

早稲田大学大学院国際情報通信研究科

博士論文概要

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

2012年12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 IP(Internet Protocol)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を提供する。この自律的かつリアクティブな制御により、通信網の物理的な接続性が担保される限り、任意の網状態変化に対して適応的に新たなパケット転送路が提供される。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、新たな網構成の把握、通信路の再計算、及びルータが保持するパケット転送路情報の更新が、網状態変化の発生後に全ルータ間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る。この間に転送路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 SLA(Service Level Agreement)を満たす上での大きな障壁となる。

IP と対比的なパケット中継技術として、コネクションオリエンテッドな通信路（以下、パス）を提供する MPLS(Multi-protocol Label Switching)や、MPLS の OAM(Operations, Administration and Management)機能を拡充した MPLS-TP(MPLS Transport Profile)がある。これらの中継技術では、始終点ノード間のパスが明示的に設定可能であり、網はオペレータによるプロアクティブな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。1+1 パスプロテクション技術では、通信を行う始終点ノード間に互いにノードやリンクを共有しない現用パスと予備パスの 2 つのデータ通信路を予め用意する。始点ノードは現用・予備の両系にトラヒックデータを送信しておき、現用パス上の装置が故障した場合には、受信端で予備パスからのデータ受信に切り替えることで、迅速な障害復旧を実現する。一方で、予備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経路が提供できない課題がある。

以上をまとめると、IP ではリアクティブな自律制御により網状態変化への高い適応性を提供できるが故障復旧時間が長延化する課題がある。MPLS ではプロアクティブな設計に基づく制御により高速な障害復旧を実現する反面、環境変動への適応性が低い課題がある。本研究ではパケット中継技術の中核である両技術をそれぞれ高度化し、更なる中継網転送の高信頼化を実現する技術の確立を目指す。具体的には、高速障害復旧、スケール性担保、障害救済範囲拡大を実現するキャリアグレードの IP fast rerouting の方式と実装方法、柔軟性を向上し運用効率を向上する MPLS Dynamic Protection 技術を研究する。本論文は英語で記述しており、以下、章ごとに概要を述べる。

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た。

第 2 章「IP Fast Rerouting using Spanning Tree-based Backup Topologies」では、IP を用いて 50 ミリ秒以内の高速障害復旧を実現する IP Fast Rerouting (IP-FRR) の基本メカニズムについて紹介している。IP-FRR では、複数の予備トポロジーに基づく予備系経路を事前に用意しておくことで、高速障害復旧を実現する。予備トポロジーは単一リンク故障を救済することを前提に設計されており、各リンクはいずれかの予備トポロジー上でプロテクトされる。故障発生時には故障箇所をプロテクトする予備トポロジーに基づいた予備系転送路に切り替えることで、故障復旧を実現する。また、故障検出ノードは使用する予備トポロジーの ID をデータパケットに付与し、データ転送と同時に故障箇所を間接的に伝搬する。これらの独自の転送メカニズムにより、網

内全体への故障通知やリアクティブな予備経路計算・更新が不要となり、高速な障害復旧が実現される。

本章では、まず既存の IP-FRR 方式の研究状況を体系的に紹介し、次に本論文で取り扱う IP-FRR の基本方式である、予備トポロジ数¹の最小化問題を解決する予備トポロジ設計法を紹介する。IP-FRR で必要となるルーチングテーブル数は、予備トポロジ数に比例する。また、予備トポロジ ID を伝搬するために必要なビット幅は有限長である。このため、IP-FRR のスケール性を担保するためには、予備トポロジ数の削減が必要となる。ここでは、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。結果として、単一の予備トポロジでプロテクトされ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を示した。

第 3 章「Loop-free IP Fast Rerouting considering Double link failures」では、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た。具体的には、救済範囲を二重障害に拡大した際に生じる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の各課題について取り組んだ。IP-FRR では、予備経路上の各ノードには予備トポロジの ID のみが伝搬される。このため、二重障害を前提した場合には故障箇所²の特定ができないことに起因し、転送ループが発生する可能性がある。転送ループの発生は、故障箇所情報をパケットヘッダに付与することで、故障位置を予備経路上の各ノードに明示的に通知することで解決可能である。しかしながら、情報通知に用いるヘッダ幅が有限であることから、明示的な通知を行う方法では約 80 ノードの網が適用限界である数値例を示した。そこで、パケットヘッダに記載された情報に基づいて 1 度目に発生した故障位置を推定することで、転送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考案した。

次に任意の二重リンク障害からの復旧を実現する予備トポロジの設計法について取り組んだ。救済範囲を単一故障から二重故障に拡大したとき、障害パターン数は 2 リンクの組合せ数となる。すなわち、任意の 2 リンクがいずれかの予備トポロジ上でプロテクトされていることが障害復旧のための十分条件となり、単一故障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経路は予備トポロジの組合せにより提供可能であることに着眼することで、上記の条件を緩和し、必要な予備トポロジ数を削減する方式を提案した。具体的には、パケットの中継に使用されやすい特徴を持つリンクが予備トポロジ上で使用される頻度を高めることで、経路ダイバーシティを増加させる。中継リンクとしての使用頻度は各リンクの媒介中心性を指標に計算可能である。そこで、媒介中心性に基づくトポロジの特徴量³を目標値に設定し、中継リンク数に基づく予備トポロジ集合の特徴量が目標値に類似するように予備トポロジを追加することで、媒介中心性に比例した中継リンク数を持つ予備トポロジ集合の設計を実現した。具体的には、各リンクの媒介中心性をトポロジのパラメータとして抽出する。また、中継リンク数を予備トポロジ集合のパラメータとして抽出する。各パラメータは隣接行列表記された網の要素として埋め込み、固有ベクトル値で表現される。これにより、固有ベクトル値のコサイン類似度計算により各パラメータの類似度を簡易に求めることが可能となる。

本章では、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計算機シミュレーションにより確認した。さらに、任意の 2 リンクをいずれかの予備トポロジ上でプロテクト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

あることを示した。

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た。IP-FRR の既存研究は予備トポロジー設計アルゴリズムを中心に行われており、実装方法に関する具体的な議論が行われていない。また、商用ルータにおいても複数のルーティングテーブルを保持するためのフレームワークが実装されているものの、予備トポロジーを活用した 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、予備系経路への切替や予備トポロジーID のパケットヘッダへの挿入等の、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する。本方式では、OpenFlow の仕様 1.1 版で規定されるマルチテーブル機能を活用することで、ノード内に予備系を含む複数のルーティングテーブルを保持する。このとき、上述した IP-FRR 特有の経路制御機能を転送ハードウェアから分離したコントローラ上に実装することで、既存ハードウェアの拡張を不要とする。さらに、予備トポロジー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メモリ消費を削減する方式を併せて提案した。

本章では、OpenFlow を用いた IP-FRR の実装方式の妥当性について性能評価を実施した。まず、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を計算機シミュレーションにより確認した。さらに、ルーティング情報の共用化により、100 ノードのベキ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を示した。

第 5 章「Relaxed Maintenance Network using Dynamic 1+1 Path Protection」では、MPLS の 1+1 パスプロテクションに IP のリアクティブな自律制御の概念を導入することで状態変化に対する柔軟性を提供することを目的に、予備パスの動的な再構成による 1+1 パスプロテクション構成の維持方式について提案した。MPLS の 1+1 パスプロテクションでは予め 2 つのデータ通信路を用意することで、高速な障害復旧を可能とする。このとき、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、ファイバ断等の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する。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する。

本章では、動的パス制御法を、網の経路・設備を設計する網設計問題と、既存網を高信頼化する問題との、2 つの問題に適用した際の有効性を評価した。設計問題では、総設備コスト、経路長、網適用性の観点で 3 本のパスを事前設計する事前 3 パス設計法と比較し、特に物理トポロジーのノード次数制約の影響緩和の観点での有効性を示した。既存網を高信頼化する問題では、残余帯域制約のもとで効率的な動的パスを探索する提案アルゴリズムの有効性を、パスのブロック率の低減及び復旧に割当可能な時間増加の観点で示した。

第 6 章「Conclusion」にて本研究の成果をまとめた。