

早稲田大学大学院国際情報通信研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

**Backup Route Design for Reliable and
Sustainable Packet Networks**

高信頼パケットネットワークのための
予備経路設計法の研究

申 請 者

Shohei Kamamura
鎌村 星平

国際情報通信学専攻
分散コンピューティングシステム研究Ⅱ

2013年 2月

インターネットに代表されるパケット通信の中継機能は Internet Protocol (IP)によって提供され、近年は NTT NGN (Next Generation Network) のような通信キャリアの中継網基盤を構成する技術にまで発展した。パケット中継技術としての IP の最大の特徴は、網状態変化に対する適応性である。IP では、通信網の設備保守や故障等を契機に網の構成変化が発生すると、通信網を構成する各中継装置（以下、ルータと呼ぶ）が自律的に新たなパケット転送路（以下、パスと呼ぶ）を構築する。この自律的かつ適応的な制御により、網状態の変化に対して新たなパスが設定される。一方で、IP に基づく各ルータの自律制御を実現するためには、変化した網構成の把握、パスの再計算、及びルータが保持するパス情報の更新が、網状態変化の発生後に全ルータで行われる必要がある。これらの総処理時間(故障復旧時間)はルータの設定や網規模によっては数十秒を要する場合があります、この間、パスが存在しないパケットはルータによって廃棄されるため、キャリア中継網に要求されるサービス品質保証契約(SLA: Service Level Agreement)を満たす上での大きな障壁となる。

一方、IP と対比的なパケット中継技術として、コネクション指向のパスを提供する Multi-protocol Label Switching (MPLS)がある。この中継技術では、始終点ノード間のパスが明示的に設定可能であり、管理者による需要を予測した網設計に基づき運用される。MPLS では、1+1 パスプロテクション技術により、故障発生時の迅速な障害復旧が可能である。一方、現用、予備の両パスは網設計時に静的に決定されるため、IP のように想定外の網状態変化に対して柔軟にパスが提供できない課題がある。

本論文は、IP、MPLS 両技術を通信キャリアの中継網に適用する場合に必要な高信頼性を確保するため、上記課題の解決に向けて申請者が博士後期課程において行った研究成果をまとめたものである。IP については、キャリア中継網のような大規模網に適用可能な IP 高速経路復旧(IP-FRR:IP Fast Rerouting)方式およびその実装方法を提案し、MPLS については、故障への対処の緊急性を低減できる MPLS Dynamic Protection 方式を提案している。なお本論文は英語で記述されている。

以下、章ごとに概要を述べ、評価を加える。

第 1 章「Introduction」では、研究背景と研究の目的、及び本論文の位置づけと構成を示している。

第 2 章「IP Fast Rerouting using Spanning Tree-based Backup Topologies」では、既存の IP-FRR 方式の研究状況、および予備トポロジー数を最小化する予備トポロジー設計法を紹介している。IP-FRR では、複数の予備トポロジーに基づく予備パスを事前に用意しておくことで、高速故障復旧を実現する。IP-FRR で必要となるルーティングテーブル数が、予備トポロジー数に比例するとともに、使用する予備トポロジー識別子を伝達するために利用できるビット幅は有限であるため、IP-FRR の大規模網への適用可能性を担保す

るためには、予備トポロジ数削減が必要となる。各予備トポロジ上のノードと中継リンクが全域木を構成するように予備トポロジを設計することにより、単一の予備トポロジで救済できるリンク数が最大化されるため、必要な予備トポロジ数が従来方式と比較して最大で60%程度削減されることが示されている。

第3章「Loop-free IP Fast Rerouting considering Double link failures」では、第2章で述べたIP-FRRの障害救済範囲を単一障害から二重障害に拡大する方式について提案している。具体的には、転送ループの発生確率抑制と、予備トポロジ数増加の抑制について検討がなされた。

IP-FRRでは、二重障害が発生した場合、パケットヘッダの制約により、大規模網での故障箇所情報を各ノードに明示的に伝達できないため、転送ループが発生する可能性がある。そこで、予備トポロジの識別子に基づいて1度目に発生した故障位置を推定することで、ループの発生確率を抑制しつつ適用可能な網規模の制限を受けない新たなパケット転送方式を提案している。

救済範囲を単一障害から二重障害に拡大したとき、任意の2リンクがいずれかの予備トポロジ上で救済可能であることが障害復旧のための十分条件であるが、単一障害復旧の場合と比較して必要な予備トポロジ数が増加する。本章では、転送ループを回避する予備パスは予備トポロジの組合せにより提供可能であることを利用し、必要な予備トポロジ数を削減する予備トポロジ設計法を提案している。具体的には、パケットの中継に使用されやすいリンクを媒介中心性により求め、そのリンクが予備トポロジ上に出現する頻度を高めることにより、トポロジの組み合わせによる二重障害救済の可能性を高めている。

以上の提案により、100ノード規模のべき乗則網において、ループ発生確率を 10^{-3} オーダーに抑制可能なことをシミュレーションにより確認している。さらに、任意の2リンクを一つの予備トポロジ上で救済するベンチマーク方式と比較し、必要な予備トポロジ数を最大で50%程度削減可能であることも示されている。いずれも大きな改善効果が得られており、有効な方式であると評価できる。

第4章「Implementation design of IP Fast Rerouting using OpenFlow」では、OpenFlowを用いたIP-FRRの実装方式について提案している。IP-FRRの実装方法に関する具体的な議論はこれまで行われておらず、また商用ルータにおいても、予備トポロジを活用したIP-FRRの実装は存在しない。IP-FRRの実装普及の阻害要因としては、予備パスへの切り替えや予備トポロジ識別子のパケットヘッダへの挿入等、独自の経路制御機能を転送ハードウェアに組み込む必要がある点が挙げられる。そこで、本章では経路制御機能を転送ハードウェアから分離したOpenFlowフレームワークを用いた実装方式を提案している。さらに、予備トポロジとルーティングテーブルを1対1対応させる既存の実装方針を改良し、重複するルーティング情報を共用テ

ーブルに集約することでルータのメモリ消費を削減する方式も併せて提案している。本提案により、IP-FRRの性能目標値である50ミリ秒以内の障害復旧を実現できること、およびルーティング情報の共用化により、100ノードのべき乗則網において消費するメモリ量を、既存の実装方針と比較して約50%削減可能であることが示されている。これまで検討のみであったIP-FRRについて、製品が存在する技術を使った実装により、所望の能力を達成できることを示せた意義は大きい。

第5章「Relaxed Maintenance Network using Dynamic 1+1 Path Protection」では、予備パスの動的な再構成によるMPLSにおける1+1パスプロテクション構成の維持方式が提案されている。MPLSの1+1パスプロテクションでは予め2つのパスを用意することで、高速な障害復旧を可能とするが、運用保守の観点では、装置や伝送路の故障により現用もしくは予備パスが切断されると、一時的に目標とする稼働率が満足されない状態となるため、網オペレータは速やかに故障箇所を復旧する必要がある。しかしながら、突発的な故障に対しては資材調達も含めた復旧作業が必要となり、パスの再開までの時間が増加する。また、故障の発生時間によっては夜間保守作業が必要となり、人的稼働の増加が発生する。本章では、冗長パス構成が一時的に維持できなくなった際に、新たな予備パスを動的に設定することで可能な限り1+1パスプロテクションの状態を保持するための、制御アーキテクチャ及びパス計算アルゴリズムを提案している。新たな予備パスを数秒オーダーで設定することで、稼働率低下時間を最小化しつつ、保守時間制約の緩和を実現している。

第6章「Conclusion」では、本研究の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、通信キャリアの中継網のような大規模パケット網において、高信頼化を実現するための予備パス設計法ならびに予備パスを使った障害回復法を提案することにより、今後人々の社会生活の基盤として益々重要性の高まるインターネットをさらに信頼できるものとすることに資するものである。提案された手法による改善効果はいずれも大きく、さらに実装方式の提案も含まれており、実際のシステムで利用される可能性の高いものとなっている。本論文の成果は、信頼性の高いインターネットを通じて世界の様々な人々のコミュニケーションの増進に貢献するものであり、国際情報通信学の発展に寄与するところ極めて大きい。よって本論文は、博士(国際情報通信学)の学位を授与するに値するものと認める。

2013年2月6日

審査員

主任	早稲田大学教授	Ph.D. (イリノイ大学)	中里秀則
	早稲田大学教授	工学博士 (早稲田大学)	朴 容震
	早稲田大学教授	工学博士 (東京大学)	津田俊隆
	早稲田大学教授	工学博士 (東京大学)	田中良明