

論文審査の結果の要旨

氏名：伊藤 真

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：トラヒックエンジニアリングにおける負荷分散を考慮した機械学習によるリアルタイム経路設計法に関する研究

審査委員：（主査）教授 源 田 浩 一

（副査）教授 菊 間 一 宏 准教授 見 越 大 樹

東京都市大学教授 塩 本 公 平 福井大学教授 橋 拓 至

全国規模の通信ネットワークの運用において、ネットワークを流れるトラヒックの急増に対する負荷分散を考慮した経路設計や装置及び回線の故障に備える代替経路の設計を行うトラヒックエンジニアリングが注目されている。こうした経路設計においては、全ての拠点間のトラヒック経路を確実に設計出来、トラヒックの急増を吸収するために回線使用量の削減が求められる。さらに、迅速に対応するために経路計算時間の短縮が必要である。従来の経路設計法であるダイクストラ法や線形計画問題に基づく設計法は、それぞれ回線使用量が増大する課題や膨大な計算時間を要し迅速な経路設計が困難となる課題がある。また最近注目されている機械学習を用いた経路設計は、迅速な経路設計が可能であるが、経路設計の成功率が大きく低下する課題がある。

このようなことから、本研究では、負荷分散や代替経路を考慮した深層学習モデルと教師信号を導入した機械学習による経路設計法を提案し、代表的なネットワークモデルに対する性能評価等を通して提案方式の有効性を明らかにすることを目的としている。

本論文は、以下6章から構成されている。

第1章では、本研究の背景となるトラヒックエンジニアリングの必要性、およびその課題を示し、本研究の目的を示した。

トラヒックエンジニアリングでは、負荷分散を考慮した経路設計を行うが、最適な経路を設計するためには、ダイクストラ法や線形計画問題に基づく設計法が利用される。それぞれ回線使用量が増大する課題や膨大な計算時間を要し迅速な経路設計が困難となる課題を指摘し、機械学習による迅速な経路設計の必要性を明らかにした。

第2章では、従来の機械学習を用いた経路設計法について紹介し、迅速な経路設計が可能であるが経路設計の成功率が低下する課題があることを示した。

従来の機械学習を用いた経路設計法では、全拠点間のトラヒック経路の設計成功率が30%以下となることが示されており、設計成功率の向上が課題である。また、Seq2Seqモデルを用いた深層学習モデルによる経路設計法も検討されているが、1つの拠点間トラヒックを設計対象としているため、ネットワークを流れる全ての拠点間トラヒックの負荷分散を考慮した経路設計ができず、回線負荷が増大することを指摘した。

以上から、ネットワークの全拠点間のトラヒック経路を負荷分散を考慮して一括して迅速に設計するこ

とが必要であることを示した。

第3章では、ダイクストラ法による負荷分散を考慮した経路をワンホットベクトルで表す教師信号と、全拠点間のトラフィック経路を一括して設計可能とする深層学習モデルを導入した経路設計法を提案した。適切な中間層の深さ、学習用データセット数およびテストデータセット数の検討を踏まえて、代表的な小規模のネットワークモデルを用いて提案方式の性能評価を行い、以下を明らかにした。

- A) 提案方式は、リンクコストを残余帯域の逆数とした動的ダイクストラ法と同等の負荷分散された経路を約99%の経路設計成功率かつ100ミリ秒以下の計算時間で経路設計できる。
- B) Seq2Seqモデルを用いた深層学習方式と比べ高い経路設計成功率かつ回線負荷を低減した経路を設計できる。

以上の結果から、提案方式は、高い経路設計成功率で回線使用率を考慮した負荷分散された経路を迅速に設計可能であることを明らかにした。

第4章では、線形計画法による最適な負荷分散を考慮した経路に基づく教師信号を用いて提案法の有効性を評価した。はじめに、整数線形計画法を用いて最大回線使用率、および、平均利用回線数を最小化する経路設計法を検討し、この方式によって得られた経路から教師信号を作成した。次に、当該教師信号に用いて学習を行い、代表的な小規模のネットワークモデルを用いて性能評価を行い、以下を明らかにした。

- A) 提案方式は、整数線形計画法を学習した場合においても、約99%の経路設計成功率である。
- B) 提案方式は、動的ダイクストラ法を学習した場合と比較して回線負荷を約20%低減し、整数線形計画法と比較して回線負荷が約30%増大する。
- C) 提案方式は、整数線形計画法を学習した場合においても、迅速に計算が行え、整数線形計画法と比較して計算時間を約80%削減できる。

以上の結果から、提案方式は、整数線形計画法を教師信号に用いることで、リンクコストを残余帯域の逆数とした動的ダイクストラ法と比較して回線負荷を改善し、整数線形計画法と比較して迅速に経路設計が行えるため、トラフィックエンジニアリングに適用可能な方式であることを明らかにした。

第5章では、第3章で導入した深層学習モデルを主経路と代替経路を同時に設計する深層学習モデルに拡張した代替経路の設計法を提案した。主経路と代替経路を同時に設計するために深層学習モデルの出力層を改良した。教師信号には、リンクコストを残余帯域の逆数とした動的ダイクストラ法を用いた。代表的な小規模のネットワークモデルを用いて性能評価を行い、以下を明らかにした。

- A) 提案方式は、主経路と代替経路を約99%の成功率で設計可能である。
- B) 提案方式は、動的ダイクストラ法と比較して、主経路の回線負荷が最大で10%増加、代替経路の回線負荷が約3%増加する。
- C) 提案方式は、主経路と代替経路の回線重複率が0.23%程度であり、低い回線重複率である。

以上の結果から、提案方式は、高い成功率で主経路と代替経路の設計が可能であり、提案した深層学習モデルが有効であることを明らかにしている。一方、回線重複率が低いものの、ネットワーク運用で使用するためには回線重複を回避する必要があり、回線重複率の改善を今後の課題として示した。

第6章は、本研究で得られた主な成果をまとめ、今後の課題と展望を示した。

以上のことから、本論文では、通信ネットワークのトラフィックエンジニアリングとして必要とされる負荷分散を考慮した全拠点間のトラフィック経路や代替経路を機械学習によってリアルタイムに設計する手法を提案し、性能評価等を通してその有用性を明らかにしている。

このように、本研究は、通信ネットワークにおいて増加し続けるトラフィックを効率的かつ高信頼に収容可能とし、さらに通信ネットワークにおける機械学習の効果的な活用に挑戦したものであり、今後の通信ネットワーク技術の発展と、通信ネットワークと機械学習の融合技術の進展に寄与するものと期待される。

このような研究成果が得られたことは、論文提出者の豊富な学識と優れた研究能力を裏付けるものである。よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和6年2月22日