

氏 名 Tossaphol Settawatcharawanit

学位(専攻分野) 博士(情報学)

学位記番号 総研大甲第 2158 号

学位授与の日付 2020 年 3 月 24 日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 A Stretch Bounding Approach for Segment Routing Traffic  
Engineering

論文審査委員 主 査 教授 計 宇生  
准教授 阿部 俊二  
准教授 福田 健介  
准教授 鯉淵 道紘  
教授 張 勇兵  
筑波大学 システム情報系

(Form 3)

## Summary of Doctoral Thesis

Name in full Tossaphol Settawatcharawanit

Title A Stretch Bounding Approach for Segment Routing Traffic Engineering

The unprecedented growth of network traffic has brought excessive challenges to network operators. To prevent network congestion, network operators conduct traffic engineering (TE) for their routing optimization. In addition, network operators are motivated to optimize their resource utilization by the highly competitive nature of communication network industries and also paramount costs of operating a sheer volume of network resources. However, it is not trivial to perform traffic engineering in dynamic systems since there are many involved processes (e.g. traffic monitoring and traffic approximation) and also requirements (e.g. computation interval for TE).

In recent years, segment routing traffic engineering (SRTE) has emerged as one of the promising approaches for traffic engineering because of its high scalability and low control overheads. By leveraging the source routing paradigm, SRTE embeds routing paths into packet headers in which simplifying the control plane of TE. However, many studies have shown that conventional SRTE approaches in large-scale networks are computationally prohibitive, which may lead to delayed system operations and unsatisfactory service qualities. This contradicts the practice that, generally, network operators require to recompute their TE program within a predefined time limit (e.g. 5-10 minutes). Many studies have tried to find solutions to meet this time requirement but at the expense of sacrificing network link utilization.

To make the SRTE problem practical, we first consider an approach to reduce the problem size of SRTE based on bounding the routing stretch. Even though the stretch bounding approaches have been studied in wireless sensor networks as an approach to restricting routing length, it remains unknown how the stretch bounding approach can be applied to SRTE. We formulate an SRTE problem based on stretch bounding with an objective to minimize network congestion (i.e. minimize the maximum link utilization). Since optimization is usually done systematically in general SRTE approaches, this motivated us to approach the problem differently. In other words, in the general SRTE, the same set of intermediate node is used for every flows in the network, which results in poor link utilization. In our scheme, we look into the details of the problem and cut the search space of the problem by means of stretch bounding. This allows us to construct different candidate intermediate node set for each source-destination

pair by which help to balance the congestion efficiently.

The stretch bounding approach helps limit the number of candidate for intermediate nodes; the intermediate node that is too far away---if the intermediate node is used, it will occupy the link capacity along with every link on the path---will not be selected since they are not very useful for the solution. We then proposed an algorithm design for the problem in which candidate intermediate nodes sets can be selected efficiently, thus reducing the problem size. As a result, the computation time is significantly reduced as compared to the State-of-the-Art approach. Simulation results show that the computation time can be reduced significantly, while maximum link utilization can be kept near-optimal.

However, if network operators desire to control the computation time further, the problem will become more complicated. To this end, we proposed to study a trade-off relationship between computation time and link utilization in SRTE. As for SRTE problem, one can reduce the problem size by mean of reducing candidate intermediate nodes at the cost of higher link utilization. On the other hand, the link utilization can be reduced by means of having more nodes as candidate intermediate nodes sets. These two objectives can be seen as conflicting objective functions. Thus, we are motivated to formulate SRTE problem to characterize this trade-off relationship as a bi-objective mixed-integer nonlinear program (BOMINLP).

Due to the hardness of the BOMINLP (i.e. conflicting objective function, mixed decision variables, and nonlinear constraints), there is no solution approach to solve the problem directly. To this end, we are motivated to decompose the problem into two sequential sub-problems. The first sub-problem is to minimize computation time through node selection, and the second one is to minimize maximum link utilization via flow assignment.

For node selection, we leverage the monotonically increasing relationship of the number of candidate intermediate node and computation time in general SRTE to model the problem. Then, we solve the problem with randomized sampling based on the stretch bounding approach in which we leverage partial information regarding the relationship of the number of candidate intermediate node and computation time through the regulatory coefficient. Next, we eliminate candidate intermediate node based on the result of the node selection problem, and we solve a linear program (LP) using existing software tools for the sub-problems, respectively.

We then evaluate the proposed approach based on real traffic matrices and real network topologies from publicly available datasets. The simulation results show that our proposed approach help balance the two performance metrics effectively and efficiently as compared with several comparison approaches. In

addition, the results show that the computation time on all tested network topologies can be kept within network operators' predefined time limit. In brief, we formulate traffic engineering problems under two different objectives in SRTE, and we give practical and efficient solutions. From a theoretical standpoint, we leverage linear programming and problem decomposition to keep the solution space of the decomposed sub-problems intact after problem decomposition. Simulation results show that our approaches outperform other comparison approaches and have abilities to provide better performance and also shorter computation intervals for SRTE problem.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 Tossaphol Settawatcharawanit

論文題目 A Stretch Bounding Approach for Segment Routing Traffic Engineering

本論文は、ネットワークに流れるトラフィックを迂回させるセグメントルーティングによってネットワークの輻輳を軽減するトラフィックエンジニアリングの手法に関して行った出願者の研究内容をまとめたものである。セグメントルーティングでは、トラフィック（フロー）の始点から終点への経路を複数のセグメントに分けるための迂回点を探索する必要がある。ネットワークにおけるすべてのフローの迂回点を探索する組合せ最適化問題は、ネットワークの規模が大きくなるにつれ長い時間を要する。一方、ネットワークのサービス品質を保証するためにはトラフィックの変動に迅速に対応しなければならない。本研究の目的はより計算効率のよいセグメントルーティングによるトラフィックエンジニアリングのための制御アルゴリズムを見出すことである。

論文は5つの章から構成される。第1章と第2章で研究の背景と目的、および既存研究の説明を行い、第3章では経路伸長の制限によるセグメントルーティングに関する提案について述べている。提案手法では、無線センサネットワークなどで使われている経路伸長の概念を利用して、迂回点を通る経路の長さが最短経路に比べて一定の伸長率以内に限定する方法がとられている。それによって、迂回点の探索範囲を全てのネットワークノードから一部のノードに限定させる。経路伸長を限定することで、トラフィックエンジニアリングの性能を維持しながら、計算時間を大幅に減らすことが可能となる。100ノード規模のネットワークを使った性能評価では、最適解より5%以内の性能損失で最大で99.6%の計算量の削減が可能となる。

第4章では、セグメントルーティングにおける性能と計算時間のトレードオフの問題を解決するための提案について述べている。提案方法では、第3章で提案した経路伸長の制限で得られた迂回点の候補の中から、あらかじめ決められた迂回点候補集合の大きさに従ってランダムに選ぶ方法がとられている。さらに、性能の最大化と計算量の最小化の2つの目的を有する最適化問題として定式化し、それを解決するために、迂回点選択とフロー割当の2つの子問題に分割する方法が取られた。公開されているネットワークトポロジーとトラフィック行列のデータセットを使ったシミュレーションでは、提案アルゴリズムが経路伸長率と迂回点集合の大きさの2つのパラメータの調節によって、ネットワークトラフィックの変動に十分に対応できる計算量で高い性能の制御が可能であることを示した。

最後に、第5章では結論と研究結果の考察についてまとめ、今後の研究課題と展望を提示した。

なお、研究成果として、出願者は主著で査読付きジャーナル論文1篇を発表し、査読付き国際会議発表1件とその他の発表を行っており、電子情報通信学会総合大会英語セッション賞も受賞している。

以上を要するに、本論文はネットワークの輻輳を回避し、サービスの品質を保証するために行うトラフィックエンジニアリングのための経路制御アルゴリズムに関する課題を扱った内容である。研究では、経路の伸長を限定することなどにより計算量を削減し、トラフィックの変動に対応できる制御アルゴリズムを提案して、その有効性を示した。出願者が行った研究の学術レベルと実用的な意義が十分に高いと認められる。以上の理由により、審査委員会は、本論文が学位の授与に値すると判断した。