

研究種目：若手研究（スタートアップ）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19800023
 研究課題名（和文） 短期的な変動も検出可能なトラフィックマトリクス推定技術の開発
 研究課題名（英文） Traffic matrix estimation methods which can follow short-term variations
 研究代表者
 大下 裕一（OHSITA YUICHI）
 大阪大学・大学院経済学研究科・助教
 研究者番号：80432425

研究成果の概要：

異常検出にも適用できるほど短期的なトラフィック変動にも追従したトラフィックマトリクス推定を行う手法の提案を行った。提案手法では、すべての情報を同時に収集できない場合であっても、過去に異なる箇所を観測されたリンク使用率と現在のリンク使用率を用いて、短期的なトラフィック変動に追従したトラフィックマトリクスを正確に推定する。シミュレーションにより、提案手法が、正確に突発的な変動が発生した場合であっても、トラフィックの短期変動にも追従した推定を行うことができることを確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,130,000	0	1,130,000
2008年度	1,220,000	366,000	1,586,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,350,000	366,000	2,716,000

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：トラフィックマトリクス・推定

1. 研究開始当初の背景

各エッジルータ間のトラフィック量はトラフィックマトリクスとよばれ、ネットワークを管理・運営する上で重要な情報となっている。特に、インターネットが重要なインフラとなり、セキュリティの確保が重要な課題となっている近年では、トラフィックマトリクスを用いて異常検知する手法の検討が進められている。しかしながら、トラフィックマトリクスを得るためには、エッジルータでフロー単位の packets 量を観測解析する必要があり、エッジルータの負荷の増大をまねいてしまう。

ルータに負荷をかけずにトラフィックマトリクスを得る手法として、各ルータで容易に測定可能な入出力トラフィック量、リンク使用率などの情報から、エッジ間トラフィックを推定する、トラフィックマトリクス推定に関する研究が行われている。また、我々の研究グループにおいても、トラフィックマトリクス推定手法を応用し、リンク使用率から DDoS 攻撃の攻撃元を特定する手法の提案を行っている。しかしながら、トラフィックマトリクス推定を行う際にも、ルータからリンク使用率などの情報を収集する必要があり、頻繁な情報収集

はルータの負荷を増大させるため、観測間隔を短く設定することはできない。一般的なルータでは観測間隔を5分以下に設定できないため、分オーダーのトラヒックマトリクス推定ができない。その結果、攻撃検出などの即時性が要求される場面への適用は現実的には難しい。また一方で、ルータへの影響を考慮すると、各ルータに対する観測間隔は可能な限り長い方が望ましい。そのため、以上のトレードオフを解決し、ルータへの問い合わせ頻度を可能な低くしつつ、トラヒックの短期変動に追従可能なトラヒックマトリクス推定手法が必要とされている。

2. 研究の目的

トラヒックマトリクスの取得・推定を行う際には、ルータからリンク使用率などの情報を収集する必要があり、頻繁な情報収集はルータの負荷を増大させるため、観測間隔を短く設定することはできない。また一方で、ルータへの影響を考慮すると、各ルータに対する観測間隔は可能な限り長い方が望ましい。以上のトレードオフを解決するため、本課題ではルータへの問い合わせ頻度を可能な限り低くしつつ、短い間隔で推定可能なトラヒックマトリクス推定手法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

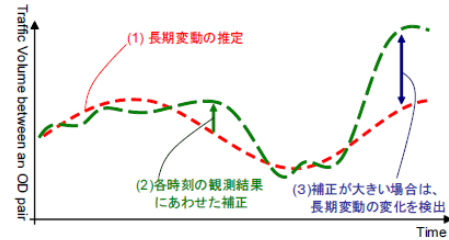
各ルータからの情報収集周期を長くしつつ短期変動に追従したトラヒックマトリクスを推定する手法として、毎回異なる情報を収集し、異なる時間に収集した情報を元に現在のトラヒックマトリクスを収集する手法が考えられる。そこで、本課題では、異なる時刻に収集した情報を元に、現在のトラヒックマトリクスを推定する手法の検討を行い、その手法を適用することにより、各情報を収集する周期は長くしつつ、短期変動に追従したトラヒックマトリクスの推定を行う。

4. 研究成果

(1) 提案手法の概要

長期間にわたるリンク上のトラヒック量の観測結果を用いて、トラヒックの長期変動の傾向を推定し、それに補正を加えることにより、各時刻の変動に追従したトラヒックマトリクス推定を行う手法を提案する。また、提案手法では、トラヒックの急変に対しても、それを検出し、トラヒックの長期変動の推定を行いなおすことにより、急変したトラヒックに追従した推定を行う。提案する短

期変動に追従可能なトラヒックマトリクス推定手法の概要を下図に示す。提案手法では、以下の手順により、



トラヒックマトリクスの推定を行う。

- 1) トラヒックマトリクスの長期変動を推定する。
- 2) 推定された長期変動を元に、各時刻のリンクリンク上のトラヒック量の観測結果に合致するように補正を加えることにより、各時刻のトラヒックマトリクスの推定結果を得る。
- 3) 手順2 で加えた補正の大きさを元に、トラヒック変動の傾向の変化を検出する。トラヒック変動の傾向の変化を検出した際には、傾向変化以前の情報を除去し手順1へ。検出しなかった場合は終了。

① トラヒックマトリクスの長期変動の推定

一般的に、対地間のトラヒック量は、日中に多い箇所・夜間に多い箇所、平日に多い箇所・休日に多い箇所があり、1日単位、あるいは、1週間単位で周期変動をしている。そこで、トラヒックの長期変動を以下のような周期関数でモデル化する。

$$f_{i,j}(n) = \sum_{h=0}^{N_f} \left(\alpha_{h,i,j} \cos \left(\frac{2\pi n h}{N_{\text{cycle}}} \right) + \alpha_{h+N_f,i,j} \sin \left(\frac{2\pi n h}{N_{\text{cycle}}} \right) \right)$$

ここで、各時刻に観測されたリンク使用率等のトラヒック情報に関しては、 $X(n) = A(n)T(n)$ という式が成り立つ。ただし、 $X(n)$ は時刻 n に観測されたトラヒック情報、 $T(n)$ は時刻 n のトラヒックマトリクス、 $A(n)$ は $X(n)$ と $T(n)$ の対応付けを表す行列である。そこで、これを利用し、以下のように、観測されたすべての情報に合致する長期変動のパラメータ α を定める。

$$\text{minimize} \sum_{k=n-M+1}^n |X(k) - A(k)\hat{T}^{\text{est}}(k)|^2$$

ただし、

$$\hat{T}^{\text{est}}(k) = \begin{bmatrix} f_{0,0}(k) \\ \vdots \\ f_{i,j}(k) \\ \vdots \\ f_{N,N}(k) \end{bmatrix}$$

- ② 各時刻の観測結果を元にした補正

推定されたトラヒックの長期変動をもとに補正を加えることにより、各時刻のトラヒックマトリクスを得る。補正は以下の手順で行うものとする。まず、前節で推定したトラヒックの変動を元に、時刻 n におけるトラヒックマトリクスの予測値 $\hat{T}^{\text{est}}(n)$ を作成する。そして、以下のように最小二乗法を行うことにより、各時刻のトラヒックマトリクスを得る。

$$\text{minimize} |\hat{T}(n) - \hat{T}^{\text{est}}(n)|^2$$

ただし、

$$\text{minimize} |A(n)\hat{T}(n) - X(n)|^2$$

- ③ トラヒック変動の傾向の変化への対処

トラヒック変動の傾向が変化した対地間トラヒックが存在する場合には、その対地間トラヒックに関する過去の情報を推定に使い続けると、周期関数で適切にフィッティングすることはできず、長期変動を正確に推定することができない。その結果、大きな推定誤差が生じ、トラヒック変動の傾向の変化に追従した推定を行うことができなくなる。そこで、提案手法では、トラヒック変動の傾向が変化した場合には、それを検知し、該当する対地間に関する過去の観測結果を除去した上で、長期変動の推定を行いなおす。

トラヒック変動の傾向が変化すると、推定された長期変動と現在の観測結果が合致しなくなる。そのため、トラヒック変動の傾向が変化した場合、推定された長期変動と現在の観測結果に合わせて補正した結果の変化した対地間トラヒックに対応する要素の差が著しく大きくなる。しかしなが

ら、対地間によってトラヒックの短期変動の大きさは異なるため、単一の閾値を用いた検出をおこなうと、短期変動が大きい対地間を誤って、トラヒック変動傾向の変化が発生したと検出してしまいう可能性がある。

そこで、提案手法では、スミルノフ・グラブス検定を行い、トラヒックの急激な変化を検出する。まず、各対地間トラヒックについて、以下の値を計算する。

$$d_{i,j} = \frac{\hat{t}_{i,j}^{\text{est}}(n) - \hat{t}_{i,j}(n) - \mu_{i,j}}{\sigma_{i,j}}$$

ここで、 $\hat{t}_{i,j}^{\text{est}}(n)$ は推定された長期変動の値、 $\hat{t}_{i,j}(n)$ は補正後の値、 $\mu_{i,j}$ 、 $\sigma_{i,j}$ は推定された長期変動の値と補正後の値の差の平均・分散である。そして、その値が閾値を超えた場合、トラヒックが急激に変動したものとして検出する。

トラヒックの変動傾向が変化した対地間が存在する場合、該当する対地間トラヒックに関する過去の観測結果を長期変動の推定に用いてしまうと、現在のトラヒックと異なる観測結果を推定に用いてしまうため、大きな推定誤差を生じてしまう。そこで、提案手法では、長期変動の傾向の変化を検出した場合は、該当する対地間トラヒックに関する過去の観測結果を除去し、長期変動の推定を行いなおす。

時刻 n においてトラヒックの変動傾向の変化が検出された場合について、変動傾向の変化が検出されたトラヒックに関する過去の観測結果を除去する手順を以下に示す。まず、ルーティング行列 $A(i)$ ($i < n$) の該当する対地間トラヒックに関する要素を 0 と置き換えることにより、該当する対地間トラヒックに関する情報を取り除いたルーティング行列 $A'(i)$ を構築する。次に、以下のように、観測されたリンク上のトラヒック量から、該当する対地間トラヒックに関する情報を除去する。

$$X'(i) = X(i) - (A(i) - A'(i)) \hat{T}^{\text{est}}(i)$$

ここで、 $\hat{T}^{\text{est}}(i)$ は時刻 $n-1$ に推

定された長期変動をもとに計算した時刻 i のトラヒックマトリクスをあらわす。これにより、観測された各リンク上のトラヒック量から該当する対地間トラヒックの推定値を取り除くことができる。ここで、時刻 n に推定された長期変動を用いず、時刻 $n-1$ に推定された長期変動を用いるのは、時刻 n の長期変動の推定では変動の傾向の変化の前後両方の観測結果を用いているため、正確な推定を行うことができているためである。

そして、変動傾向の変化以前の観測結果を除去した後は、長期変動の推定を再度行う。

(2) 評価結果

提案するトラヒックマトリクス推定手法について、シミュレーションによる評価を行った。本シミュレーションでは、各時刻において観測可能なトラヒックが異なる場合のうち、TE により経路変更が発生する場合を仮定し、各時刻の提案手法で推定したトラヒックマトリクスの精度を調べた。シミュレーションでは、[1] で提案されたトラヒックエンジニアリング手法を EON(19 ノード、38 リンク) のトポロジに適用した。対地間トラヒックは、振幅・位相をランダムに発生させた sin 関数を元に、変動を加えることにより生成した。

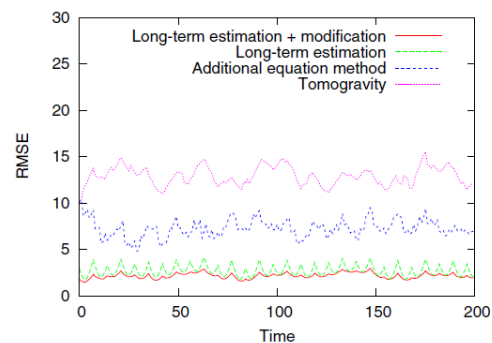
本評価においては、以下において定義される Root Mean Squared Error (RMSE) と Root Mean Squared Relative Error defined below (RMSRE) を用いて、推定の正確さの評価を行う。

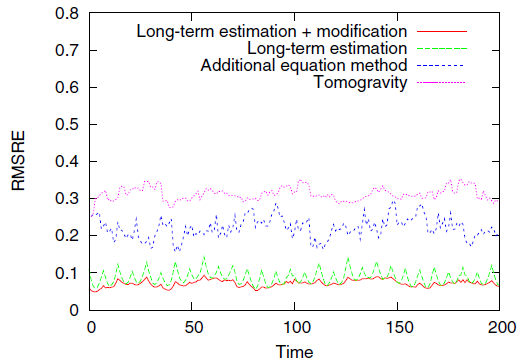
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{1 \leq i, j \leq N} (\hat{t}_{i,j}(n) - t_{i,j}(n))^2}$$

$$\text{RMSRE} = \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum_{1 \leq i, j \leq N, t_{i,j} > \bar{i}} \left(\frac{\hat{t}_{i,j}(n) - t_{i,j}(n)}{t_{i,j}(n)} \right)^2}$$

RMSE はトラヒックマトリクス全体での推定誤差の大きさを表す指標であり、RMSRE は相対的な誤差を表す。ただし、実際のトラヒック量が小さな箇所における相対誤差は重要ではないので、実際のトラヒック量が閾値以上の箇所では RMSRE は計算を行う。以下の評価では、閾値を超えるトラヒックの総量が全トラヒックの 75% となるように閾値を設定した。

まず、急激なトラヒック変動が含まれていない場合について評価を行った。本評価においては、提案手法と以下の手法の比較を行う。(1) 各時刻の観測結果のみを用いた推定手法。この手法との比較を行うことにより、過去の観測結果を用い、推定に用いる情報を追加することの有効性を評価する。各時刻の観測結果を用いる手法としては、Simple Gravity Model を用いた Tomogravity 法を用いる。なお、今回のシミュレーション環境では、対地間トラヒック量はランダムに生成されているため、Simple Gravity Model の仮定に従っていないが、実ネットワークにおいても、Gravity Model に従わない場合もあることが従来研究より分かっており、今回のシミュレーションでは、そのような場合においても、現在得られた観測結果のみではなく過去の観測結果を用いて推定することにより、推定精度を向上させることができることを確認する。(2) 過去の複数の観測結果を長期変動を考慮せずに用いた手法。この手法と比較を行うことにより、長期変動を考慮することの効果を検証する。長期変動を考慮せずに、過去の複数回の観測結果を用いる手法では、[1] で提案されている手法(以降、Additional Equation method と呼ぶ)を用いる。(3) 長期変動の推定のみを行い、補正を加えない方法。この手法と比較することにより、推定された長期変動に補正を加える有効性を示す。評価結果を以下の図に示す。

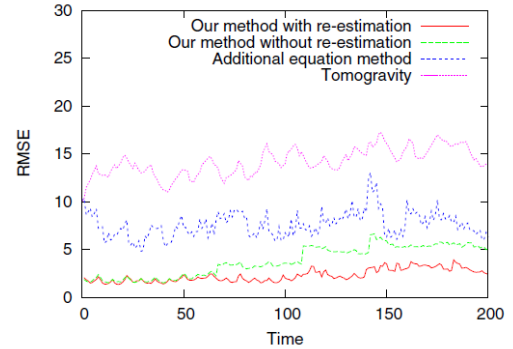




これらの結果より、Tomogravity 法で推定した場合が最も推定誤差が大きいことが分かる。これは、今回のシミュレーション環境においては、Simple gravity model にトラヒックが従っておらず、そのような場合には、各時刻に観測されたトラヒック量しか推定に用いていない Tomogravity 法では、推定に用いる条件が少なく正確な推定を行うことができないためである。また、Additional Equation 法においても、推定精度が安定せず、多くの時間帯で著しく大きい推定誤差が生じていることが分かる。これは、Additional Equation 法では、短い間隔で TE が行われ、トラヒックがあまり変動しないうちに複数種類の観測結果が得られることを仮定しており、複数種類の観測結果を得るうちにトラヒックが変動してしまう環境においては、正確な推定を行うことができないことが原因である。それに対して、長期変動の推定では、より多くの情報を推定に用いており、また、トラヒックの変動を考慮した推定を行うことにより、より正確な推定を行うことができている。さらに、それに各時刻のリンク上のトラヒック量の観測結果にあわせて補正をすることにより、周期変動モデルに含まれないトラヒック変動へも追従するように補正を加えることができるため、より正確な推定結果を得ることができている。このように、長期変動を推定し、それに補正を加えることにより、各時刻のトラヒックマトリクスを正確に推定することができる。

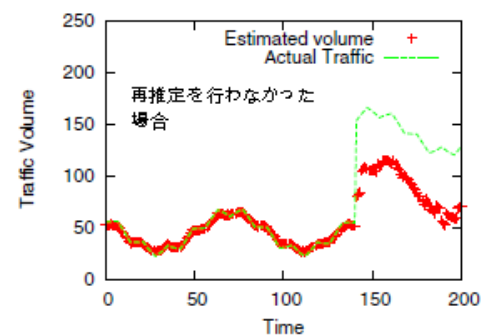
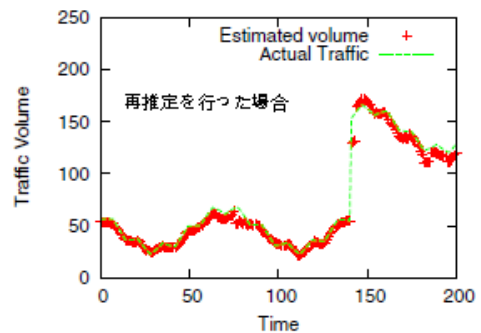
次に、トラヒックに急激な変動を加えた場合のシミュレーションを行った。本シミュレーションでは、それぞれ、時刻 70、110、140 に別々の対地間トラヒックに急激な変動を加えた。

その場合の RMSE の時間変動を以下に示す。



図より、Tomogravity 法、Additional Equation 法では、推定に用いる情報が少ない、あるいは、トラヒック変動を考慮していないため、推定誤差が大きい。また、提案手法で再推定を行わなかった場合は、トラヒックの急変より前の時間帯では、推定誤差は小さいものの、トラヒック変動が加わるにつれ、やや推定誤差が大きくなっている。それに対して、提案手法で再推定を行った場合は、推定誤差は小さいままである。この差は、トラヒックの急変への対応の差が原因である。

そこで、トラヒックの急変の影響の詳細を見るため、トラヒックの急変を加えた対地間トラヒックの推定結果を比較する。以下に急変した対地間トラヒックの再推定を行った場合、行わなかった場合の推定結果を示す。



これより、再推定を行わない場合は、トラヒックの急変に追従した推定を行うことができていないことが分かる。これは、再推定を行わない場合は、トラヒックの急激な変動の前の観測結果も推定に用いてしまうことが原因である。その結果、現在のトラヒックの傾向とは異なる観測結果を推定に用いてしまうため、正確な推定を行うことができない。それに対して、再推定を行うことにより、トラヒックの急変に追従した推定を行うことができています。つまり、過去の観測結果を除去して再推定を行うことにより、急激な変動以前の観測結果が推定に悪影響を与えることを防ぐことができる。

このように、本研究では、トラヒック変動を考慮し、トラヒックの急変に対しても、検出・対応を行うトラヒックマトリクス推定手法を提案し、それにより、短期変動にも追従した推定を行うことができることをシミュレーションにより確認した。この手法を用いることにより、すべてのトラヒック情報を同時に収集しなくても、過去に収集した情報と合わせて、正確に現在のトラヒックマトリクスを推定することができるようになり、ルータの負荷を避けつつ、短期変動に追従したトラヒックマトリクスを把握することが可能となる。

参考文献

[1] Yuichi Ohsita, Takashi Miyamura, Shin'ichi Arakawa, Shingo Ata, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, "Gradually Reconfiguring Virtual Network Topologies based on Estimated Traffic Matrices," in Proceedings of IEEE INFOCOM 2007, pp. 2511-2515, May 2007.

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 Yuichi Ohsita, Takashi Miyamura, Shin'ichi Arakawa, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata "Estimation of current traffic matrices from long-term traffic variations," IEICE Transactions on Communications, Vol.E92-B, No.01, pp. 171-183, Jan 2009. (査読有)

[学会発表] (計 2 件)

① Yuichi Ohsita, Takashi Miyamura, Shin'ichi Arakawa, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata, "Estimating Current Traffic Matrices Accurately by Using Long-term Variations Information," in Proceedings of Fifth International Conference on Broadband Communications, Networks, and Systems (Broadnets 2008), Sep. 2008 (査読有)

② Yuichi Ohsita, Takashi Miyamura, Shin'ichi Arakawa, Eiji Oki, Kohei Shiomoto, and Masayuki Murata "Estimating Current Traffic Matrices Accurately by Using Long-term Variations Information," 電子情報通信学会技術研究報告(PN2008-15), pp. 7-12, Aug 2008. (査読無)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大下 裕一 (OHSITA YUICHI)

大阪大学・大学院経済学研究科・助教

研究者番号：80432425

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし