

Academic Year 2007

DISSERTATION

# Routing Architecture for the Dependable Internet



Yasuhiro Ohara

Graduate School of Media and Governance  
Keio University  
5322 Endo Fujisawa, Kanagawa, JAPAN 252-8520

*A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements  
for the degree of Doctor of Philosophy*

Copyright © 2007 by Yasuhiro Ohara

February 13, 2008

## 概要

“高度に信頼可能なインターネット”(Dependable Internet)に向けた第一歩として、本論文ではネットワークの可用性を向上するための経路制御技術について議論する。“高可用性インターネット”を、ネットワーク可用性を予測し制御するための機能を持つインターネットと定義し、この実現戦略を述べる。本論文は、ネットワーク可用性を計算するルーティングシミュレータ“SimRouting”、経路振動に耐性を持つ OSPF ルーティングプロトコルの例、新しい複数パス経路計算アルゴリズム“MARA”、新しい経路制御アーキテクチャ“Drouting”を提供する。

通信ネットワークの信頼性はさまざまな構成要素に依存している。例えば、通信機器の信頼性、通信プロトコルやソフトウェアシステムの安定性、ネットワーク資源に十分な処理能力が存在する可能性、ネットワーク運用者の信頼性などである。現在の研究はこれらの信頼性構成要素の特定の一つに焦点を当てている。例えば、フォールトトレラントシステムの研究は個々の通信機器、回線、システムを対象としている。通信プロトコルの研究は、そのプロトコルの安定性を対象とする。トラフィックエンジニアリング研究はネットワークの帯域の利用効率に焦点を当てている。現在のインターネットはこれら個別の信頼性に関する研究や技術の組み合わせの上に成り立っている。

個別の構成要素の信頼性に関する既存の研究を組み合わせることは、通信ネットワーク全体の実質的な信頼性を向上させない。理由は次の二つである。一、現在の研究は信頼性に関する構成要素を網羅していない。ソフトウェアバグ、ハードウェアバグ、ネットワーク運用者の設定間違いに関する学習は充分ではない。二、多くの信頼性に関する構成要素について、対応する技術が故障した際の代替案が提供されていない。フォールトトレラントシステムや通信プロトコルの安定化技術が故障すれば、通信ネットワークは手動で修繕されるまで機能を停止する可能性がある。結果として通信ネットワークの信頼性は充分であるとは言えず、インターネットの信頼性はミッションクリティカルな通信に対して充分でない。

経路制御技術に焦点を当て、本研究は通信システム全体の可用性を向上する。これはインターネットに関する信頼性研究の第一歩となる。経路制御技術は通信の性能や信頼性を決めるネットワークパスを決定するため、通信ネットワークのなかでも最も重要な構成要素である。事前に積極的に複数経路を利用し、さまざまな原因から生じる予測不能な故障を回避する一手法を、本論文は提供する。本研究はドメイン内経

路制御機構に焦点を当てる。

本研究は以下の提案により IP ネットワークの可用性向上に貢献する。一、経路制御機構を考慮し通信ネットワークシステムの可用性を試算する手法。二、経路制御機構を安定化する手法。三、ホップバイホップネットワークにおいて最大の代替経路を計算する新しい経路制御アルゴリズム。四、代替経路を利用しネットワークの可用性を向上する新しい経路制御アーキテクチャ。五、新しい経路制御アーキテクチャの上でトラフィックエンジニアリングを実現する手法。本研究は高可用性インターネットに求められる経路制御アーキテクチャとその周辺を構築する。

まず、本論文はインターネットの可用性向上のための一戦略を与える。高可用性インターネットをネットワーク可用性を予測し制御するための最小機能を備えたインターネットと定義する。高可用性インターネットは高度に信頼可能なインターネットに向けて第一に実現しなければならない段階である。経路制御技術に焦点を当て、インターネットの可用性を取り巻く課題について議論する。

本研究は経路制御機構を考慮し通信ネットワークシステムの可用性を試算する手法を提案し、シミュレーションツール“SimRouting”に実現した。通信ネットワークシステムの可用性を試算することは、現状を把握し、近未来の可用性を予測し、不足した部分に必要なネットワーク資源を追加しインターネットを改良するために無くてはならない機能である。SimRouting は、多くのネットワーク設定について経路制御機構を比較することによって、経路制御機構を評価することにも役立つ。通信ネットワークの性能を向上し、インターネットの信頼性を向上するためには、経路制御機構を評価することが必要である。

次に、個別のネットワーク構成要素の可用性を向上する例として、BGP フラップダンピングの手法を IPv6 OSPF に適用した。この手法は実験ネットワークで評価され、安定性について大きな改善を見せた。このことは信頼性の研究がインターネットの構成要素を網羅することに貢献する。

インターネットはその起源から、代替経路を利用できるように構築されてきた。しかしながら、代替経路が利用できない多くの問題が存在している。本研究はネットワークが多くの複数経路を保持し、ユーザもしくはエンドホストがこの複数経路を利用して問題の多くを回避できる経路制御アーキテクチャを提案する。このアーキテクチャを実現するのに必要な、最大の代替経路を計算する新しい複数経路計算アルゴリズム“MARA”が開発された。次に、MARA を利用する新しい経路制御アーキテクチャ“Drouting”が提案された。Drouting アーキテクチャはパケットタグを利用して、多くの可能な経路から通信パスをランダムに選択する。実際のネットワークを推測したトポロジを使い、シミュレーションにより Drouting アーキテクチャの障害からの回復性能の優位性が示された。

トラフィックエンジニアリングは現在の大規模ネットワークでは必要不可欠かつ最重要課題である。Drouting アーキテクチャにおける実現可能性を示すため、トラフィックエンジニアリング手法を述べた。障害からの回復の性質と、トラフィックエ

エンジニアリングの可能性を両方保持する手法を示した。

インターネットにおける経路制御機構は約 30 年の間、単一最短パス経路制御としてとどまっていた。実現可能性を考慮し、本論文は最大数の代替経路を利用するという新しい概念を導入した。新しい経路制御アーキテクチャは、障害検知機能と経路変更機能を分離し、経路制御機構以外での障害検知機能の自由な実装と、経路変更の自由な実行を実現する。これにより複雑な概念を追加せずにネットワーク可用性を向上する。また、複数の経路へのトラフィック分割割合を操作することによってネットワーク最適化を同時に可能にする。この経路制御アーキテクチャは、サービス品質を考慮した経路制御など、新しい機能を実現するように拡張されることが期待されている。次世代インターネットのための基本的な経路制御アーキテクチャの一案が提案された。

審査委員:

主査:

慶應義塾大学環境情報学部 教授      村井 純

副査:

慶應義塾大学環境情報学部 教授      中村 修  
慶應義塾大学環境情報学部 教授      河添 健  
東京大学情報基盤センター 准教授      加藤 朗