰余リスク転移を利用している。従来は、目的リスクが最終的な対象であり代理リスクはあくまで補助的な量とみなされてきたが、剰余リスク転移を利用することによって二つの学習問題の困難性の比較が可能となった。したがって、より広いクラスの学習問題の構造や学習問題からどのような知識を獲得できるかが明らかになり、解析の最終目的に対して必要最小限な学習問題を設計する指針を得ることが可能となる。

本論文は六章からなり、第一章では、本論文に関連する機械学習と統計的学習理論のこれまでの展開、成果をまとめ、その中での本論文の位置づけ、および貢献が説明されている。第二章では、教師付き学習の背景知識と本論文の展開に必要な理論がまとめられている。教師付き分類の定式化、汎化理論と代理誤差の古典的な解析方法について紹介され、分類適合的損失や proper loss といった関連する概念が最近の関連研究とともに紹介されている。第三章では、F値やJaccard指標といった複雑な評価指標を用いて分類器を評価する際に適切な代理目的関数の設計が示されている。これらの複雑な評価指標は、クラス不均衡な学習問題に対処するために頻繁に用いられており、線形分数型指標と呼ばれるクラスに属しているが古典的な代理損失を適用しにくい分解不可能性という性質を有している。本章では、目的となる評価指標の代理となる目的関数を適切に

設計することで、代理目的関数を最適化した際に評価指標が最適化されるための十分条件が導出されている。さまざまなベンチマークデータを用いた数値実験によって、特にデータ数が小さい状況下では、クラス事後確率に基づくプラグイン分類器と比較して、本論文の理論に基づき設計した代理目的関数が良い性能を有することが数値的に示されている。第四章では、敵対的攻撃に対して頑健な分類、すなわち敵対者がテスト入力に対して加える摂動に影響されにくい分類器の学習が検討されている。この学習問題は、摂動の大きさに対する制約下での最悪の分類誤差値を目的誤差とするミニマックス最適化として定式化されることが多い。従来の研究では、この最適化を緩和することに主眼が置かれているが、目的リスクの観点から緩和問題が正当化できるかどうかは知られていない。本章では、剰余リスク転移解析を用いて頑健な分類誤差に対して適合している代理損失を調べ、結果として線形モデルにおいて頑健な解が得られる凸な代理損失が存在しないことに加え、非凸損失を設計するために有用な指針を示している。第五章では、類似度学習と分類の関係性が議論されている。類似度学習は、二つのデータ間の関係性を予測することでデータの有用な表現を得るための枠組みである。学習した表現を用いて構成した分類器によって分類性能が向上されることが期待されているが、これまで理論的な背景はほとんど知られてなかった。本章では、類似度学習の特定の定式化が分類誤差と密接に関係していることが示されている。剰余リスク転移の観点から、この関係性によって類似度予測リスクの剰余量を最小化することで分類剰余リスクが最小化できることが示された。その結果、類似度学習は内部的には二値分類境界を学習しているという結果が得られている。第六章では、本論文の結論とこれからの課題が述べられている。

本論文は、剰余リスク転移の観点から学習理論の新しい展望を提示し、代理目的関数の設計理論、学習器の性質の解析、複数の学習問題の関係性の解析に対して具体的な解決策を与えるものであり、今後の研究への指針を示すという点で大きな貢献をなすものであり評価に値する。

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。