

OSPF ネットワークにおけるポリシーを考慮した コスト再設計に関する研究

吉田 薫[†] 永見 健一^{††} 江崎 浩[†]

[†] 東京大学 大学院 情報理工学系研究科 〒113-8656 東京都 文京区 本郷 7-3-1

^{††} 株式会社インテック・ネットコア 〒136-0075 東京都江東区新砂 1-3-3

E-mail: [†]kaoru@hongo.wide.ad.jp, ^{††}nagami@wide.ad.jp, [†]hiroshi@wide.ad.jp

あらまし 近年、ISP や学術研究団体などにおいて、大規模で構成の複雑なネットワークが構築され、運用されるようになってきている。また、これらのネットワークに流れるコンテンツが多様化してきている。そのため、時々刻々と変化するネットワーク状態が今まで以上に複雑になり、ネットワークを効率的に運用することが困難になってきてしまっている。ネットワーク資源を有効に利用するためには、コスト値の再設計が必要であると考えられる。最適なコスト値計算などの研究は様々になされているが、現実ですでに運用されているネットワークを考えた場合、大規模なコスト値の変更はネットワークを不安定にする要因となり、事実上不可能である。本研究では、ある特定のパケットの配送経路に対してどの経路を通したいというような要求をネットワーク管理者がポリシーとして記述することにより、それらを反映させたコスト値の変更を行えるようにする。この時の変更を最小限に抑え、ネットワークへの影響を小さくし、ネットワークを効率的に運用することを目的とする。

キーワード OSPF, トラフィックエンジニアリング, コスト, ポリシ

The Cost Reconstruction Considering the policy at OSPF Network

Kaoru YOSHIDA[†], Kenichi NAGAMI^{††}, and Hiroshi ESAKI[†]

[†] The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

^{††} Intec Netcore, Inc., 1-3-3 Shinsuna Koto-ku, Tokyo 136-0075, Japan

E-mail: [†]kaoru@hongo.wide.ad.jp, ^{††}nagami@wide.ad.jp, [†]hiroshi@wide.ad.jp

Abstract In many ISPs and campuses, the large-scale complex network are now built up and operated. And the contents streaming these network have become more diverse. Since the network condition, which change momentarily, has become more complex than ever, it's hard to run the network efficiently. So it needs to restruct the metrics in the network to utilize the network resources efficiently.

Various studies, to obtain the optimized metrics in the network, are now understudied. Since the massive metric changes for the existing operational network cause the instability of the network, it's difficult to apply these studies for the network. In this paper, we propose the system, which the network operators describe the demand like a path selection for specific packet delivery as a policy and then they can obtain the recommended metrics. At this time, we minimize metric changes to operate the network both stable and efficiently.

Key words OSPF, Traffic Engineering, cost, policy

1. はじめに

インターネットは、AS(Autonomous System)と呼ばれ自律的に構築運用されているネットワークを単位として、これらが経路制御によって相互に接続されグローバルスケールの大規模分散システムを構成している。それぞれのASの内部においても、自律的に構築運営されているより細かな単位のネットワークの集合体となっており、その大きさは実に様々である。そうしたネットワークにおいてある送信元から宛先に対して、パケットが正しく配送されるよう制御することを配送経路制御(ルーティング)と呼ぶ。

近年のインターネットの急速な普及とともに、こうした自律的に運用されているネットワークの肥大化と複雑化の傾向が急激に加速している。それに伴いネットワークを管理、監視することが困難になり、ネットワーク管理者達はネットワークの現在の状態を把握することができず、効率的な運用ができなくなってきてしまっている。このため、効率的な配送経路制御を行うことができず、ネットワーク上のあるリンクでは輻輳が定常的に発生しているにも関わらず他のリンクにはほとんどトラヒックの流れないという事態が頻発している。

また、インターネットが家庭に浸透するに従い、ftpなどのように帯域を必要とするが遅延が生じて構わない通信や、逆にVoIPのように帯域はそれほど重要ではないが遅延を極力抑えたい通信などネットワーク上を流れるトラヒックの多様化が進んできている。こうした多様化した通信をその通信要求に見合うように、配送経路を指定し効率的なネットワーク運用を行うことをトラヒックエンジニアリングと言う。トラヒックエンジニアリングを実現するための技術は現在様々に研究、開発されているが、未だ充分なものとはなっていない。

2. OSPF

ISP(Internet Service Provider)や学術研究組織などの同一ポリシーで運営されている組織(AS)内におけるパケットの経路制御として広く一般に利用されているOSPF(Open Shortest Path First)[1]という配送経路制御手法(ルーティングプロトコル)について簡単に説明する。OSPFはAS内部で使用されているIGP(Interior Gateway Protocol)の一つであり、RFC2328[2]においてバージョン2が定義されている。また、RFC2740[3]において、IPv6用の仕様が定義されている。OSPFは大規模なネットワークに適用可能な仕様となっており、主な特徴としては以下の4点が上げられる。

- リンクステートアルゴリズムを採用し、きめ細かなネットワークポロジの定義と表現
- フラディング手法を用いた経路情報の迅速な収束
- コスト(メトリック)に基づいた動的な経路制御
- エリアの概念を用いた高いスケーラビリティの実現

2.1 リンクステートプロトコル

OSPFはリンクステートアルゴリズムを使用した経路制御プロトコルである。リンクステート型の経路制御プロトコルは、エリア内の全てのルータで同一のリンクステートデータベースを持ち、そのデータベースを基にリンクステートアルゴリズム、このアルゴリズムに関しては後述する、で始点ルータから終点ルータへの経路を計算する。この経路計算を各ルータが行うことで、ルータの経路表が自動生成される。このリンクステートデータベースはLSA(リンクステートアドバタイズメント)と呼ばれる各ルータが持つリンク情報や同一イーサネットセグメントに属しているルータ群の情報により構成されている。データベースの同期・更新は隣接ルータ間へのブロードキャストにより行われる。

2.2 リンクステートアルゴリズム

OSPFの配送経路決定アルゴリズムには、リンクステートアルゴリズムが用いられている。このアルゴリズムは最短経路探索アルゴリズム(ShortestパスFirstアルゴリズム)である。これは、リンクステートアップデートパケットの中のルータリンクステートアドバタイズメントという情報に含まれている各リンク間のコストを基にリンクステートアルゴリズム(Shortest Path Firstアルゴリズム)を用い、自分自身からネットワーク内に存在する全ての計算機への最短パスから生成される経路情報を生成する。生成された情報は木構造をなし、スパンニングツリーと呼ばれる。その経路情報よりルーティングテーブルを作成する。各ルータがネットワークの構成を把握しているので、変化が起きた際に素早くルーティングテーブルを再構築する事が可能となる。同じネットワークの経路情報が複数方向から来た場合、ルータはメトリックの小さい経路の方を近い、すなわち良い経路であると判断しそちらへのパケットの転送経路をその宛先ネットワークへのパケットの転送経路として選択する方式である。この時コストの設定が適切になされていないと、コストの低いリンクへトラヒックが集中してしまう危険性がある。

3. コスト計算に関する関連研究

OSPFネットワークにおいてトラヒックエンジニアリングを実現するためには、様々な方法があるが、多くの場合はパケット配送経路を決定する際に必要となるコストの値を変更することにより実現しようとしている。

OSPFのコスト設定のアルゴリズムとしては以下のようなものが代表的な先行研究として上げられる。

3.1 発見的アルゴリズム

発見的アルゴリズムを用いた研究としては、B. Fortz[4]によるが代表的なものとして上げられる。この研究では、トラフィックエンジニアリングの視点からの発見的アルゴリズムによるコストの最適化を目指している。これは、現在のノード(ルータ)の数、リンク数、リンク帯域幅、end-to-endでの帯域利用率をパラメータとしている。ネットワーク全体で負荷分散を行うことによって、ネットワーク資源の有効利

用を目指している。

具体的な計算アルゴリズムとしては、線形計画法を用いている。計算過程において、コストの変更によりあるリンクのフローが閾値を超えた際にはそのリンクに対してペナルティを与え、そのリンクでは二度と閾値を超えることがないようにする。これを全てのリンクに対して繰り返していくことにより、負荷分散を実現することができる。この時、コストが変更されるリンク数に対しては制約を一切設けないので、計算結果によってはコスト変更前と変更後ではネットワーク状態が大きく異なってしまう可能性がある。

しかしながら、OSPF ネットワークのコスト最適化の研究においては、アルゴリズム自体は有用であるとして、この手法の応用が広く用いられている。

この研究の応用として、元となるリンクコストから変化したリンクコスト数に制限を設ける事によりコストを変更させるリンクの数を抑制しコストの最適化を行おうとする研究もなされている。これにより、トラヒック要求の増大によるネットワーク管理者への負担軽減を計ることができる。

3.2 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズムを用いたものは、Mylyana [5] によるもので、トラヒックエンジニアリングを GA (Genetic Algorithm) の視点から GA によるコストの最適化を行っている。このアルゴリズムでも、対象ネットワークのルータ数とリンク数、及びリンクの帯域幅、始点から終点へのトラヒックの帯域利用率、現在の各リンクコストをパラメータとし、コストの最適化を行っている。

また、変更前のコストと変更後のコストの類似性を制約条件として考慮することによってコストの変化を最小にし、コスト変更によって生じるネットワークの不安定を防ごうとしている。このアルゴリズムを用いることにより、リンクの平均利用率と最大利用率を抑えるコストを得ることができる。既存の遺伝的アルゴリズムを用いたコスト設定に比べ経路情報伝搬の収束時間が改善されている。

3.3 Recursive Random Search

Kaur ら [6] により提案されている手法であり、計算アルゴリズムとして Recursive Random Search (RRS) [7] が用いられている。この研究においてもパラメータとして対象ネットワークのルータ数とリンク数、及びリンクの帯域幅、始点から終点へのトラヒックの帯域利用率、現在の各リンクコストを利用している。さらに各リンクでのバケット落とし率という概念を新たに導入し、この各リンクでのバケット落とし率が最小になるようにコストの最適化を行っている。

発見的アルゴリズムや遺伝的アルゴリズムを用いた研究では、ネットワーク上を流れるトラヒックフローの時間軸から見た変化に注目していなかったが、この研究ではルータへのバケット到着率を時間変化させることにより、フローの時間依存を考慮している。

この研究では、まず実ネットワークを反映させた仮想ネット

ワークの構築を行う。ついで、On-Line Simulator (OLS) [8] を用い、実ネットワークからトラヒックフロー情報の取得を行う。得られたトラヒック情報を基に RRS を用いてバケット落ち率が最小となるようにコストを変更していく。

3.4 ポリシを考慮したコスト設計

この研究 [9] は第 3.1 節、第 3.2 節や第 3.3 節のようなトラヒックエンジニアリングの視点から見た OSPF ネットワークのコスト設計ではなく、ISP や企業ネットワークにおける運用ポリシーの反映、人為的なミスによるネットワークの混乱回避、ネットワーク管理者の負担軽減といった視点からのコスト設計方法を提案しているものである。

まずそれぞれの End-to-End の通信に対してポリシーという抽象化された条件を記述し、その通信が流れることのできる経路に対する制約条件を決定する。次いでエリア内に存在する全てのルータをそれぞれ始点、終点に設定し、この制約条件の下でバックトラック法を利用して到達可能な全ての経路を探索していく。さらに、この時決定されたリンクが切れた際にも記述されたポリシー条件を満たすようなバックアップ回線を確認することが可能となるようなコスト決定を行っている。

また、ネットワーク機器での様々な設定の多くがベンダ依存しており、それが人為的なミスを誘発することが多々あるという事実に着目し、そうした情報をユーザからは隠蔽し統一された XML 表現を用いることで、人為的なミスの発生を防ぐシステムを提案している。

4. 研究へのアプローチ

4.1 既存研究の問題点

発見的アルゴリズムや遺伝的アルゴリズムを用いた研究では、ネットワーク全体での資源利用効率の向上を目指し、コストの最適化を行っていた。しかしながら、多くのネットワークにおいては、すでにネットワークが構築され運用されており、このような手法により多くのコストの変更を行うことは、ネットワークの不安定性の一因となり実ネットワークへの適用は難しい。

また、こうした研究は特定のトラヒックフローを対象としているわけではないので、ある特定の経路に対しての変更要求があった場合には向かない。ネットワーク機器の進歩や基盤整備のためにしかし、日々新しい機器や回線が導入されている事実を考えれば、このようなネットワーク全体での利用効率向上が求められる事はまれである。むしろ特定の通信経路の切替えや特定のトラヒックの明示的な経路指定が可能であることが求められている。

このため様々なコスト設計、設定方法が提案されているにも関わらず、実際の運用においては十分に要求に応えておらず、少数の人による手動によるコスト設計及び設定がなされているのが実情である。

4.2 本研究の目的

前節で述べたように、現在なされている多くの研究は未だ実ネットワークへ適用されていない。そこで、本研究では実

ネットワークへ適用する事を前提に、ネットワーク管理者がある end-to-end の通信において資源の利用方法に要求を提示した際、その要求を満たすようコストの調整を行う。次いで、調整されたコストが実ネットワークに対して有用であるかどうか検証する事のできるシステムを構築する事を目的とする。

具体的には、システムを以下の3つに分けて設計する。

(1) ネットワーク資源利用に対する要求の記述

OSPF ネットワークにおいてネットワーク管理者が任意の end-to-end 間の通信に対して遅延や帯域を考慮した配送経路指定要求を持つものとする。この時管理者により提示された要求を抽出、整理しコスト調整の前処理を行う。

(2) 記述された要求に合うようなコスト調整

前項により整理された要求に対して、その要求を満たすような経路設定が可能となるように各リンクのコスト調整を行う。

(3) 提示されたコストの有用性の検証

前項により導出されたが実際のネットワークに対して有用であるかの検証を行う。期待する結果を得る事ができなかった場合には再度(2)を実行し、コストの再調整を行う。

以下では、これらを実現する具体的な手法について議論する。

4.3 OSPF のコスト設計時におけるポリシー

4.3.1 考慮されるべきポリシー

ネットワークの運用を行なっていく際には、ネットワーク資源を効率的に利用していく必要がある。ネットワーク資源を効率的に利用するには、管理者が資源の利用方法を要求として上げる必要があり、そうした要求のことを本研究ではポリシーと呼ぶ。

ネットワーク運用のポリシーとしては、以下の2点に分けて考えることができる。

(1) ネットワーク全体を考慮したポリシー

ネットワーク管理者は、そのネットワークのユーザが快適な通信を行えるようネットワークを運用、管理する必要がある。そのためにネットワーク全体を考慮しての資源の平滑利用を目的とした、ネットワーク上の各リンクでの負荷分散を行わなければならない。例えば、定常的に輻輳が起きているリンクに対してはそれを解消するようトラフィックの分散を行わなければならない。

このようなポリシーはネットワークを安定的に運用するという要求が前提であり、変更が求められる機会は少ないと考えられる。

(2) 局所的視点に基づいたポリシー

任意の end-to-end 間通信に対して帯域や遅延等の要求があり、その要求に見合うように経路を設定する必要が生じることがある。これは例えば、コンサートなどのストリーミング配信のように通信が一時的に大帯域を必要とする場合が考えられる。その通信を予め明示的に決められた経路に流すことによって、ネットワークへの影響を予測可能とし、ネット

ワーク内の他のトラフィックフローに影響出るのを防ぐことができるようになると考えられる。

ネットワーク全体を考慮したポリシー要求に基づくコストの変更に関する研究は第3章で述べたように、すでに多くのものがなされている。そこで本研究ではポリシーがネットワークの運用に際しその状態、用途に応じて動的に変化することを考慮し、特に局所的な視点に基づいてコストの変更が要求される場合について考える。このような要求は、すでに運用されているネットワークにおいて新たにポリシーの導入を行ないたい場合や、必要なくなったポリシーを削除する場合にも有効であると考えられる。

4.3.2 ポリシンの状態遷移による差分の抽出

既存の研究においては、ポリシーが動的に変化することを考慮しておらず、ポリシーの変更が行われた際にはその変更による影響が微小なものであっても初期状態から計算をしなおす必要があり、頻繁なポリシー変更要求がある場合には、同一処理による無駄が多くなりこうした手法は向かない。

本研究ではポリシーが動的に変更されることを前提として考える。この時あるポリシー空間を考えると、ネットワーク管理者がポリシーの変更を行なうとその変更前後では個々のポリシーは以下の3つの状態をとることになる。

- 状態保持
- 追加
- 削除

その状態遷移は図1のようになる。

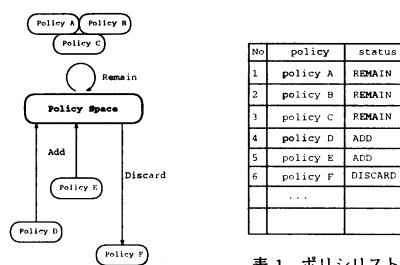


表1 ポリシリスト

図1 ポリシンの状態遷移

また、個々のポリシーは表1のように書く事ができる。この時、ポリシーの状態部分に着目し、状態として変化しているもののみ抽出する。表1においてはポリシーD,E,Fがこれに相当する。この新たに追加もしくは削除されたポリシーがネットワークのある一部分にのみ影響を与えるものであれば、次段階のコスト調整においてその部分のみに着目すればよく、コスト変更のための計算量を減らすことができると考えられる。また、以前のポリシーの状態及びその時の各リンクのコストを保持しておくことで、コスト再調整のための計算自体を行わずに済む可能性がある。さらに、あるポリシーの変更がネットワーク全体に対して影響を及ぼすようなコスト調整を必要とする場合でも、このポリシーを満たすためのコスト調整が保

持されてたポリシー、表1のA,B,Cがこれに相当する、を満たしているか逐次的に確認する事で一からコストを再計算する場合に比べ、計算量を減らせるのではないかと考えられる。

4.3.3 ポリシの優先付け

動的なポリシーの変更は、相反するするポリシーが提示される可能性があり、こうした問題を回避するために、ポリシーの優先付けを定義する必要がある。優先付けの定義の仕方には、以下の2点を考慮する必要がある。

- 全ポリシーに対して共通のもの

例えばネットワークを流れるコンテンツの性質として、帯域を重視するものが多い場合には、そのネットワークに対するポリシーとして遅延に関するポリシーより帯域に関するポリシーを優先させる必要がある。

- 個々のポリシーに対してのもの

あるホストA-B間の通信のポリシーよりもホストC-D間の通信を優先したいという要求があった場合などには要求に合うようにポリシーを優先させる必要がある。

4.4 コスト計算手法

コストの計算手法としては、既に述べたように様々なものがあるが、本研究ではOSPFでサポートされているイコールコストマルチパスを利用する方法を検討する。

4.4.1 イコールコストマルチパスの利用

イコールコストマルチパス(Equal-Cost MultiPath)とは、ある始点から終点に対して複数の最短経路があることを認めるものである。一部のベンダでは、複数の経路に対してロードバランスを保つようにトラフィックの分配を行うことができ、またロードバランスを保つように経路の振り分けを行おうとしている研究も進められている。しかし、現状では多くの場合はルータ内でパケットの配送時にリンクの負荷率やロードバランスを考慮することはないので、片方の経路に偏ってしまうのが実情である。

イコールコストマルチパスを利用しつつ、トラフィックフローを分散させるためには、何らかの方法によりルータにイコールコストマルチパスへのパケットの振り分け方を教える必要がある。先程述べたようにロードバランスなどを考慮する方法もあるが、ここではパケットの種類による分配などポリシーにより配送経路を切り替える方法を考える。

ポリシーによる経路の切り替え方法は以下の3通りが考えられる。

- (1) ポリシにより決定される経路に対してのみ静的なルーティングを実施
- (2) ポリシを記述するプロトコルを新たに作成し、そのプロトコルに対応するようにOSPFを改変
- (3) OSPFの拡張を用いる

静的にルーティングを実施したり、OSPFの拡張を行う方法は現状のものを大きく変更する必要がなく、実ネットワークに適用しやすいと考えられる。しかし一方で、今後はポリシーによるルーティングがOSPFだけでなく様々なルーティン

グプロトコルに必要になってくると考えられる。そこで、ポリシーの反映は新しいプロトコルの作成により行いたいと思うが、プロトコルに必要な機能が十分に洗い出されておらず、設計もできていないので、詳細はここでは述べない。

OSPFネットワークでは、図2(a)のように複数の経路があった場合、送信元から宛先までのコストの合計の少ない方、つまりパス1を通過してパケットは配送される。

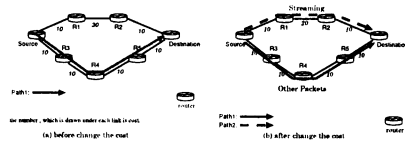


図2 コスト変更による経路変化

ここで、同一送信元から宛先の通信に対し、ストリーミングのパケットだけをパス2に流したいという要求があったとする。まずR1,R2間のコストを変更することによりパス1,パス2のイコールコストマルチパスを生成する。次いで、先ほど述べたポリシー記述のプロトコルにより、ルータはパス2にはストリーミングのパケットを、パス1にはその他のパケットを配送することを認識する。こうすることにより、パケットにより配送経路を切替える事ができるようになると考えられる。イコールマルチパスを利用し、ポリシーによる経路振り分けを行った場合のイメージ図を図2(b)に示す。

この時、第2.2節で述べたように、コストを変えることにより予想していなかったフロー変化が起きる可能性があるということも考慮しなければならない。

こうしたイコールコストマルチパスの概念を発見的アルゴリズムなどの既存のアルゴリズムに対して適応することでも、より極め細やかなポリシー記述が可能になると考えられる。

4.5 コスト調整の有用性の検証

第4.4節で述べた手法によりコストの調整を行うが、得られたコストを実ネットワークに直ちに危険である。実ネットワークには様々な種類のトラフィックが時々刻々と変化して流れており、ネットワークの構造によりその傾向も異なっているからである。つまり、シミュレーションや小規模のネットワークにおいて検証されたコスト計算アルゴリズムが大規模なネットワークに適用できるかはわからない。コスト変更によってネットワークが予想とは異なるものとなる可能性もあり、新たな輻輳や障害を引き起こしてしまうかもしれない。

こうした障害を未然に防ぐために、調整により得られたコストが実際のネットワークに対して適切であるかの検証を行う必要がある。この検証環境を得るために、本研究では実際のネットワークポロジを反映させたシミュレーションネットワークを構築する手法を提案する。

4.5.1 シミュレーションネットワーク

シミュレーション用のネットワークはOSPFネットワークを可視化することのできるツール[10]を基に構築する予定で

ある。実際に運用されているネットワークでは、機器障害や設定ミスにより生じる障害などの予測が困難な突発事象以外にも、ネットワーク機器の新規導入、回線増強やファーム、OSのアップデートによるリンクダウンなどのように、予めネットワークトポロジに変更が生じる事が予測できている場合がある。そこで、本研究では既存研究に機能の拡張を行いネットワークトポロジの動的な変化にも対応可能なものとする。

図3に示したように、予測されるトポロジの変更は以下の3点が考えられる。

- (a) Point-to-Point 接続のノード、リンクの追加、削除
- (b) トランジット接続へのノード、リンクの追加、削除
- (c) トランジットネットワークの追加、削除

こうしたネットワークトポロジの動的な変化に対応づけてLSAを変化させることで、個々のルータはネットワークの状態変化を知ることができるようになる。

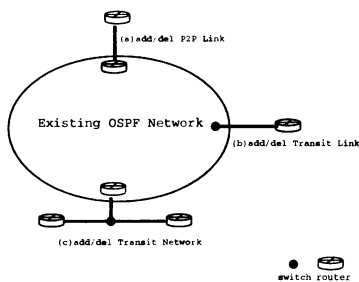


図3 動的なネットワークトポロジの変更

また、動的にネットワークトポロジの変更を行なうことで、機器障害や設定ミスにより生じる障害が起こった際のネットワークへの影響も予測することが可能になると考えられる。

4.5.2 サンプリングを用いたトラヒックフローの計測

多くのOSPFネットワークにおけるコスト設計の研究では、仮想的なネットワークを構築しその中でトラヒックフローを定義し、コスト最適化を行っている。しかし、本節始めにも述べたようにこうした予想トラヒックと実際にネットワークを流れているトラヒックとは異なる可能性があり、そうした際には新たなネットワーク障害を引き起こす可能性がある。

そこで、Tao Yeら[11]による論文でも述べられているように、コスト計算のアルゴリズムを実際に利用するには実ネットワークとそこを流れるトラヒックフローを安全に再現できる環境を構築し、それを利用した実証的検証に基づいた研究が必要になってきている。

こうした実ネットワークのトラヒック情報を取得するために、以前はtcpdump[12]やSNMP(Simple Network Management Protocol)[13]などを利用していましたが、ネットワークが高速になるにつれて、収集が追いつかなくなる事態が生じてきている。そこで、NetFlowなどを用いたサンプリングさ

れた情報を収集することが必要となる。

5. おわりに

今回提案した手法により、OSPFネットワークにおいて動的にポリシーが変更される環境では、既存のものと比較し計算量の軽減を図ることができ、またより実ネットワークに即したシミュレーションを行なうことができるようになると考えられる。その結果、ネットワーク管理者への負担を軽減することが可能になると考えられる。

今後の予定としては、今回提案した手法の実装を行ないその評価を行なう予定である。

文献

- [1] John T. Moy. *OSPF Anatomy of an Internet Routing Protocol*. Addison Wesley, 1998.
- [2] J. Moy. *OSPF Version 2*. RFC 2328, April 1998.
- [3] R.Colton, D.Ferguson, and J.Moy. *OSPF for IPv6*. RFC 2740, December 1999.
- [4] Bernard Fortz and Mikkei Thorup. Internet Traffic Engineering by Optimizing OSPF weights. In *Proceedings of IEEE INFOCOM 00*, 2000.
- [5] E.Mulyana Killat. U. A Hybrid Genetic Algorithm Approach for OSPF Weight Setting Problem.
- [6] Hema Tahiramani Kaur, Tao Ye, Shivkumar Kaylyanaraman, and Kenneth S. Vastola. Minimizing Packet Loss by Optimizing OSPF Weights Using Online Simulation. *IEEE/ACM MASCOTS*, 2003.
- [7] T.Ye and S. Kalyanaraman. A Recursive Random Search Algorithm for Optimization Network Protocol Parameters. Technical report, ECSE Department, Rensselaer Polytechnic Institute, 2001.
- [8] T.Ye and D.Harrison and B.Mo and B.Sikdar and H.T.Kaur and S.Kalyanaraman and B.Szymanski and K.S.Vastola. Network Management and Control Using Collaborative On-line Simulation. Helsinki, Finland, June 2001. IEEE ICC.
- [9] 夏山京大, 衛藤将史, 門林雄基, 山口英. ポリシに基づくIGPコスト決定手法. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 103, No. 354, pp. 55-60, Oct 2003.
- [10] 吉田薫, 永見健一, 江崎浩. OSPFネットワークにおけるトラヒック情報の可視化手法の実装. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 103, No. 354, pp. 61-66, Oct 2003.
- [11] Tao Ye and Tahiramani Kaur and Shivkumar Kalyanaraman and Kenneth S. Vastola and Saroj Yadav. *Dynamic Optimization of OSPF Weights using Online Simulation*, 2002.
- [12] tcpdump. <http://www.tcpdump.org/>.
- [13] J. Case, M. Fedor, and M. Schoffstall. *A Simple Network Management Protocol (SNMP)*. RFC 1157, May 1990.