

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20700065
 研究課題名 (和文) リンク状態型ルーティングにおける軽量な自律分散型プロテクション方式の開発
 研究課題名 (英文) Developing a lightweight and distributed protection scheme for link-state routing
 研究代表者 吉廣 卓哉 (YOSHIHIRO TAKUYA)
 和歌山大学・システム工学部・講師
 研究者番号：80362862

研究成果の概要 (和文)：

本研究課題では、第二のルーティングテーブルを用いて任意の1リンク故障を回復するプロテクション方式 SBR に関して、(1)OSPF 拡張としてのプロトコル化、(2)SBR が計算した代替経路を用いたリンク輻輳緩和手法の開発、及び、(3)SBR をリンク故障だけでなくノード故障にも対応できるように拡張すること、の3項目の成果を挙げた。(1)は、これまでグラフ上の理論的な方式であった SBR を実際に OSPF に適用し、OSPF 特有の仕組みである OSPF エリアや ECMP、バーチャルリンクと共存して働く仕組みとしてプロトコル化した。(2)は SBR が計算した代替経路を輻輳時に適応的に用いて負荷分散を行う方式を考案し、UDP 及び TCP トラフィックによるシミュレーション実験を行い効果を検証した。(3)は、SBR をリンク故障だけでなくノード故障にも対応させ、より障害への対応能力が高い方式 SBR-NP を提案した。SBR-NP では、任意のノードから、次のノードを通らない迂回路が存在する限り、その一つを利用してパケットを迂回できることを保証できる。

研究成果の概要 (英文)：

In this study, we improved SBR, which protects arbitrary every single link/failure using a secondary routing table, as follows. (1) First we realized SBR as a practical routing protocol as an extension of OSPF by making SBR being possible to work with the OSPF specific mechanisms such as OSPF Area, ECMP, and virtual links. (2) Second, we proposed a method to make load balancing using the SBR mechanism when a link is congested. Through simulation with UDP and TCP traffic, we have shown that the proposed mechanisms work well to load balance and it improves the throughput of networks. (3) Finally we improved SBR to protect not only single link failure, but also single node failure. We presented an algorithm to construct the secondary routing table and have given the proof that it protects every single node failure as long as any detour paths exist.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野： 総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード： ネットワークアーキテクチャ

1. 研究開始当初の背景

既に社会基盤にまで成長したインターネットに対して、信頼性への要求が高まっている。従来のL3の経路制御技術(OSPFなど)では、リンクやルータ故障時に最短経路を再計算するため、回復までに分単位の時間がかかる。このため、将来の厳しいサービス要求に対応するためには、SONETやVRRP等のL2技術による冗長化が必須である。しかし、実質的に全てを冗長化するのはコスト面から難しく、L3技術による、ユーザに故障を意識させない故障回復技術(プロテクション技術)が求められている。

コアネットワークにおけるプロテクション技術として、IETFではMPLSにおけるFast Reroute方式の研究が進められている。これは、リンクやルータの故障に備えてあらかじめ代替経路を計算しておき、故障時に瞬時に切り替える方式である。しかし、MPLS機能を持つルータは高価であり、一部のコアネットワークに利用が限定されてしまう。

伝統的なL3ルーティング(OSPFなど)を含む軽量ネットワーク上でもIP Fast Rerouteの議論がなされているが、その機能は不十分である。提案されている方式は、リンク切断時、或いはノード故障時に、その直前のルータが即座に異なるルータにパケットを転送する方法であり、2枚或いは数枚のルーティングテーブルを用いて、故障時に即座にその故障を迂回することを可能にする。

しかし、これらはネットワークをモデル化したグラフ上での挙動のみを提案しており、実際にOSPF等の現在運用されているプロトコル上でどのように実現するかについては言及されていない。また、実際に故障が発生したときに迂回路を用いてパケットロスを防ぐことはできるものの、故障が回復されるまで待つことしかできず、故障が回復されない時のために新たな最短経路にパケットロスなく収束させるための方法は示されていない。さらに、ノード故障に対応できる仕組みはいくつか提案されているものの、いずれも実現するためのオーバーヘッドが大きかったり、パケットが宛先まで到達する経路に無駄がある(同じノードを何度も通る)など、効率的な迂回とは言えない方式であるなど、課題点が見られる。

2. 研究の目的

本研究課題では、これまでに我々が提案してきた2枚のルーティングテーブルを用いたリンク故障回復手法であるSBRを発展させて、従来のリンク状態型ルーティングプロトコルにおいても故障に即時に対応できるIP Fast Reroute方式を実現する。

まず、(1)既存手法では実際に運用されているOSPF等のルーティングプロトコルに適用させるための具体的手法が提案されていなかった問題に対し、SBRをOSPFの拡張として実現し、実用的なIP Fast Reroute方式として提案する。この時、これまでは故障時に即時にパケットを迂回させる機能のみが実現されており故障後新たな最短経路にロスなく収束する技術は実現されていなかった問題も解決し、パケットロスなく新たな最短経路に収束させることができるプロトコルとして確立する。

次に、(2)このIP Fast Reroute方式をリンク故障時以外にも活用できる方法として、輻輳時にも適応的に迂回路を用いることで負荷分散を行い、ネットワークのスループットを向上する方式を提案する。リンクの輻輳は、ある意味で「弱い」リンク故障と見なすことができる。そこで、輻輳時に輻輳の度合いに応じて一部のパケットを迂回路に流すことで、ネットワークの効率利用を促進し、ネットワーク自体のスループットの向上をすることができる。この性能評価は、ネットワークシミュレータを用いて行うこととし、UDP通信とTCP通信では挙動が異なることから、これらの両方を対象としてシミュレーション実験を行うこととする。

さらに、(3)SBRは研究開始当初にはリンク故障のみに対応できる方式であったため、これをノード故障にも対応できるように拡張することを行う。但し、従来提案されてきたノード故障技術も存在し、これらは故障ノードを避けるために同じノードを複数回通るような迂回路を作る問題があった。そこで本研究では、それらより効率的な迂回路を、2枚のルーティングテーブルのみを用いて実現できるような迂回路構築法を提案し、理論的な解析を行うことで任意の1ノード故障に対応できる能力の高い方式であることを証明する。

3. 研究の方法

(1) SBRのOSPF拡張としてのプロトコル化は、主に理論的な研究を展開した。課題点は、理想化されたグラフ上では実現できた方式でも、実用性のために数多くの工夫がなされている実際のリンク状態型ルーティングプロトコル上で動作させるためには、それらの工夫と共存させるための、実際のプロトコルに合わせたより複雑なモデルの下での解析が必要とされる点である。そこで、理想的なリンク状態型プロトコルではなく、実際にOSPFの動作を前提としてSBRの動作を具体化し、この複雑なモデル下で理論的解析を行うことにより、OSPF特有の仕組みであるOSPF AreaやECMP、バーチャルリンク等が存在する環境下でもSBRが正しく動作することを証明する。

(2) SBRを応用した負荷分散手法では、まず、輻輳時に適応的にパケットを迂回するための方法を確定する必要がある。輻輳時には、各ノードの送信キューが溜まり、キュー長を調べることで輻輳の程度がわかるため、キューを監視することで、そのルータに到達する各パケットを迂回させるかどうかを決定する仕組みを考案し、実現可能な方式として提案する。また、この方式をネットワークシミュレータns-2に実装し、ネットワーク性能をどの程度向上できるかを評価する。このとき、パケットを迂回すると、そのパケットの影響で迂回先に輻輳を発生させ、さらなるパケットの迂回が起こる迂回連鎖問題が発生する可能性があることに注意する。我々はこの問題を、輻輳時には迂回パケットを優先的に破棄する仕組みを導入することで解決する。評価はUDP通信を用いたシナリオを用意し、ネットワーク上の一部のリンクが局所的に輻輳した場合に、提案方式がどの程度輻輳を緩和できるかについて評価を行った。また、実際のネットワークはUDPだけでなくTCP通信も混在した環境である。TCP通信は自主的に輻輳制御を行うため、UDP通信と混在した場合には、UDP通信よりも優先的に破棄されてしまい、UDP通信により帯域を圧迫される可能性がある。一方でTCP通信はパケット到着順の乱れに弱く、パケット迂回によりパケット到着順が変わることで通信性能が劣化する可能性がある。そこで我々は、UDP通信のみを迂回しつつもTCP通信のスループットを確保できる方法を提案し、これについてもシミュレーション実験を行うことで性能評価を行った。

(3) SBRのノード故障対応化については、理論的に研究を進める。ネットワークをグラフによりモデル化し、グラフ上で、2枚のルーティングテーブルにより任意のノード故障に対応できるようなルーティングテーブルを構成するアルゴリズムを提案し、この方

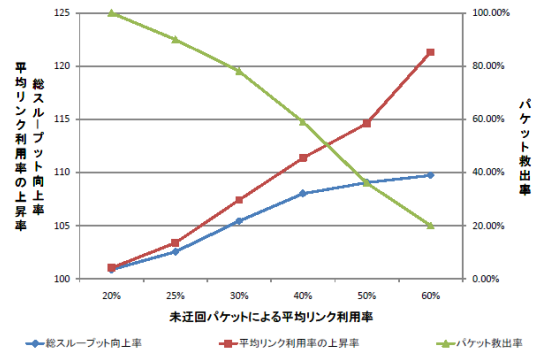


図1. ボトルネックリンクを16本用意した場合の迂回による総スループットの向上率、平均リンク利用率の上昇率、及びパケット救出率

式では任意の1ノード故障に対応できることを理論的に証明する。この時、従来手法との差別化のために、迂回路は同じノードを2度通らないようにすることが難しい部分である。

4. 研究成果

(1) SBRをOSPF拡張としてプロトコル化を行い、その仕様を論文として発表した。また、同論文上でその仕様でSBRが正しく動作することを理論的解析により証明した。さらに、既存のリンク状態型ルーティングにおけるループフリー化手法と組み合わせることにより、任意の1リンク故障時にも経路を切断することなく新たな最短経路に収束させるための仕組みも盛り込むことに成功した。

(2) SBRを応用した負荷分散手法では、輻輳時に適応的にパケットを迂回する手法を具体化した。つまり、ルータの送信キューの状態により各パケットを最短経路に転送するか迂回路に転送するかを決めるアルゴリズムを具体化した。また、この仕組みには迂回連鎖問題が発生しないための工夫も盛り込んだ。ネットワークシミュレータns-2に提案手法を実装し、シミュレーション実験を行った。ノード数を変化させたBA (barabasi-albert)モデルのトポロジをトポロジ生成ツールBRITEにより生成し、一部のリンク帯域を他の半分に設定することで、意図的に輻輳を発生させるようにした。この状況でランダムにUDP通信を発生させ、通常最短経路通信と、迂回を行った場合とで通信性能を比較した。

その結果の一部を図1に示す。この結果からわかるように、提案手法は通常最短経路通信と比較して、最大10%程度のネットワークスループットの向上を実現することがわかった。ネットワークの負荷が高くなると迂

回パケットの宛先への到達率が下がってくるが、それでもリンクの負荷が50%程度までは、約40~50%以上の迂回パケットが宛先に到達できることがわかり、高負荷状態でも迂回パケットがネットワークのスループット性能を押し上げていることがわかる。パケットの挙動を詳しく調べたところ、ボトルネックリンクにおいて輻輳が発生し、本来ここで破棄されるパケットが周囲のリンクに分散されることで性能が上がっていることがわかった。また、ボトルネックリンクの密度が低い場合の方が救出率が高く、約1/4リンクをボトルネックとした場合にも提案方式は性能を發揮できることがわかった。また、パケット迂回による悪影響に関して調べたところ、輻輳リンクで迂回パケットを優先的に破棄する仕組みを入れることにより、迂回パケットが他の迂回を誘発する現象は発生していなかった。また、迂回パケットが最短路パケットの遅延を増加させると、TCPのスループットに悪影響を及ぼす懸念があるが、提案手法では迂回パケットによる最短路通信パケットへの遅延の影響は最大でも2~3%と無視できる程度であり、従来通信の性能を下げることなく、迂回によりネットワークのスループット性能を向上できていることが確認できた。これらの結果を研究会発表した。さらにTCP通信への配慮に関しては、UDP通信のみを迂回することでTCP通信のスループットをも向上する方式を提案し、ns-2によるシミュレーション実験によりその効果を検証した。TCP通信に関する結果は学生の卒業論文として発表しており、今後の学会発表に向けて引き続きシミュレーション実験を続けている。

(3)SBRのノード故障対応化については、目標としていたことを達成し、2枚のルーティングテーブルによってノード故障に対応できる迂回路構築法を提案し、この方法によって任意の1ノード故障に対応できる迂回路が構築できることを理論的に証明できた。本方式では、従来方式にない特徴として、迂回路が同じノードを通ることがないという効率化を実現している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

(1)Takuya Yoshihiro, "A Single Backup-table Rerouting Scheme for Fast Failure Protection in OSPF," IEICE Transactions on Communications, Vol. E91-B, No. 9, pp. 2838-2847, 2008. (査読有)

[学会発表] (計3件)

- (1) 原正樹, 吉廣卓哉, "IP Fast Reroute方式 SBR を用いた複数回の迂回が可能な動的負荷分散方式," 情報処理学会 インターネットと運用技術研究会 (SIG-IOT), 2010年3月2日 (仙台).
- (2) 原正樹, 吉廣卓哉, "リンク状態型ルーティングにおけるリンクプロテクション技術 SBR を用いた負荷分散手法," マルチメディア、分散、協調とモバイルシンポジウム (DICOM02009), 2009年7月8日 (別府).
- (3) 吉廣卓哉, "第二の経路表を用いた軽量のノードプロテクション手法," マルチメディア、分散、協調とモバイルシンポジウム (DICOM02009), 2009年7月9日 (別府).

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

- (1) 名称: 経路制御装置
発明者: 吉廣卓哉
権利者: 和歌山大学
種類: 特許(出願)
番号: 特願 2009-213606
出願年月日: 2009年9月15日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
吉廣卓哉 (YOSHIHIRO TAKUYA)
和歌山大学・システム工学部・講師
研究者番号: 80362862
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし