

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

論文要旨

伊藤 真

インターネットを流れるトラフィックの総量は、インターネットサービスの拡充や端末の性能向上などを要因とし、増加の一途を辿っている。加えて、ライブ配信やストリーミング配信サービスの普及などを中心に誰もが容易に大容量な通信を行うようになってきており、ユーザあたりのトラフィック量も増加し続けている。これらは、ネットワーク内を流れるトラフィックの時間変動を大きくさせる要因となり、急激なトラフィックの増減を起因とした輻輳の発生を引き起こす可能性がある。一般的なインターネット通信は、ベストエフォート型のサービスであるため、トラフィックの優先度や重要度に関わらず、輻輳によりトラフィックが破棄されてしまう可能性がある。これは、通信経路がトラフィックの送信前に決定されるため、通信中に経路を変更することができず、ネットワーク状況に応じたトラフィック制御を行えないためである。このような問題を解決するための技術としてトラフィックエンジニアリング (TE:Traffic Engineering)がある。トラフィックエンジニアリングとは、サービスの品質を維持しながら、トラフィックを効率的に制御することで負荷分散を考慮した経路設計を行う。トラフィックエンジニアリングでは、輻輳発生を抑制することやスループットの最大化、故障発生を考慮した代替経路の設計など目的や要件に応じて多種多様な方式が検討されている。

本論文では、負荷分散を考慮した経路設計に焦点を当てる。負荷分散のための最も簡単なトラフィック制御法は、複数のトラフィックを同一経路ではなく、一部を迂回させ異なる経路を用いることで、ネットワーク資源を効率的に使用することである。加えて、現実的なネットワークではトラフィック変動に応じてリンクの使用帯域幅を最小化させるような経路設計が求められる。そのためには、ネットワーク全体のリンク使用率を考慮した集中管理型の経路設計を行うことに加えて、トラフィックの急増に迅速に対応するために、全拠点間トラフィックの経路設計に要する計算時間を削減する必要がある。しかし、これらの経路は一般的に複雑なアルゴリズムや線形計画法 (LP:Linear Programming)によって求められるため、計算量やスケラビリティの問題を無視することができないという課題がある。

このような経路計算における課題の解決に、機械学習技術を用いる研究が見られるようになってきた。これらの研究では、目的に合わせて機械学習モデルと教師信号を設計し、教師あり学習により生成した学習モデルを用いて、拠点間トラフィックの経路を設計させる方式や周期的にトラフィックを観測し強化学習を用いて、ルーティングプロトコルにおけるリンクコストを最適化する方式などが検討されている。機械学習技術を用いる最大の利点は、経路の計算時間を大幅に短縮できることである。複雑なアルゴリズムや線形計画法を用いた経路設計法では、一般的に膨大な計算時間を要し、最悪の場合は解を得られないこともある。これに対して、機械学習を用いた経路設計では、一般的に即時性が高く、非常に短い時間で解を得ることができる。また、更なる利点として、目的や要件に応じて、教師となる経路設計法を適宜変更し学習することで、学習モデルは様々な経路を設計することができることが挙げられる。以上より、教師となる経路設計法の特徴を正しく学習した機械学習モデルを作成することで、従来の経路設計法における計算時間の課題を解決しつつ、様々な要件に対応することができる汎用性の高い経路設計法として期待することができる。その一方で、従来の教師あり学習を用いた経路設計法では、ある単一の拠点間トラフィックに対して最適な経路の設計が行えるものの、複数の拠点間トラフィックに対して、ネットワーク全体を考慮しつつ、最適な送受信間経路を設計することはできない。これは、送信元から宛先ノード間全体を学習させた場合に、学習精度が著しく低下することで、十分な経路設計が行えないためである。

また、強化学習を用いた経路設計法でも、拠点間トラヒックの経路最適化は行えるものの、複数の拠点間トラヒックに対してネットワーク全体を考慮した経路の最適化は行えない。

以上のような背景より、本研究では、ネットワーク全体を考慮した複数の拠点間トラヒックからなるデマンド集合に対して、負荷分散を考慮した機械学習による集中管理型のリアルタイム経路設計法を検討することを目的とした。はじめに、集中管理型の経路設計を行うための深層学習モデルと入出力教師信号を設計し、教師信号にリンクコストを残余帯域の逆数とした Dijkstra 法を用いて学習させた。学習モデルは様々なトポロジの構造や帯域の幅環境下を用いてハイパーパラメータのチューニングを行い、最適な構造を検討した。これらの学習モデルを用いて、小規模および中規模トポロジに対する評価実験を行った。まず、経路設計成功率、最大負荷リンクにおける帯域使用率および経路計算時間の観点から Dijkstra 法と比較評価を行った。加えて、関連研究で検討されている seq2seq モデルを用いた経路設計法と比較評価を行った。また、耐故障性を評価するために、トポロジの変化に対する汎化性能評価を行い、これらの結果から提案方式の有効性を示した。

次に、教師信号に線形計画法を用いることで、提案方式の更なる性能向上を図る。そこで、ネットワーク全体の収容率向上と平均ホップ数の最小化を目的とした整数線形計画法を提案した。この経路を教師とし学習したモデルを用いて、実験用の小規模トポロジにおいて、経路設計成功率と最大負荷リンクにおける使用帯域幅および経路計算時間の観点から、Dijkstra 法、整数線形計画法、Dijkstra ベースの機械学習モデル、seq2seq 方式らと比較評価を行った。これらの結果から提案方式の有効性を示した。

また、トラヒックエンジニアリングにおける代替経路の設計に対して、機械学習を用いた方式を検討した。代替経路は主経路と全く異なる経路であることが望ましいため、主経路に応じて適切に設計する必要がある。そこで、ある入力に対して同時に主経路と代替経路を設計する機械学習を用いた経路設計法を提案した。評価実験により、主経路と代替経路を同時に高い成功率で設計できることと、これらの経路が非常に低いリンク重複率であることを示した。

本論文を要約すると以下の通りである。

第1章は、「序論」であり、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、これらを踏まえて、本研究の目的を明らかにした。

第2章の「関連研究」では、従来の機械学習を用いた経路設計法について紹介する。特に、それぞれの方式において、適用範囲や目的、性能に触れ、提案方式との差異を説明する。以上より、本論文の目的である負荷分散を考慮した機械学習による集中管理型のリアルタイム経路設計法を検討する必要性を示した。

第3章の「輻輳制御のための Dijkstra 法ベースの深層学習を用いた経路設計法」では、機械学習を用いた集中管理型の経路設計の課題を紹介し、そのための深層学習モデルおよび教師信号の設計を行う。このモデルを用いて実験用の小規模トポロジを用いて性能評価を行う。しかしながら、この学習モデルでは、中規模トポロジにおいて十分な経路設計成功率を達成できない。そこで、学習モデルを改良し、回帰型深層学習モデルを提案する。このモデルを用いて評価用の中規模トポロジにおける性能評価を行う。この実験により回帰型モデルの性

能と限界について明らかにした。加えて深層学習モデルの性能と限界について検討するために、実際のネットワークの状況を想定し、経路設計を行うネットワーク内の各リンクの帯域幅が不均一であるようなトポロジに対する性能評価を行う。この実験により、アンサンブル学習を用いることで、ネットワーク内の帯域幅が不均一な状況であっても、非常に高い精度で輻輳制御された経路を設計できることを明らかにした。これまでの結果を受けて、新しい学習モデルを提案する。新しい深層学習モデルとして、中間層を分割することで、それぞれの中間層がある拠点間トラヒックの経路を学習する方式を提案する。このモデルを用いて評価用の小中規模トポロジを用いて性能評価を行う。提案方式は、リンクコストを残余帯域の逆数とした Dijkstra 法と同等の負荷分散された経路を 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ことを示した。

第 4 章の「輻輳制御のための整数線形計画法ベースの深層学習を用いた経路設計法」では、更なる性能向上を果たすために、教師信号として整数線形計画法を用いることを検討する。はじめに、整数線形計画法を用いてネットワーク全体の収容率を改善しつつ、平均ホップ数を最小化するような経路設計法を検討し、この経路を教師信号として作成する。次に、深層学習モデルにこの教師信号を用いて学習を行い、実験用の小規模トポロジを用いて性能評価を行う。提案方式は、リンクコストを残余帯域の逆数とした Dijkstra 法と比較して、最大負荷リンクにおける使用帯域幅を改善し、整数線形計画法と比較して短い時間で経路設計が行えることを示した。

第 5 章の「代替経路設計のための Dijkstra 法ベースの深層学習を用いた経路設計法」では、トラヒックエンジニアリングにおける目的の一つである代替経路の設計に着目し、機械学習モデルを用いて経路設計を行うことを検討する。代替経路の設計には、主経路と代替経路を同時に設計することが望ましいため、機械学習モデルの出力層を改良する。性能評価により、提案方式はあるトラヒックデマンドに対して、主経路と代替経路を同時に設計することができる。また、これらの経路は主経路とのリンク重複率が低い代替経路を設計できることを示した。

第 6 章の「結論」では、本研究で得られた主な結果を各章ごとに取りまとめ、今後の課題と展望を示した。

以上、本論文では、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を行い、Dijkstra 法ベースおよび線形計画法ベースの輻輳制御のための深層学習を用いた集中管理型の経路設計法、代替経路設計のための深層学習を用いた経路設計法について、それぞれ新たな方式を提案するとともに、提案方式の有効性を明らかにしている。これらの研究成果は、Dijkstra 法より最大負荷リンクの使用帯域幅を低減した経路を線形計画法より短い時間で設計することが可能であり、今後のより優れたトラヒックエンジニアリングの実現を果たすための重要な技術となるものである。