

# 段階的 VNT 再構成時におけるトラフィック推定精度向上のための検討

大下 裕一<sup>†</sup> 宮村 崇<sup>††</sup> 荒川 伸一<sup>†††</sup> 阿多 信吾<sup>††††</sup> 大木 英司<sup>††</sup>

塩本 公平<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院経済学研究科

<sup>†††</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科

<sup>††††</sup> 大阪市立大学 大学院工学研究科

<sup>††</sup> 日本電信電話株式会社 ネットワークサービスシステム研究所

E-mail: <sup>†</sup>y-ohsita@econ.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>{miyamura.takashi,oki.eiji,kohei.shiomoto}@lab.ntt.co.jp,

<sup>†††</sup>{arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††††</sup>ata@info.eng.osaka-cu.ac.jp

あらまし 我々の研究グループでは、推定誤差を含むトラフィックマトリクスを用いて適切な VNT を構築するための段階的な VNT 再構成手法について検討を行っている。この手法では、VNT の再構成をステージに分割し、段階的に行う。そして、各ステージで再構成前後に観測されたリンク使用率の情報を用いて、トラフィックマトリクスの推定精度を向上しつつ、適切な VNT へ移行する。しかしながら、この手法では、トラフィックの変動を考慮した推定を行っておらず、トラフィックが急激に変動した場合に推定精度が著しく悪化してしまうという問題があった。そこで本稿では、過去の情報から推定に用いる情報を取捨選択することにより、トラフィックが急激に変動した際にも正確にトラフィックマトリクスを推定する手法を提案する。そして、シミュレーションにより、トラフィックが急激に変動した場合であっても、提案手法は正確にトラフィックマトリクスを推定することができることを示す。

キーワード トラフィックエンジニアリング、GMPLS、トラフィックマトリクス推定

## Increasing the accuracy of traffic matrix estimation for gradual reconfiguration of virtual network topologies

Yuichi OHSITA<sup>†</sup>, Takashi MIYAMURA<sup>††</sup>, Shin'ichi ARAKAWA<sup>†††</sup>, Shingo ATA<sup>††††</sup>,

Eiji OKI<sup>††</sup>, Kohei SHIOMOTO<sup>†††</sup>, and Masayuki MURATA<sup>††††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Economics, Osaka University

<sup>†††</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>††††</sup> Graduate School of Engineering, Osaka City University

<sup>††</sup> NTT Network Service Systems Laboratories

E-mail: <sup>†</sup>y-ohsita@econ.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>{miyamura.takashi,oki.eiji,kohei.shiomoto}@lab.ntt.co.jp,

<sup>†††</sup>{arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††††</sup>ata@info.eng.osaka-cu.ac.jp

**Abstract** We have proposed a VNT (virtual network topology) reconfiguration method with traffic matrix estimation considerations. In this method, by dividing the whole VNT transition sequence into multiple transitions, estimation errors are calibrated at each stage by using network state information of prior stages. However, when some of traffics suddenly change, this method cannot accurately estimate the traffic matrix, because this method uses also network state information before the sudden change of traffics. Therefore, in this paper, we propose an estimation method which can estimate accurately the traffic matrix even in the case of sudden change of traffic. In our proposed method, we eliminate the information of the traffics changing suddenly from the network state information of prior stages. And then, by using the information after the elimination, we can estimate the traffic matrix accurately even in the case of sudden change of traffic. In this paper, we simulate our estimation method and verify that our estimation method can accurately estimate the traffic matrix even in the case of sudden change of traffic.

**Key words** Traffic engineering, GMPLS, Traffic matrix estimation

## 1. はじめに

近年、ブロードバンドユーザの増加に伴い、コアネットワークのトラフィック量が急増しており、急増するトラフィックをいかに経済的にネットワークに収容するのかということが大きな課題となっている。コアネットワークにおいてトラフィックを効率的に収容する手法として、光ネットワーク技術を用いた光レイヤトラフィックエンジニアリング (TE) に関する研究が進められている [1–3]。光レイヤ TE では、光パスによって構築された仮想ネットワークトポロジ (VNT) 上でパケットが転送されているという状況を仮定し、VNT を観測された対地間のトラフィック量をもとに適切に再構成することにより、トラフィックの収容効率を向上させる。

しかし、VNT の再構成には、トラフィックマトリクスと呼ばれる送信元宛先間のトラフィック量が入力として必要となる。トラフィックマトリクスは直接観測することが難しいため、観測が容易な各光パスのリンク使用率から推定する手法が提案されている [4–6]。しかしながら、推定されたトラフィックマトリクスには推定誤差が含まれており、推定誤差を含んでいるトラフィックマトリクスを用いて VNT の再構成を行うと、一部の推定誤差が VNT の構成全体へ悪影響を与え、適切な VNT へ移行することができない [7]。そこで我々の研究グループでは、この悪影響を緩和するために、トラフィックマトリクス推定を行いつつ段階的に VNT 再構成を行う手法を提案した [8]。VNT 再構成を段階的に行うことにより、光パス追加・削除の影響を確認しながら VNT を移行することができ、不適切な箇所に光パスが構築されてしまうことを防ぐことができる。また、段階的再構成では、各ステージにおいて過去のステージのリンク使用率・ルーティング情報を推定に用いることにより、推定誤差を縮小させることができる。しかしながら、[8] の推定手法ではトラフィック変動を考慮しておらず、トラフィックが急激に変動した際には、現在のトラフィックとは合致しない過去の情報を推定に用いてしまうため、推定精度が悪化してしまうという問題がある。そこで、本稿では、過去の情報のうち、推定に用いる情報を取捨選択し、推定に悪影響を与える情報を取り除くことにより、トラフィックが急激に変化した場合にも推定精度を向上させる手法を提案する。

以下、2. において、[8] で提案した段階的再構成の概要について述べ、3. で提案するトラフィックマトリクス推定について述べる。そして、4. で提案手法の評価を行う。最後に、5. でまとめと今後の課題を述べる。

## 2. VNT の段階的再構成

本研究では、IP ルータと光クロスコネクタ (OXC) で構成される、IP・光マルチレイヤネットワークを想定する。このネットワークでは、IP ルータあるいは OXC のポートは、別の OXC のポートと物理リンクで接続されている。光レイヤでは、IP ルータ間に光パスを構築する。パケットレイヤでは、この構築された光パスを論理リンクとして扱い、論理リンクの集合を VNT として扱う。そして、パケットレイヤでは VNT 上でルーティングを行い宛先まで転送される。

推定誤差が含まれるトラフィックマトリクスを用いて VNT 再構成を行うと、推定誤差の影響により適切な VNT を構築することができない。そこで、我々の研究グループでは、[8] において、図 1 に示すように、従来の再構成が必要な間隔である Period を、複数のステージに分割し、各 Period で一度のみ行われていた再構成を、段階的に行う手法を提案した。再構成を段階的に行うことにより、各ステージでルーティング・トラフィック量の観測を行い、トラフィックマトリクスを推定しなおすことができ、次のステージの VNT 再構成には、推定しなおしたトラフィックマトリクスを用いることができる。また、各ステージでは、追加・削除を行う光パスの本数を制限することにより、

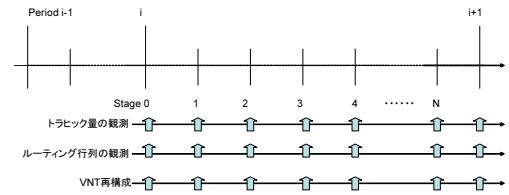


図 1 段階的 VNT 再構成とトラフィックマトリクス推定のタイミング

不適切な箇所に多くの光パスが構築されてしまうことを防ぐことができる。

本稿では、VNT 再構成は、[8] で提案された段階的再構成手法を用いて行われると仮定する。[8] で提案されている段階的再構成の手法は、最大リンク使用率が  $T_H$  以下となる VNT をできるだけルータのポートを使用せずに構築することを目標とし、以下の手順で動作する。

(1) 最大リンク使用率を計算する

(2) 最大リンク使用率が  $T_H$  を越えている場合は、そのリンクを経由しているトラフィックのうちトラフィック量が最大の対置間に、光パスを一本追加し、最大リンク使用率を緩和する

(3) 最大リンク使用率が  $T_H$  を越えていない場合は、リンク使用率の最も低いパスから順に、その光パスを削除しても最大リンク使用率が  $T_H$  を越えないかをチェックし、最大リンク使用率が  $T_H$  を越えない場合は、その光パスを削除する

(4) このステージ内で構築された光パスの本数が、一ステージに追加・削除可能な光パスの本数以内であれば、Step1 へ戻る。

## 3. 段階的再構成のためのトラフィックマトリクスの推定

VNT を段階的に再構築すると、短い間隔でルーティングが変化し、そのルーティングの変化が光パスのリンク使用率に直接影響を与える。つまり、VNT 再構成前後のリンク使用率を観測すると、ルーティング変更によるリンク使用率の変化を推定に用いることができるため、トラフィックマトリクスの推定に用いる情報を増やすことができ、推定精度を向上させることができる。そこで、我々の研究グループでは、[8] において、複数のステージで観測されたリンク使用率を用いて、トラフィックマトリクスの推定精度を向上させる手法を提案した。しかし、その手法では、トラフィックの変動を考慮していないため、トラフィックが急激に変動した場合は、推定精度が著しく悪化してしまうという問題があった。

そこで、本節では、トラフィックが急激な変動をした場合にも推定精度を悪化させないように、過去のステージの情報から急激に変化したトラフィックに関する情報を除去した後に推定用いる手法を提案する。提案するトラフィックマトリクス推定手法は、以下の手順で動作する。

(1) 推定精度悪化の原因となる急激な変化が含まれている対置間のトラフィックを特定

(2) 過去の観測結果の情報から急激に変化したトラフィックに関する情報を削除する

(3) 急激に変化したトラフィックに関する情報を削除された過去の観測結果を用いて推定する

以下、過去  $M$  ステージのリンク使用率の観測結果を用いて、トラフィックマトリクスを推定するものとする。つまり、ステージ  $n$  においては、ステージ  $n - M + 1$  から  $n$  までのリンク使用率の観測結果を用いた推定を行う。また、ステージ  $n$  の真のトラフィックマトリクスを  $T_n$ 、ステージ  $n - 1$  において推定されたトラフィックマトリクスを  $\hat{T}_{n-1}$  とあらわす。ステージ  $n$  におけるルーティング行列を  $A_n$  とあらわし、ステージ  $n$  の各光パス上を流れるトラフィックのトラフィック量をあらわす行列を  $X_n$

とする。この場合、 $X_n$  と  $A_n$ 、 $T_n$  は以下の関係を満たす。

$$X_n = A_n T_n \quad (1)$$

以降、提案するトラフィックマトリクス推定法の各手順について述べる。

### 3.1 急激に変化した対置間トラフィックの特定

複数のステージで観測されたリンク使用率を用いたトラフィックマトリクス推定において、推定精度の悪化の原因となるのは、急激に変化している対置間トラフィックである。急激に変化している対置間トラフィックに関する情報を、過去のステージの観測結果から取り除くことができれば、現在のトラフィックと合致しない情報を推定に用いることはなく、推定精度の悪化を防ぐことができる。

そこで、ここでは急激に変化した対置間トラフィックを特定することを目標とする。急激に変化した対置間トラフィックを特定する手法としては、[9]でリンク使用率の変化量を元に対置間のトラフィックの変化量を推定し、DDoS 攻撃の攻撃元を特定する手法が提案されている。本稿においても、この手法を応用し、急激に変化した対置間トラフィックの特定を行う。

以下に、急激に変化した対置間トラフィックの特定の手順を示す。まず、ステージ  $n-1$  の推定されたトラフィックマトリクスを元にしたリンク使用率の予測値  $A_n \hat{T}_{n-1}$  とステージ  $n$  の観測されたリンク使用率の差分  $D_n$  を以下のように求める。

$$D_n = X_n - A_n \hat{T}_{n-1} \quad (2)$$

急激に変動した対置間トラフィックが存在した場合、その対置間トラフィックが流れている経路のみ  $D_n$  が他と比べて著しく大きな値となる。そのため、 $D_n$  を入力とし、Tomogravity 法 [4] で対置間のトラフィックの増減値  $G_n$  を推定すると、 $G_n$  は、急激にトラフィックが変動した対置間のみ大きな値に推定される。そこで、 $D_n$  を元にした Tomogravity 法で推定した対置間トラフィックの増減値  $G_n$  の要素のうち、あらかじめ定めた閾値  $\alpha$  を越えた対置間のトラフィックを、トラフィックが急激に変化したトラフィックとみなす。

ここで、 $D_n$  は急激に変動した対置間トラフィックが流れているリンクのみ大きな値となるため、推定された対置間トラフィックの増減値  $G_n$  においても、急激にトラフィックが変動した対置間に対応する要素は大きな値に推定される。そのため、 $G_n$  には推定誤差が含まれているものの、 $G_n$  を用いて急激に変化した対置間トラフィックを特定することは可能である。また、トラフィックマトリクスを推定する際には式 (1) が成り立つように推定するため、 $\hat{T}_{n-1}$  に推定誤差が含まれていたとしても、それを元に計算した出入り口リンクのトラフィック量には誤差は含まれない。そのため、 $\hat{T}_{n-1}$  に推定誤差が含まれていた場合であっても、急激な変動が含まれていない対置間トラフィックの出入り口のリンクでは、 $D_n$  も小さな値となる。その結果、急激な変動が含まれていない対置間トラフィックに対応する  $G_n$  の値も小さな値に推定されることはなく、急激に変動した対置間トラフィックのみを検出することができる。

### 3.2 急激な変化を含むトラフィックに関する情報の除去

ここでは、前節で特定された急激な変化を含むトラフィックに関する情報を、過去のステージのリンク使用率の観測結果から削除する方法について述べる。

ステージ  $i$  のルーティング行列  $A_i$  から、前節で特定した急激な変化が含まれている対置間トラフィックに対応する要素を 0 と置き換えたものを  $A'_i$  とする。ここで、ステージ  $i$  のリンク使用率の観測情報  $X_i$  から、以下のようにして、急激なトラフィックの原因となる変化が含まれている対置間に関する情報を削除した  $X'_i$  を求める。

$$X'_i = X_i - (A_i - A'_i) \hat{T}_{n-1} \quad (3)$$

上述の式では、 $(A_i - A'_i) \hat{T}_{n-1}$  により、前のステージのトラヒッ

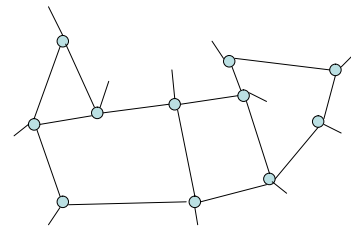


図2 Abilene のバックボーントポロジ

クマトリクスの推定結果のうち、ステージ  $n$  において急激な変動が発生した対置間の変動前のトラフィック量を各リンクにマッピングし、その値を  $X_i$  から引くことにより、急激な変動をした対置間のトラフィック量を削除したリンク使用率  $X'_i$  を求めることができる。

### 3.3 急激な変化除去後の観測結果を用いた推定

前節で求めた  $A'_i$ 、 $X'_i$  を用いて連立方程式を立てる。前節の処理により、トラフィックが急激に変動した対置間トラフィックの影響は  $A'_i$ 、 $X'_i$  から取り除かれている。つまり、 $X'_i$  に含まれているトラフィックはステージ  $n$  のものほとんど変化がない。そのため、以下の式が成り立つ。

$$X'_i = A'_i T_n + \epsilon_i \quad (4)$$

ここで、 $\epsilon_i$  はステージ  $i$  からステージ  $n$  のトラフィック変化量であるが、上述のように、 $X'_n$  からは、急激に変化した対置間トラフィックの影響は除外されているため、 $\epsilon_i$  の要素はいずれも十分に小さい。

そこで、ステージ  $n-M+1$  からステージ  $n$  の情報を用い、以下の方程式を作る。

$$\begin{bmatrix} X'_{n-M+1} \\ \vdots \\ X'_i \\ \vdots \\ X'_{n-1} \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'_{n-M+1} \\ \vdots \\ A'_i \\ \vdots \\ A'_{n-1} \\ A_n \end{bmatrix} T_n + \begin{bmatrix} \epsilon_{n-M+1} \\ \vdots \\ \epsilon_i \\ \vdots \\ \epsilon_{n-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

そして、 $\epsilon_i$  は十分に小さいという仮定により、擬似逆行列を用いて、以下のように  $\hat{T}_n$  を求める。

$$\hat{T}_n = \text{pinv} \left( \begin{bmatrix} A'_0 \\ \vdots \\ A'_i \\ \vdots \\ A'_{n-1} \\ A_n \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} X'_0 \\ \vdots \\ X'_i \\ \vdots \\ X'_{n-1} \\ X_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 $\text{pinv}(A)$  は  $A$  の擬似逆行列である。擬似逆行列は [10] のアルゴリズムを用いて計算することができ、擬似逆行列を用いた式 (6) では、式 (5) の  $\epsilon_i (n-M+1 \leq i \leq n)$  が最小となるような  $\hat{T}_n$  を求めることができる。

## 4. 評価

本節ではシミュレーションにより提案手法の評価を行う。この評価では、図2のトポロジを用い、各物理リンクあたりの最大波長数は16と設定した。また、対置間のトラフィック量は、Abileneにおいて5分間隔で観測したデータを元に、擬似的に急激な変動を加えることにより作成した。また、推定手法には過去20ステージの情報を用いるようにし、 $\alpha = 500$  Mbps とした。

図3に、提案手法により取捨選択した情報を用いて推定した場合、過去20ステージの情報をすべて用いて推定した場合、

Tomogravity 法で推定した場合の各ステージの平均二乗誤差の変動について示す。このシミュレーションでは、ステージ 10 において、ランダムに選んだ 3 つの対置間のトラフィック量を 4 Gbps 増加させている。その結果、Tomogravity 法で推定した場合は、対置間のトラフィック量の増加により、Tomogravity 法の仮定に従わなくなり推定精度が悪化してしまう。また、過去 20 ステージの情報をすべて用いた推定法では、推定誤差が著しく悪化し、Tomogravity 法で推定した場合よりも大きな誤差を生じてしまう。それに対して、提案手法では、トラフィックが急激に変動したステージ 10 においても、推定誤差を悪化させることなく、精度良くトラフィックマトリクスを推定することができる。これは、推定誤差を悪化させる急激に変動したトラフィックに関する過去の情報を取り除くことにより、現在のトラフィックに合致するリンク使用率の観測結果のみを用いて推定しているからである。

また、図 4 において、トラフィックの急激な変動後に追加で構築された光パスの本数を、上述の 3 種類の推定手法を用いて推定したトラフィックマトリクスを用いた場合と真のトラフィックマトリクスを用いた場合と比較する。本稿で対象とする VNT 再構成手法では、最大リンク使用率が  $T_H$  以下になるまでは、光パスが追加されるため追加で構築された光パスの本数は、線形に増加する。そして、最大リンク使用率が  $T_H$  以下という条件を満たした場合に、光パスの追加は終了し、光パスの削除が始まる。図において、光パスの削除開始後に構築された光パスの本数が振動しているのは、今回想定している VNT 再構成手法が、最大リンク使用率が  $T_H$  を上回った場合は光パスを追加し、下回った場合は光パスを削除するというトラフィックの変動に敏感な手法であるためである。また、真のトラフィックマトリクスを用いた場合よりも、提案手法の方が構築されている光パスの本数が少なくなることも起きているが、これも VNT 再構成手法がトラフィックの変動に敏感であることが原因であり、真のトラフィックマトリクスを用いて再構成した場合に構築された VNT では、トラフィックの変動により最大リンク使用率が  $T_H$  を越えてしまうのに、提案手法で推定したトラフィックマトリクスを用いた場合は、推定誤差のため、真のトラフィックマトリクスを用いた場合とは異なる VNT が構築され、トラフィックが変動しても最大リンク使用率が  $T_H$  を越えないということが発生しているからである。

急激な変動後、最大リンク使用率が  $T_H$  以下となるまで、つまり、光パスの削除が開始されるまでに構築された光パスの本数を比較すると、すべての情報を用いて推定した場合や Tomogravity 法を用いて推定した場合は、真のトラフィックマトリクスを用いた場合よりもより多くの光パスを要することが分かる。これは、推定誤差のため、不適切な箇所に光パスを構築してしまうことが原因であり、その結果、光パスを追加しても期待通りに最大リンク使用率を削減できず、より多くの光パスを要してしまう。それに対して、提案手法では、真のトラフィックマトリクスを用いた場合と同数の 5 本の光パスが追加された後に、光パスの削除が開始されている。つまり、提案手法を用い推定精度を向上させることにより、不適切な光パスの追加を防ぐことができる。

## 5. まとめと今後の課題

本稿では、急激なトラフィックの変動が発生した場合であっても、正確に推定可能なトラフィックマトリクス推定手法を提案した。提案手法では、まず、トラフィックが急激に変動した対置間のトラフィックを特定する。そして、過去のリンク使用率の観測結果から、急激に変動した対置間のトラフィックに関する情報を削除し、削除後の情報を用いてトラフィックマトリクスの推定を行う。本稿では、シミュレーションにより、提案手法がトラフィックが急激に変動した際にも正確にトラフィックマトリクスを推定

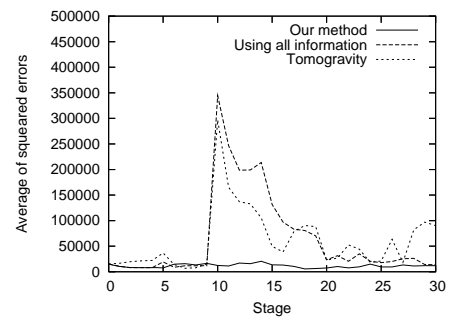


図3 推定誤差の変動

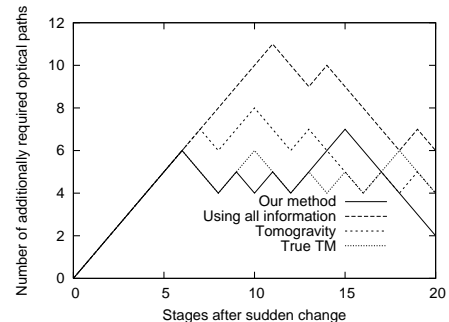


図4 構築された光パスの本数

することができることを示した。

今後の課題としては、トラフィックの変動に対し、より安定した VNT を構築することができる段階的 VNT 再構成手法の構築が挙げられる。

## 文 献

- [1] K. Shiomoto, E. Oki, W. Imajuku, S. Okamoto, and N. Yamana, "Distributed virtual network topology control mechanism in GMPLS-based multiregion networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, pp. 1254–1262, Oct. 2003.
- [2] A. Gencata and B. Mukherjee, "Virtual-topology adaptation for WDM mesh networks under dynamic traffic," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11, pp. 236–247, Apr. 2003.
- [3] N. Sreenath, C. S. R. Murthy, B. H. Gurucharan, and G. Mohan, "A two stage approach for virtual topology reconfiguration of WDM optical networks," *Optical Network Magazine*, vol. 2, pp. 58–71, May/June 2001.
- [4] Y. Zhang, M. Roughan, N. Duffield, and A. Greenberg, "Fast accurate computation of large-scale ip traffic matrices from link loads," in *Proceedings of ACM SIGMETRICS 2003*, pp. 206–217, June 2003.
- [5] C. Tebaldi and M. West, "Bayesian inference of network traffic using link count data," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 93, pp. 557–576, June 1998.
- [6] J. Cao, D. Davis, S. V. Wiel, and B. Yu, "Time-varying network tomography," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 95, pp. 1063–1075, Feb. 2000.
- [7] Y. Ohsita, T. Miyamura, S. Arakawa, S. Ata, E. Oki, K. Shiomoto, S. Urushidani, and M. Murata, "Traffic engineering strategies in IP and optical multi-layer networks," *Technical Reports of IEICE (PN2006-11)*, pp. 7–12, Aug. 2006.
- [8] Y. Ohsita, T. Miyamura, S. Arakawa, S. Ata, E. Oki, K. Shiomoto, and M. Murata, "Gradually reconfiguring virtual network topologies based on estimated traffic matrices," to be presented at *INFOCOM 2007*, May 2007.
- [9] Y. Ohsita, S. Ata, and M. Murata, "Identification of attack nodes from traffic matrix estimation," in *Proceedings of 4th International Trusted Internet Workshop*, Dec. 2005.
- [10] J. C. Nash, *Compact Numerical Methods for Computers: Linear Algebra and Function Minimisation*. Adam Hilger, 1990.