

氏 名 椎葉 瑠星

学位(専攻分野) 博士(情報学)

学位記番号 総研大甲第 2661 号

学位授与の日付 2026 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 Towards Practical Network Verification and Repair in Real-World Networks

論文審査委員 主 査 福田 健介
情報学コース 教授
計 宇生
情報学コース 教授
栗本 崇
情報学コース 教授
蓮尾 一郎
情報学コース 教授
井上 武
山梨大学 大学院総合研究部工学域 准教授

博士論文の要旨

氏名：椎葉 瑠星

論文題目：Towards Practical Network Verification and Repair in Real-World Networks

Computer networks, such as the Internet, serve as a critical infrastructure for modern society. As the number of users and services continues to grow, computer networks become larger and more complex, making it difficult for operators to manage them without failures. Misconfigurations of network devices (e.g., routers and switches) remain a primary cause of network failures, often resulting in significant downtime. To address this, researchers have explored network verification and configuration repair approaches. Network verification automatically checks whether given configurations satisfy high-level policies of operators, whereas configuration repair synthesizes configuration changes (i.e., patches to configuration parameters) to enforce those policies. Despite their promise, these techniques are not yet widely adopted in real-world operations.

This dissertation advances the practicality of network verification and configuration repair by addressing two key challenges that hinder real-world deployment. The first challenge is the difficulty of defining complete and correct specifications. To fully leverage these techniques, network operators must precisely describe forwarding behaviors (e.g., packet header constraints and forwarding paths) and network properties (e.g., reachability and waypoint traversal) as specifications for verification and repair. However, formalizing such specifications is increasingly difficult due to the inherent complexity of modern networks. To mitigate this burden, we propose two new approaches. The first approach reduces the operational burden of writing specifications for repair. Specifically, this approach (1) identifies unintended changes in forwarding behaviors caused by initial (incomplete) specifications and (2) iteratively refines these specifications to prevent such changes. This iterative process ensures the safety of automated repairs and guides operators toward complete specifications with minimal manual intervention. The second approach reduces the burden for data plane verification. This approach enables operators to symbolically analyze packet forwarding behaviors using only partial packet headers or forwarding paths. We develop a query language and scalable algorithms to extract forwarding behaviors matching given queries. By allowing for symbolic data plane analysis with partial header and/or path information, this approach leverages data plane verification to identify the causes and impacts of network failures without requiring comprehensive specifications.

The second problem is the lack of expressiveness in modeling recent sophisticated network functions (e.g., traffic engineering and service function chaining). Both verification and repair require precisely modeling packet forwarding behaviors with these functions. However, existing works often fail to model them with sufficient expressiveness while maintaining the scalability required for today's large-scale networks. To tackle this problem, we propose a new real-time data plane verification that simultaneously achieves high expressiveness and scalability. We develop a new data plane model to express sophisticated functions with formal network semantics and develop scalable verification algorithms on the model. This model and its algorithms enable operators to verify whether forwarding behaviors using these functions align with their intents in large-scale networks.

In all the works, we demonstrate the practical evaluation with real-world datasets (e.g., public WANs/LANs, production datacenter networks, and a real campus network), which show the scalability and effectiveness of our proposed approaches. Through these contributions, this dissertation makes the automated verification and repair techniques more accessible and reliable for real-world environments.

Results of the Doctoral Thesis Defense

博士論文審査結果

Name in Full

氏名 椎葉 瑠星

Title

論文題目 Towards Practical Network Verification and Repair in Real-World Networks

本学位論文は、「Towards Practical Network Verification and Repair in Real-World Networks (実ネットワーク環境におけるネットワーク検証および修復に関する研究)」と題し、英文で記述され、全七章から構成されている。

第一章「Introduction」では、現在の大規模化・高機能化されたネットワークの設計・運用に関する背景・問題設定・論文の寄与について、第二章「Background」ではネットワーク検証・修復・デバッグに関する関連研究について述べている。

第三章「Specification Refinement for Automatic Configuration Repair」では、与えられたネットワークの仕様を満たすようネットワーク設定(config)を自動修復するツールにおいて発生する、予期しない副作用を検出し修正用の追加仕様を合成するフレームワーク(ISR)の提案・実装・評価について述べている。理論的枠組みの異なる三種類の自動修復ツールを用いた評価では、ISRがそれぞれに対して短時間で副作用を打ち消す追加仕様を効率良く生成可能であることを示している。

第四章「Symbolic Extraction of Packet Forwarding Behaviors with Partial Queries」では、ネットワークのトラブル発生時に、その原因を絞り込むためのフレームワーク(Lupe)の提案・実装・評価について述べている。Lupeはルータにおけるパケットヘッダの制約や通過するパス情報に関して、ネットワーク運用者が部分的なクエリを行うことで、そのクエリにマッチするパケット転送挙動を列挙する機能を持つ。パスクエリ・ヘッダクエリを効率的に扱うデータ構造・探索アルゴリズムを開発したことで、従来手法に比べて数十倍から数百倍の速度で処理が可能であることを示している。また、二つの実ネットワークでのケーススタディを通じて、その有用性を示している。

第五章「Real-time Data Plane Verification for Large-scale Networks with Header Transformations」では、データセンター等で用いられる高機能ネットワーク技術である、ネットワークファンクションチェイニングのようなネットワーク内でのパケットヘッダの書き換えに対応可能な、データプレーンネットワーク検証フレームワーク(Graft)の設計・実装・評価について述べている。Graftでは経路制御のためのデータ構造およびグラフ探索を工夫することで、従来の検証アルゴリズムと比較して高速・スケーラブルに、ヘッダ書き換えを伴うネットワーク検証が可能であることを示している。同様に、実際のデータセンターネットワークのトポロジ・設定データを用いた評価により Graft の有用性を示している。

第六章「Discussion and Limitation」では、三つの研究課題に関するまとめ及び限界、今後の課題に

ついて述べ、第七章「Conclusion and Future Work」では結論を述べている。

公開発表会では博士論文の章立てに従って発表が行われ、その後に行われた論文審査会及び口述試験では、審査員からの質疑に対して適切に回答がなされた。質疑応答後に審査委員会を開催し、審査員で議論を行った。審査委員会では、出願者の博士研究がネットワーク設計・運用におけるネットワーク信頼性・セキュリティの向上に貢献することが評価された。

以上要するに本学位論文は、ネットワーク運用者がネットワークを設計・運用する際に問題となる、ネットワーク検証の仕様記述の難しさの低減および高機能ネットワークへの検証技術のサポートにおいて、それぞれ有用性を示したものである。また、本学位論文の成果は、学術雑誌論文一件、フルペーパー査読付国際会議論文二件として発表され、学術的な貢献も認められる。以上の理由により、審査委員会は、本学位論文が学位の授与に値すると判断した。