

氏名（本籍）	おおしま こうじ (東京都)
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	乙第 1107 号
学位授与の日付	2021 年 9 月 30 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	Online Machine Learning Algorithms to Optimize Performances of Complex Wireless Communication Systems (オンライン型機械学習アルゴリズムによる複雑無線通信システムの性能最適化に関する研究)

論文審査委員 (主査) 教授 長谷川幹雄
教授 植田 譲 教授 浜本 隆之
教授 吉田 孝博 教授 八嶋 弘幸
教授 伊丹 誠

論文内容の要旨

近年の無線通信技術の発展に伴い、無線通信技術の活用が社会の中で広く進むとともに、高密度なネットワークにおける通信品質の確保や、複雑化した無線システムの最適化が課題となっている。しかし、現在の無線システムでは制御対象パラメータが多岐にわたる上、各通信機器間の挙動が相互作用するため、適切なパラメータを自動的に選択することは非常に困難となっている。例えば、無線システムはその機能に応じてレイヤ別に機能が構成されており、無線信号を処理する物理レイヤ、無線接続や無線周波数リソースアクセスを管理する MAC レイヤ、IP に代表されるネットワークを管理するネットワークレイヤ、TCP や UDP に代表されるデータ転送を管理するトランスポートレイヤ、およびユーザレベルの通信トラフィックを管理するアプリケーションレイヤがあり、それぞれの規格によって挙動が規定されている。機能間の相互依存性を低くし、各レイヤの機能の増強や入れ替えを容易にするために、各レイヤの機能は基本的に疎結合になるように設計されている。これによって、共通の上位レイヤプロトコル（例えば TCP/IP）を、複数の無線方式（例えば IEEE 802.11 無線 LAN、LTE、5G 等）が利用できるような効率的かつ柔軟な無線機設計が可能となって

いる。一方で、各レイヤが独立に設計されるがゆえに、無線通信本来の目的に欠かせない通信品質の確保・向上を行うためには、無数にある各レイヤの様々なプロトコルを考慮した上で、無線システムのパラメータを最適化する必要が出てくる。しかし、無線信号の変調方式、利用する周波数帯域の特性や周波数帯域幅とそれに応じた無線送信電力、無線リソースへのアクセス制御方式等々、無線システムに関わる制御パラメータは多数に渡る。これらを、無線より上位レイヤのプロトコル挙動まで含めて End-to-End で最適化しようとする、極めて複雑な相互作用を考慮できるモデルを構築する必要がある。

これは、従来確立されてきた個別のプロトコル挙動の定式化に基づくモデル化では、現実的なモデルを構築することが不可能であることを意味する。5G、Beyond 5G、6G 等、今後ますます発展しさらに複雑化しつつある無線システムの性能を最適化するためには、この困難を解決することが必要不可欠である。

このような困難を解決するための新しい技術的方法論を発見することが本研究の目的である。近年発展著しい機械学習の技術は様々な分野で活用されつつあるが、通信の世界においても様々な手法での研究が行われている。通信分野における機械学習技術の応用例は、物理層信号処理への教師あり学習技術から、アプリケーションの Quality of Experience (QoE) 向上のための強化学習を用いた動的なレート制御等、多岐にわたる。すなわち、通信の各レイヤ、あるいは各プロトコル単位でそれぞれに活用方法の研究が進んでいる。多くの研究は、無線システム全体よりも個別のレイヤの最適化を焦点としており、また実現性を考慮する前の理論的な研究も多い。実際に機械学習を用いた無線通信関連の論文を本論文執筆時点で調査した限りでは、無線システム全体を視野に入れ、かつ試作機実験等を通じた実現性の検証まで行っているものは、全体の 10% に満たない。

通信の性能は最終的には End-to-End の通信品質によって規定されるものであり、そのためには通信端末内部の全レイヤ、および通信端点間の伝搬路全般に渡って最適化を行う必要がある。また、機械学習技術の実装を考えると、収集するデータは一般に多ければ多いほどよく、計算量は十分に確保されるのが望ましく、制御できるパラメータも多いほうが良い。しかし、現実無線システムを構築する場合を考えると、ハードウェア・ソフトウェア上の制約や、スケーラビリティの確保といった制約にも配慮が必要である。前述した通り、通信に機械学習を応用する研究は盛んに行われてきたが、すでに 5G サービスが世界及び日本でもスタートしており、Beyond 5G/6G の研究も開始されている現状に鑑み、今後は実際の無線機やモバイル端末への実装を見据えて、これらの制約を前提とした実現性の高い研究が必要なフェーズに移ってきたと思われる。

そこで本論文では、無線システム全体かつ End-to-End の通信性能最適化を目的とし、かつ理論的な整合性だけでなく実装可能性を考慮した機械学習の新しい活用方法を提案する。これは、各無線機に搭載した人工知能が環境を学習し自律的に最適な動作を選択する、インテリジェントな無線システム的设计検討でもある。これらの具体的な応用例を検討し、実無線機で有効性の検証も行う。

学習に基づくインテリジェントな無線システムは、取得できる情報や制御できるパラメ

ータが多ければ多いほど、その性能向上が大きく見込める。しかし、ソフトウェアあるいはハードウェア上の制約等により、現実無線システムが運用される場合には、これらが量的にも質的にも限られた環境にならざるを得ない。Deep Q-Learning (DQL) に代表される深層学習 (Deep Learning) と強化学習の一種である Q-Learning を組み合わせた手法が盛んに研究されているが、モバイル端末等の実無線機への適用を考えると、データ量や計算量の点で実現へのハードルは高い。そこで本論文では、処理性能や取得できる情報が相対的に少ない、制約のある環境でも適用可能な、モデルベースで End-to-End の通信性能最適化を行うアルゴリズムを提唱する。具体的には、無線機の外部環境および内部要件を考慮した適応型システムとして知られるコグニティブ無線システムを念頭に、深層学習に頼らず End-to-End の通信最適化を可能とする、機械学習を用いたシステムモデルベースの最適化アルゴリズムを検討する。また、実現性に鑑み、IEEE 802.11 無線 LAN 機器への実装例とその評価検証を行う。

さらに、より強い制約をもつ環境で運用される IoT 機器等の無線システムを想定し、軽量の強化学習アルゴリズムを用いた自律分散制御型の性能最適化手法を検討する。モバイル端末によるヘテロジニアスネットワークにおけるネットワーク選択を例として、強化学習アルゴリズムをモバイル端末に実装し、実証実験でその有効性を評価検証する。

これらの研究成果が切り開いた見地を基にして、具体的な応用分野として超遅延通信環境である宇宙通信の分野において、コグニティブサイクルベースの機械学習を用いた最適化アルゴリズムの研究が進んでいる。また、よりレーザーカオスを用いて高速な意思決定を行う無線システムの意思決定アルゴリズムや、5G 要件でもある超多端末の Massive IoT シナリオで適用可能な軽量かつ効果的な強化学習アルゴリズムを搭載したセンサネットワーク等の研究成果が生まれている。

以上要するに、本論文は、複雑なレイヤ構成および通信ネットワークで運用される無線システムを機械学習技術によって性能最適化する手法について、従来の各レイヤ単独の性能最適化にとどまっていた状況を打破し、かつ実用性にも考慮した上で通信端点同士の End-to-End 通信性能最適化を実現するための枠組みを提案し、実無線機を用いてその応用例の有効性を実証するものである。本研究の成果は、今後より複雑化する通信ネットワークにおいて自律分散制御型の通信性能最適化を行うための汎用的な枠組みを提示するものであり、より実現性の高い機械学習を用いた無線システム最適化という新たな分野を開拓するものである。

論文審査の結果の要旨

本論文では、学長事務取扱からの審査付託を受けて、標記6名の審査委員で構成する審査委員会を組織し、提出された学位論文について審査を行った。

審査委員会においては、学位申請者から、学位論文の内容や前回審査における指摘事項の対応結果について説明させ、その後、質疑応答を実施することで、博士論文として

満たすべき条件や必要な修正点を確認するという形式で進めた。

本論文では、機械学習アルゴリズムを応用することによって、無線通信システムの性能を最適化する研究を行っている。近年の無線通信ネットワークは、送信元から宛先までの間で、様々なネットワーク、様々なプロトコルを経由する非常に複雑なシステムとなっている。従来研究では、個々のネットワーク、個々のプロトコルを対象とした最適化は行われてきたが、送信元から宛先までエンドツーエンドの通信性能を改善するには、複雑な通信システムを総合的に扱う必要がある。そこで本論文では、無線エンドツーエンド通信を、機械学習を応用することによって最適化することを試みている。本論文の1つ目の成果は、機械学習と最適化アルゴリズムによって構成するフィードバックループの提案であり、実験実験およびシミュレーションによって有効性を示している。2つ目の成果は、強化学習によって通信品質の良いネットワークやチャネルを動的に選択可能とするアルゴリズムの提案であり、実験によって有効性を実証している。これらの提案アルゴリズムは様々な無線通信システムに応用可能であり、更なる発展が期待される。

第1回審査では、学位申請者から学位論文の内容について発表があった。主に、以下の点について審査委員から指摘があった。

- (1) 機械学習を用いた二つの提案方式の利点を明確にすること。
- (2) 論文の完成度をあげること。プレゼンテーションは論文に合わせたものとする。
- (3) 対象としている宇宙通信システムの物理層や通信方式等を明確にすること。

第2回審査では、第1回審査における指摘事項を反映させた発表があった。改善は確認されたが、主に、以下の点について審査委員から指摘があった。

- (1) 機械学習を用いた二つの提案手法がどのような無線通信システムに対して有効となるかさらに整理すること。
- (2) 地球と月の間の長距離通信で利用される方式、物理層パラメータを再確認すること。
- (3) 他手法の問題点および提案手法の有効性を明確に整理すること。

第3回審査では、公聴会を兼ねて実施し、これまでの審査での指摘事項を踏まえて修正した内容の発表があった。尚、伊丹教授は審査会当日欠席であったが、別途審査を行った。審査委員、および、公聴会出席者から、主に以下のような質問があった。

- (1) 地球と月の間よりもさらに長距離な宇宙通信への応用方法について
- (2) スループットフェアネスの定式化の方法について
- (3) 提案手法によって最適化したパラメータの反映や切り替えの影響について
- (4) 深層強化学習等を用いた従来法と提案手法の特徴や有効性の違いについて

学位論文申請者は、これらの質問に対して全て適切に回答し、質問者および審査委員からの了解が得られた。

以上により、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。