

特別研究報告

題目

トラヒックエンジニアリングにおける収集情報量削減のための
観測リンク選択手法の提案と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

樽谷優弥

平成 22 年 2 月 16 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

トラフィックエンジニアリングにおける収集情報量削減のための
観測リンク選択手法の提案と評価

樽谷優弥

内容梗概

ネットワーク上で提供されるサービスが多様化し、サービスの要求に合致しつつ、迅速にサービスを提供することができるネットワーク仮想化が注目されている。ネットワークが仮想化された環境では、トラフィック変動が発生しても、仮想ネットワークの構成や経路を動的に変更するトラフィックエンジニアリング手法を用いることにより、各仮想ネットワーク内の輻輳の発生や遅延の増大を解消し、サービスの要求に合致した状態を維持することができる。トラフィックエンジニアリングを行うためには、定期的に各リンクのリンク使用率を収集することにより、各仮想ネットワークを流れるトラフィック量を把握する必要がある。しかしながら、制御が必要な仮想ネットワークの数が増えると、全仮想ネットワークの全リンクの情報を頻繁に収集することは、情報収集を行う対象のリンクの本数が膨大となるため、困難となる。本報告では、一部の観測リンクを選択し、選択された観測リンクの情報から、ネットワークの全リンクのリンク使用率を推定することにより、トラフィックエンジニアリングを行うために観測・収集が必要な情報量を削減する手法を提案する。また、リンク使用率の推定精度は、観測リンクの選択方法に依存すると考えられるため、リンクを経由する対地間トラフィックの本数を基準とした手法、リンク上のトラフィック量が多いリンクを選択する手法、トラフィック量が小さいリンクを選択する手法の 3 種類の観測リンク選択手法を提案し、比較評価を行うことにより、収集対象外のリンクのリンク使用率を最も正確に推定することができる観測リンク選択手法を明らかにする。評価結果より、経由する対地間トラフィックの本数が少ないリンクを観測リンクとして選択する手法が、最も正確にリンク使用率を推定ことができ、全リンクのうち 4 割のリンクを選択することにより、推定されたリンク使用率の平方平均二乗相対誤差をネットワークに流入・ネットワーク外に流出するトラフィック量のみを用いて推定した場合の 1/10 にすることができることが明らかとなった。

主な用語

トラフィックエンジニアリング、トラフィックマトリクス、Tomogravity 手法、推定

目次

1	はじめに	4
2	関連研究	6
2.1	トラヒックエンジニアリング	6
2.2	トラヒックマトリクスの推定手法	7
3	収集情報量削減のための観測リンク選択手法	10
3.1	観測リンク選択による収集情報削減	10
3.2	観測リンクの選択手法	11
4	観測リンク選択手法の評価	13
4.1	評価方法	13
4.2	ツリー状トポロジにおける評価	14
4.3	格子状トポロジにおける評価	20
4.4	AT&T トポロジにおける評価	25
4.5	考察	28
5	おわりに	29
	謝辞	30
	参考文献	31

目 次

1	対地間トラヒック量とリンクのトラヒック量の関係	8
2	ツリー状トポロジ	14
3	ツリー状トポロジにおける評価結果	17
4	ツリー上トポロジで選択本数が少ない場合における観測リンク	18
5	ツリー上トポロジで選択本数が多い場合における観測リンク	19
6	格子状トポロジ	20
7	格子状トポロジにおける評価結果	23
8	格子状トポロジで選択される観測リンク	24
9	AT&T トポロジ	25
10	AT&T トポロジにおける評価結果	27

1 はじめに

近年、クラウド・コンピューティングに代表される多様なサービスがネットワーク上で提供されるようになっており、多様なサービスをサービスの要求に合致しつつ、迅速に展開することを可能とする、ネットワーク仮想化 [1-3] が注目されている。ネットワーク仮想化技術により、サービスごとに仮想ネットワークを構築することで、物理的な制約を受けずに、各サービスの要求に合致したネットワークを提供することができる。

仮想ネットワークは対象とするサービスの要求に合わせ、輻輳や大きな遅延が生じないように構築されるが、トラフィックが変動し、構築時の想定と異なるトラフィック量が流れるようになると、輻輳や大きな遅延が生じてしまう。このような著しいトラフィック変動が生じた場合には、現在のトラフィックに合わせて仮想ネットワークのトポロジや経路を動的に変更するトラフィックエンジニアリングと呼ばれる手法 [4-8] を用いることにより、輻輳や大きな遅延を解消することが可能である。トラフィックエンジニアリングを行うためには、ネットワーク内に流れているトラフィック量を把握する必要がある。トラフィックエンジニアリングにおける現在のトラフィック量の把握は、送信元・宛先間のトラフィック量を表すトラフィックマトリクスを用いることにより可能である。しかし、トラフィックマトリクスを直接観測・収集を行うことは、収集が必要な情報量が多く、困難である。そのため、トラフィックマトリクスの代わりに、トラフィックマトリクスよりも必要な収集情報量が少ないリンク使用率を入力として用い、トラフィックエンジニアリングを行う手法が検討されている [5-8]。

しかしながら、今後、ネットワーク上のサービスの多様化がさらに進み、トラフィックエンジニアリングが必要な仮想ネットワークの数も著しく増加すると考えられる。多数の仮想ネットワークでトラフィックエンジニアリングを行うには、トラフィックエンジニアリングが必要な全仮想ネットワークの全リンクのリンク使用率が必要となり、収集が必要な情報量が著しく大きくなる。そのため、全リンクの情報を頻繁に収集することは困難であり、少数のリンクの情報から、ネットワーク全体のトラフィック量を把握する必要がある。

文献 [9] では、ネットワーク内の一部の地点のトラフィック量しか同時刻に収集できない場合に、収集できなかった地点のトラフィック量を、同時刻の他の地点のトラフィック量や、同じ地点の過去のトラフィック量から推定する手法が提案されている。しかし、この手法では、収集できなかった箇所のトラフィック量の推定は過去の観測結果に基づいて行われるため、過去の傾向とは異なるトラフィック変動が発生した場合に、正確な推定を行うことができない。そのため、過去の傾向とは異なるトラフィック変動が発生した場合にも正確にリンク使用率を把握するためには、過去の情報に依存せず、各時刻に観測・収集されたトラフィック量のみから、ネットワーク内の全リンクのリンク使用率を推定する必要がある。

本報告では、各時刻に観測・収集された少数のリンクのリンク使用率のみから、トラヒッ

クエンジニアリングの入力として必要なネットワーク内の全リンクのリンク使用率を推定する手法を提案する。提案手法では、まず、観測リンクを選択し、選択されたリンクのリンク使用率を収集する。その後、収集されたリンク使用率を用いて、ネットワーク内の全ノード間のトラフィックマトリクスを推定する。そして、推定されたトラフィックマトリクスを用い、収集を行わなかったリンクのリンク使用率を推定する。

また、提案手法におけるリンク使用率の推定の精度は観測するリンクの数および観測対象とするリンクに依存すると考えられる。そこで、観測リンクの選択方法として、リンク上を経由する対地間トラフィックの本数を基準として観測リンクの選択を行う手法、リンク上のトラフィック量が多いリンクを選択する手法、トラフィック量が小さいリンクを選択する手法の3種類の手法を提案し、比較評価を行うことにより、観測対象外のリンクのリンク使用率を最も正確に推定することができる観測リンクの選択手法を明らかにする。

本報告の構成は以下のとおりである。2章では、トラフィックエンジニアリングとトラフィックマトリクス推定手法に関する関連研究を紹介する。3章ではトラフィックエンジニアリングに必要な収集情報量を削減するための観測リンク選択手法を提案する。4章では、シミュレーションにより、観測リンク選択手法を比較し、最も正確に全リンクのリンク使用率の推定することができる観測リンク選択手法を明らかにする。5章では本報告のまとめと今後の課題について述べる。

2 関連研究

2.1 トラヒックエンジニアリング

ネットワーク管理者は、想定したトラヒックを輻輳や大きな遅延を発生させることなく収容可能なように、ネットワークのトポロジや経路を設計する。しかしながら、著しいトラヒック変動が発生し、トラヒックが設計時の想定と異なるものになった場合、設計されたトポロジや経路は、現在のトラヒックに適したものではなくなり、輻輳が発生する、大きな遅延が生じるという問題がおこる。時間変動が大きなトラヒックを収容するために、トラヒックエンジニアリング [4-8] と呼ばれる技術の研究が進められている。トラヒックエンジニアリングでは、現在のトラヒックを輻輳や大きな遅延を生じることなく収容できるように、経路やネットワークのトポロジを動的に変更する。

現在のトラヒックを輻輳や大きな遅延を生じることなく収容可能な経路・トポロジは、経路・トポロジを制御する Path Computation Element (PCE) と呼ばれるサーバ [10] で計算される。PCE が経路・トポロジを計算する際には、ネットワーク内の各地点に現在流れているトラヒック量を把握する必要がある。文献 [4] の手法では、対地間トラヒック量をあらゆるトラヒックマトリクスを入力として用いることにより、現在のトラヒックを輻輳が生じることなく収容可能な経路を設計する。しかしながら、トラヒックマトリクスを直接観測・収集を行うことは、収集が必要な情報量が多い等の問題があり、困難である。そのため、リンク使用率から推定されたトラヒックマトリクスを用いてトラヒックエンジニアリングを行う手法 [5-7]、リンク使用率をもとにトラヒックマトリクスの取りうる範囲を定めてトラヒックエンジニアリングを行う手法 [8] などの、トラヒックマトリクスの代わりにリンク使用率を入力として用いたトラヒックエンジニアリング手法に関する研究が進められている。

しかしながら、ネットワークの仮想化が進み、多くの仮想ネットワークでトラヒックエンジニアリングが必要となると、リンク使用率の観測・収集が必要なリンクの本数が著しく大きくなり、全リンクの情報を PCE が頻繁に収集することは困難となる。そのため、現在のトラヒックを正確に把握することができず、トラヒックエンジニアリングによる輻輳や大きな遅延の解消を行うことができない可能性がある。

そこで、本報告では、全リンクのリンク使用率を観測・収集しなくても、一部のリンクのリンク使用率からトラヒックエンジニアリングに必要な全リンクのリンク使用率を正確に推定可能な手法を提案する。

2.2 トラヒックマトリクスの推定手法

トラヒックマトリクスはネットワーク内のノード数を N とすると、ネットワークの内にノード s から流入し、ノード d から流出する $T_{s,d}$ を要素とする以下の行列である。

$$T = \begin{bmatrix} T_{1,1} \\ T_{1,2} \\ \vdots \\ T_{N,N} \end{bmatrix} \quad (1)$$

しかしながら、トラヒックマトリクスを直接観測・収集するには、送信元・宛先ごとのトラヒック量を集計・収集する必要があり、集計を行うノードの負荷が高くなる、収集しなければならない情報量が大きという問題がある。

そこで、リンク使用率からトラヒックマトリクスを推定する手法が提案されている。リンク使用率とトラヒックマトリクスの各要素の関係を図1に示す。図1に示されるように各リンクのリンク使用率はそのリンクを経由する対地間トラヒックの総和で表わされる。すなわち、以下の連立方程式が成立する。

$$AT = X \quad (2)$$

ただし、 L はネットワーク内のリンク数、 X はリンク i 上のトラヒック量 X_i を要素とする以下の行列である。

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_L \end{bmatrix} \quad (3)$$

また、 A は対地間トラヒック $T_{s,d}$ がリンク l を経由する割合を表す、 $A_{s,d,l}$ を要素とする以下の式で表わされる行列である。

$$A = \begin{bmatrix} A_{1,1,1} & A_{1,2,1} & \cdots & A_{N,N,1} \\ A_{1,1,2} & A_{1,2,2} & \cdots & A_{N,N,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{1,1,L} & A_{1,2,L} & \cdots & A_{N,N,L} \end{bmatrix} \quad (4)$$

以降、本報告では A をルーティング行列と呼ぶ。

トラヒックマトリクス推定手法では観測されたリンク使用率をもとに、式(2)を満たすようにトラヒックマトリクスを推定する。しかしながら、トラヒックマトリクスの要素数に対

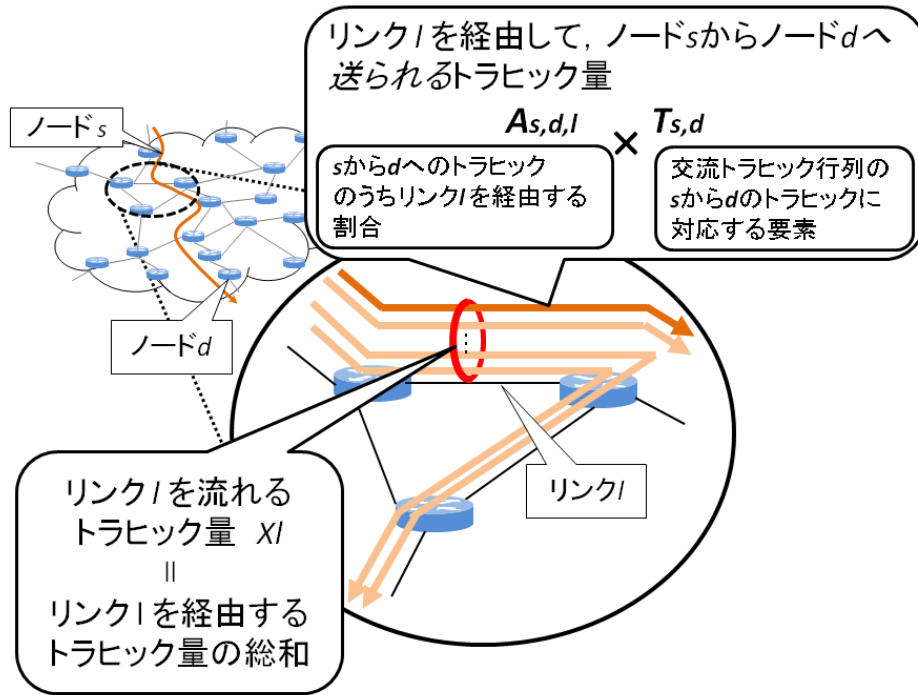


図 1: 対地間トラフィック量とリンクのトラフィック量の関係

し連立方程式の数が著しく少ないため、式 (2) を満たすトラフィックマトリクスを一意に決めることができない。そこで、トラフィックマトリクス推定手法では、各対地間トラフィック量がポアソン分布に従って変動する [11]、正規分布に従って変動する [12, 13]、周期的な変動をする [14]、トラフィックマトリクスの各要素が送信元・宛先ノードの入出力リンクのトラフィック量の積に比例する [15] 等のモデルを用い、モデルに合致しつつ、式 (2) を満たすトラフィックマトリクスの推定を行う。

Tomogravity 手法 [15] はトラフィックマトリクスの各要素が送信元・宛先ノードの入出力リンクのトラフィック量の積に比例するという Gravity モデルを用いたトラフィックマトリクス推定手法である。Tomogravity 手法では、まず、リンク上のトラフィック量の観測値をもとに、以下の式により、Gravity モデルに従うように対地間トラフィック量 $T_{s,d}^{grav}$ の推定値を得る。

$$T_{s,d}^{grav} = X_{l_s^{in}} \frac{X_{l_d^{out}}}{\sum_k X_{l_k^{out}}} \quad (5)$$

ただし、 l_s^{in} 、 l_d^{out} はそれぞれネットワーク外からノード s への入力リンク、ノード d からネットワーク外への出力リンクである。次に式 (2) を満たしつつ、式 (5) で求めたトラフィックマ

トリックスの推定値 T^{grav} との差が最も小さくなるようにトラヒックマトリクスを推定する。すなわち、以下の式を最小化する \hat{T} をトラヒックマトリクスの推定値とする。

$$\begin{aligned} \min \|\hat{T} - T^{grav}\| \\ \text{s.t. } A\hat{T} = X \end{aligned} \tag{6}$$

リンク使用率がすべて収集可能な場合には、トラヒックマトリクス推定手法により正確にトラヒックマトリクスを推定することが可能である。しかしながら、多量の仮想ネットワークを管理・制御する場合には、全仮想ネットワークの全リンクのリンク使用率の把握に大量の情報収集が必要となる。文献 [9] では、ネットワーク内の一部のトラヒック量のみが収集された場合に、収集されなかったトラヒック量と同じ地点の過去のトラヒック量や相関関係のある異なる地点のトラヒック量から推定する手法が提案されている。しかしながら、この手法で用いられる観測結果同士の相関関係も、過去の観測結果から導かれたものであるため、過去の傾向と異なるトラヒック変動が発生した場合は、収集されなかった地点のトラヒック量を正確に推定することができない。

過去の傾向と異なるトラヒック変動にも追従して各時刻のトラヒック量を把握するためには、過去の観測結果に依存せず、各時刻で収集されたトラヒック量のみを用いて、収集されなかった地点のトラヒック量を推定する必要がある。しかしながら、各時刻に収集可能な一部のリンクのリンク使用率のみからトラヒックマトリクスを推定した場合の推定精度や、リンク使用率を収集するリンクの選び方が、トラヒックマトリクス推定に与える影響については、明らかになっていない。

本報告では、一部のリンクのリンク使用率のみを用いてトラヒックマトリクス推定を行った場合に、推定されたトラヒックマトリクスから求めたリンク使用率の推定精度を明らかにする。そして、ネットワーク内の全リンクのリンク使用率を正確に推定することができる観測対象リンクの選択手法を提案する。

3 収集情報量削減のための観測リンク選択手法

3.1 観測リンク選択による収集情報削減

トラヒックエンジニアリングを行うためには、現在のネットワーク内の全リンクのトラヒック量を把握する必要がある。しかしながら、多数の仮想ネットワークの制御が必要な場合には、頻繁に全仮想ネットワークの全リンクのトラヒック量を収集することは難しい。そこで本報告では、選択された一部のリンクのトラヒック量を収集し、収集された情報から全リンクのリンク使用率を推定することにより、全リンクのリンク使用率を観測・収集することなく、トラヒックエンジニアリングに必要な全リンクのリンク使用率を得る手法を提案する。

提案手法は以下の手順により動作する。

1. 観測リンクを選択し、選択されたリンクのリンク使用率を収集する
2. 収集されたリンク使用率からトラヒックマトリクスを推定する
3. 推定されたトラヒックマトリクスを用いてリンク使用率を推定する

以降、各手順の詳細について述べる。

3.1.1 観測リンクの選択

選択された観測リンクのリンク使用率のみから、全リンクのリンク使用率を正確に推定できるような観測リンクを選択する。具体的な観測リンクの選択手法については、3.2節で述べる。

3.1.2 トラヒックマトリクスの推定

3.1.1で選択されたリンクのリンク使用率を観測・収集し、収集されたトラヒック量のみを用いてトラヒックマトリクスを推定する。ここで、リンクのトラヒック量を表す行列 X のうち収集した一部のトラヒック量に対応する要素のみからなる行列を X' とする。 X' は以下の x'_l を要素とする行列である。

$$x'_l = \begin{cases} x_l & (l \text{ が観測リンクの場合}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases} \quad (7)$$

ただし、 x_l はリンク l を流れるトラフィック量である。また、元のルーティング行列 A から観測対象外のリンクに関する情報を除去した以下のルーティング行列 A' を構築する。

$$A' = \begin{bmatrix} A'_{1,1,1} & A'_{1,2,1} & \cdots & A'_{N,N,1} \\ A'_{1,1,2} & A'_{1,2,2} & \cdots & A'_{N,N,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A'_{1,1,L} & A'_{1,2,L} & \cdots & A'_{N,N,L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ただし、 $A'_{i,j,l}$ は以下で定義される。

$$A'_{i,j,l} = \begin{cases} A_{i,j,l} & (l \text{ が観測リンクの場合}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases} \quad (9)$$

$A_{i,j,l}$ はルーティング行列 A の要素のうちノード i から制御ネットワーク内に流入しノード j から外に流出する対地間トラフィックがリンク l を通過する割合に対応する要素である。式 (2) と同様、 X' と A' の間に以下の関係が成り立つ。

$$X' = A'T \quad (10)$$

式 (2) の代わりに、式 (10) を用いることで、選択されたリンクから収集したトラフィック情報のみから、トラフィックマトリクスを推定することが可能となる。

3.1.3 リンク使用率の推定

式 (10) を用いて推定されたトラフィックマトリクス \hat{T} を式 (2) に代入し、以下のように、全リンクのリンク使用率を表わす行列 \hat{X} を推定する。

$$\hat{X} = A\hat{T} \quad (11)$$

この手順により、選択された少数の観測リンクのリンク使用率からネットワーク内の全リンクのリンク使用率を推定することが可能となる。

3.2 観測リンクの選択手法

3.1 節で提案した手法のリンク使用率の推定精度は、観測するリンクの数と観測リンクの選択方法に依存すると考えられる。そこで、本報告では、以下の 3 種類の観測リンクの選択手法を提案し、比較することにより、最も正確にリンク使用率を推定することができる観測リンクの選択手法を明らかにする。観測リンクの選択手法の比較については、4 章で述べる。

少量トラヒック優先選択手法 本選択手法では、トラヒック量が少ないリンクを観測リンクとして選択する。各リンクを経由する対地間トラヒックは、各リンクのトラヒック量よりも小さい。そのため、トラヒック量が少ないリンクのリンク使用率を観測・収集することにより、観測リンクを経由している対地間トラヒック量の推定値の上限を抑えることができ、トラヒックマトリクス of 推定誤差の削減が期待できる。この選択手法では、リンクのトラヒック量を基準に、観測リンクの選択を行うため、あらかじめ、全リンクのトラヒック量を収集しておく必要がある。しかしながら、一度、観測リンクを選択した後は、観測リンク以外のリンクの情報収集頻度を下げることにより、各時刻にリンク使用率の観測・収集がリンクの本数を削減することが可能である。

多量トラヒック優先選択手法 本手法では、トラヒック量が多いリンクを観測リンクとする。トラヒック量が多いリンクを観測リンクとしてすることにより、ネットワーク内の全トラヒックのうち、観測リンクを経由するトラヒックの割合が高くなるように、観測リンクを選択することができる。そのため、少ない数の観測リンクで、広範囲の対地間トラヒックの推定精度の向上が期待でき、リンク使用率の推定誤差の削減も期待できる。

本手法も、多量トラヒック優先選択手法と同様、観測リンクを選択する際に、あらかじめ、全リンクのトラヒック量を収集しておく必要があるが、観測リンクを選択した後は、観測リンク以外のリンクに対する情報収集頻度を下げることにより、各時刻にリンク使用率の観測・収集が必要なリンクの本数を削減することが可能である。

少数フロー優先選択手法 本手法では、対地間トラヒックの本数をフロー数と定義し、経由している対地間トラヒックの本数が少ないリンクを観測リンクとする。3.1で提案したリンク使用率推定手法では、観測しなかったリンクのリンク使用率は、同一対地間トラヒックが経由している他のリンクの観測結果から推定される。そのため、フロー数が多いリンクのリンク使用率の推定は、多くの他のリンクの観測結果を推定に用いることができ、容易なのに対して、フロー数が少ないリンクのリンク使用率の推定は、推定時に用いることができる他のリンクの観測結果が少なく、推定が難しいと考えられる。そのため、推定が難しい、経由フロー数が少ないリンクを観測リンクとすることにより、リンク使用率の推定誤差を抑えることができると考えられる。

また、本手法は、多量トラヒック優先選択手法や少量トラヒック優先選択手法と違い、観測リンク以外のトラヒックの観測を行う必要はなく、経路情報をもとに経由しているフロー数を計算し、観測リンクを選択することが可能である。

4 観測リンク選択手法の評価

本章では、3.2で提案した観測リンク選択手法をシミュレーションにより評価・比較することにより、正確なリンク使用率の推定が可能となる観測リンク選択手法を明らかにする。

4.1 評価方法

4.1.1 評価環境

本評価では、文献 [15, 16] に従い、トラヒックマトリクス各要素の分布は対数正規分布に従い、かつ Gravity モデルに従うというモデルを用いてトラヒックマトリクスを生成する。このモデルを用い、以下のように、トラヒックマトリクスを生成する。

$$T = T^{grav} + \Delta \quad (12)$$

ただし、 T^{grav} は要素の分布が対数正規分布に従いつつ、Gravity モデルに合致するトラヒックマトリクス、 Δ はモデルの誤差分を表わす行列である。 T^{grav} が Gravity モデルに従うように、 T^{grav} の各要素は各ノードに割り当てた重みの積として生成する。各ノードの重みは T^{grav} の要素の分布が文献 [16] の Abilene ネットワークでの観測結果に合致するように平均 $e^{4.8}$ ・分散 $e^{9.7}$ の対数正規分布に従った乱数として与えた。

Δ の値は平均 0、分散 1 の正規乱数を用いて与える。また、本評価では、トラヒックマトリクスの推定は Tomogravity 手法を用いる。観測リンクの選択手法としては、3.2で提案した3つの手法に加え、比較のため、ランダムに観測リンクを選択した場合についても評価を行う。

4.1.2 評価指標

本評価では、推定されたトラヒックマトリクスやリンク使用率の平方平均二乗相対誤差 (RMSRE) を評価指標として用いて観測リンクの選択手法の比較を行うことにより、最も正確にリンク使用率を推定することができる観測リンク選択手法を明らかにする。リンク使用率の RMSRE を X_{RMSRE} 、トラヒックマトリクスの RMSRE を T_{RMSRE} とおくと、それぞれ以下で定義される。

$$X_{RMSRE} = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \left(\frac{\hat{X}_k - X_k}{X_k} \right)^2} \quad (13)$$

$$T_{RMSRE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{\hat{T}_{i,j} - T_{i,j}}{T_{i,j}} \right)^2} \quad (14)$$

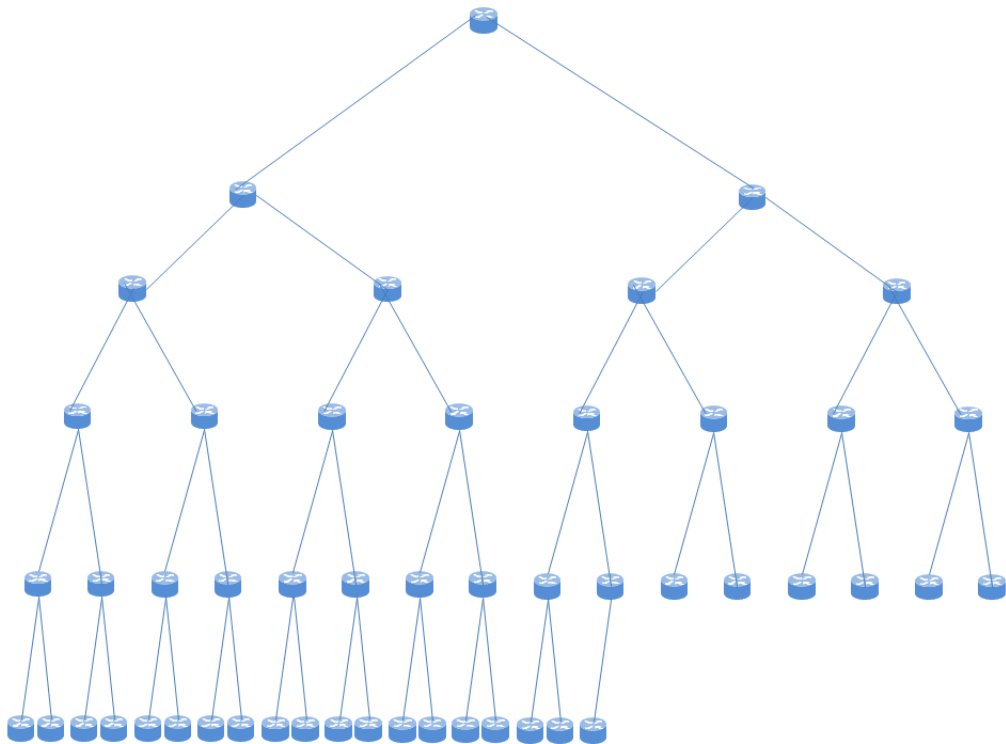


図 2: ツリー状トポロジ

ただし、 L 、 N は、それぞれ、ネットワーク内のリンク数とノード数であり、 \hat{X}_k は推定により求められたリンク k のトラヒック量、 X_k は実際のリンク k のトラヒック量、 $\hat{T}_{i,j}$ はノード i から流入しノード j から流出する推定により求められた対地間トラヒック、 $T_{i,j}$ は i ノードから流入し j ノードから流出する実際の対地間トラヒックをあらわす。

4.2 ツリー状トポロジにおける評価

まず、図 2 に示す 50 ノード 98 リンクの 2 分木のツリー状トポロジを用いて評価を行った。ツリー状トポロジの評価では、エッジネットワークを想定しトラヒックの流入、流出はユーザとの接続点に相当する葉に位置するノードとコアネットワークとの接続に相当する根に位置するノードからのみとし、トラヒックが流入・流出する箇所に位置するリンクは常に観測を行うものとする。

図 3(a)、3(b) では縦軸はそれぞれトラヒックマトリクスおよびリンクのトラヒック量の RMSRE、横軸は観測したリンク数を示す。図中において、“min”は少量トラヒック優先選

択手法、“max”は多量トラヒック優先選択手法、“flow”は少数フロー優先選択手法のそれぞれの手法を用いた場合、“random”、ランダムに観測リンクを選択した場合の結果を示している。本評価では、異なるトラヒックマトリクスを用いた50回の試行を行った。図3(a)、図3(b)に示されているRMSREは、50回の試行の平均値を示している。

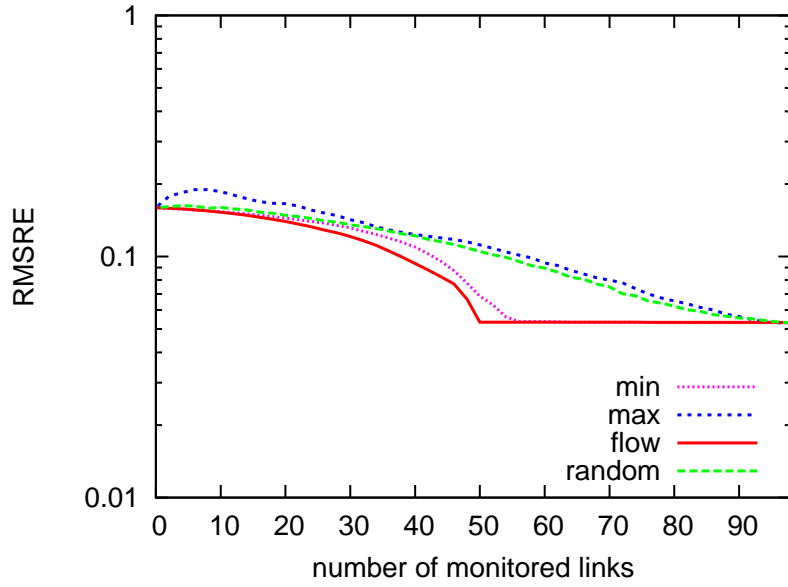
図3(a)より、少量トラヒック優先選択手法、少数フロー優先選択手法で観測リンクの選択を行うことにより、少ない観測リンクで、トラヒックマトリクスのRMSREを低下させることができることが分かる。これは、これらの手法では、トラヒック量が小さいリンクが観測リンクとして選択され、トラヒック量が小さいリンクを観測することにより、観測リンクを経由している対地間トラヒック量の推定値の上限を抑えることができ、推定精度が向上できるためであると考えられる。また、図3(a)より、少量トラヒック優先選択手法、少数フロー優先選択手法では、観測リンクが50本を超えると、観測リンクを追加しても、トラヒックマトリクスのRMSREを削減することができないことが分かる。これは、ツリー状トポロジでは、下流のリンクを経由する対地間トラヒックのほとんどは上流のリンクを経由するため、下流のリンクのリンク使用率から上流のリンクのリンク使用率の推定は容易であるためである。少量トラヒック優先選択手法、少数フロー優先選択手法では、葉に位置するリンクから観測リンクとして選択される。そして、すべての葉のリンクが観測リンクとして選択された後には、新たな観測リンクを追加しても、葉以外の上流に位置するリンクのリンク使用率は、葉のリンクのリンク使用率から推定可能であるため、トラヒックマトリクスの推定をする際に用いることができる、新たな情報を追加することができない。

図3(b)より、リンク使用率のRMSREはツリー状トポロジでは観測リンクが少ない時は多量トラヒック優先選択手法で観測リンクを選択した場合に小さくなり、観測リンクが多い時は少量トラヒック優先選択手法で観測リンクを選択した場合に小さくなることが分かる。

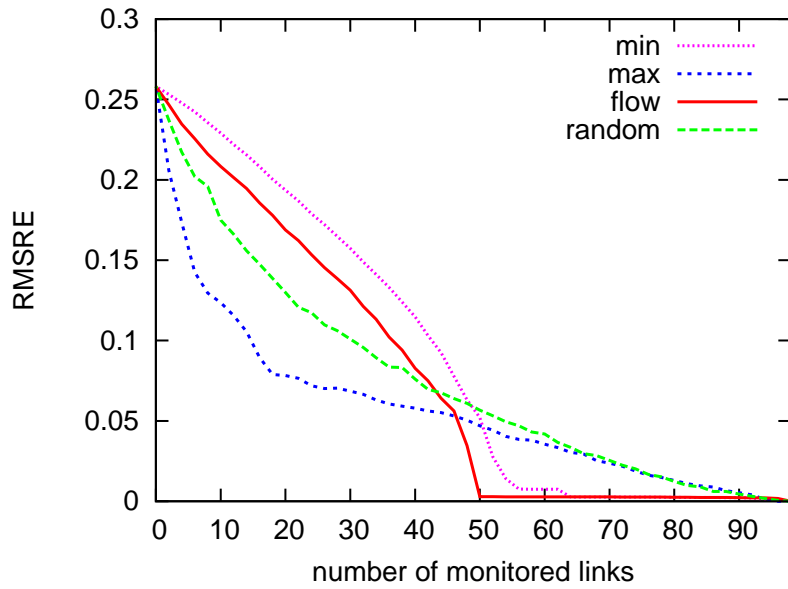
この原因は次のように考えられる。多量トラヒック優先選択手法では、フロー数が多くトラヒック量の多い、根に近いリンクから観測リンクに選択される。そのため、観測リンク数が少ない場合であっても、図4(a)のように、広範囲の対地間トラヒックが観測リンクを経由する。それに対して、少量トラヒック優先選択手法や少数フロー優先選択手法では、フロー数が少なく、トラヒック量が少ない、葉に位置するリンクから選択されるため、図4(b)のように、地理的に偏った一部の対地間トラヒックのみが観測リンクを経由するため、観測リンクを経由していない対地間トラヒックの推定誤差は大きくなり、推定誤差が大きい対地間トラヒックのみが経由しているリンクのリンク使用率の推定誤差も大きくなる。観測リンクが多くなり、少量トラヒック優先選択手法や少数フロー優先選択手法で図5(a)のように葉に位置するリンクがすべて観測箇所として選択されると、リンク使用率の推定精度は著しく小さくなる。これは、上流のリンクは、葉のリンクのトラヒック量から容易に推定可能であるためである。それに対して、図5(b)のように多量トラヒック優先選択手法で同数の

リンクを観測リンクとして選択した場合は、上流のリンクを流れるトラフィック量から、下流のリンクのトラフィック量を正確に推定することは困難であるため、リンク使用率の観測・収集を行わなかった下流のリンクのリンク使用率に推定誤差が残ってしまう。

このように、ツリー状のトポロジでは、観測リンクが著しく少ない場合であっても、広い範囲の対地間トラフィックに関する情報持つリンクを選択する多量トラフィック優先選択手法で観測リンクを選択することにより、リンク使用率の推定誤差が大きくなることを防ぐことができる。また、観測リンク数が葉の数を超えると、少量トラフィック優先選択手法、少数フロー優先選択手法で、推定が難しい葉に位置するリンクを観測リンクとして選択することにより、より正確にリンク使用率を推定することができる。

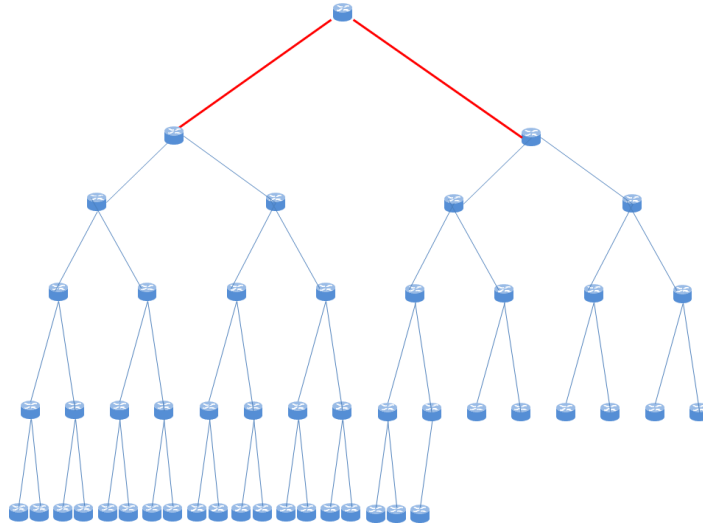


(a) トラフィックマトリクス の RMSRE

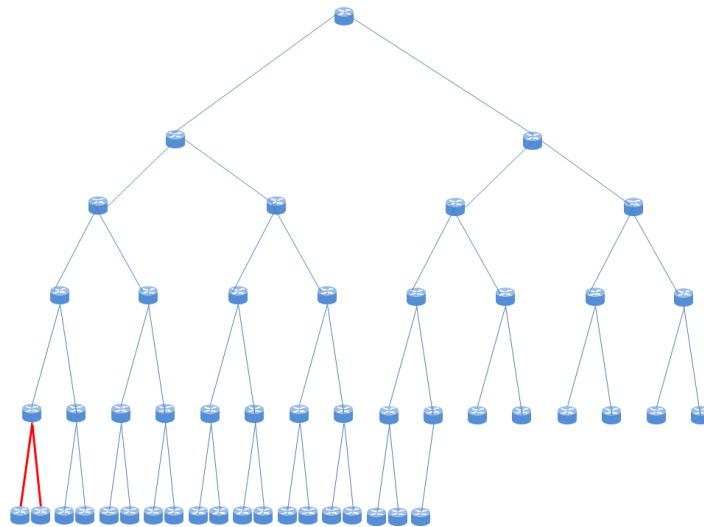


(b) リンク使用率 の RMSRE

図 3: ツリー状トポロジにおける評価結果

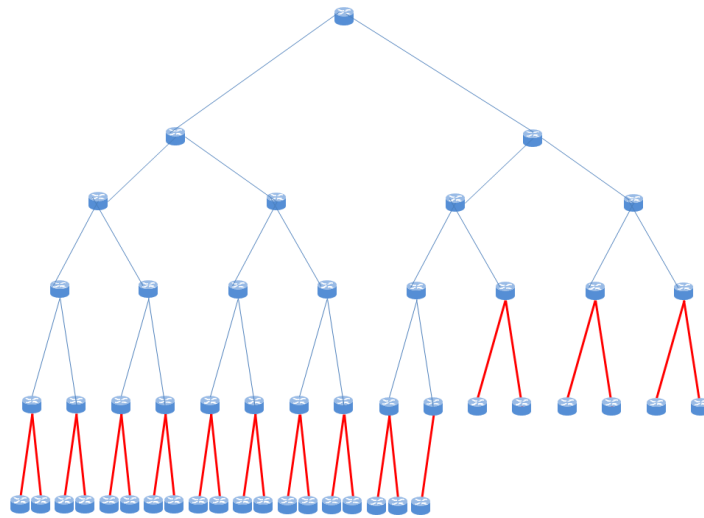


(a) 多量トラフィック優先選択手法において観測されるリンク。選択箇所は赤いリンクである。広い範囲を流れる対地間トラフィックに関する情報を得ることができる。

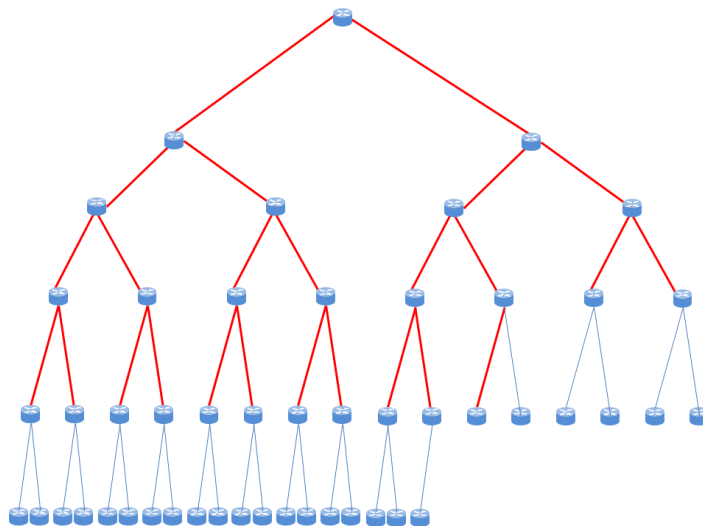


(b) 少量トラフィック優先選択手法、少数フロー優先選択手法において観測されるリンク。選択箇所は赤いリンクである。観測箇所がネットワークの一部に限られるため、その他の箇所のトラフィック量を正確に把握することができない。

図 4: ツリー上トポロジで選択本数が少ない場合における観測リンク



(a) 少量トラフィック優先選択手法、少数フロー優先選択手法において観測されるリンク。選択箇所は赤いリンクである。上流のリンクのトラフィック量は、下流のリンクのトラフィック量から推定することは容易であるため、リンク使用率の推定精度が高くなる。



(b) 多量トラフィック優先選択手法において観測されるリンク。選択箇所は赤いリンクである。上流部分のリンクから選択が行われると下流部分しか流れないような対地間トラフィックを把握できないため、葉に近いリンクのリンク使用率を正確に把握できない。

図 5: ツリー上トポロジで選択本数が多い場合における観測リンク

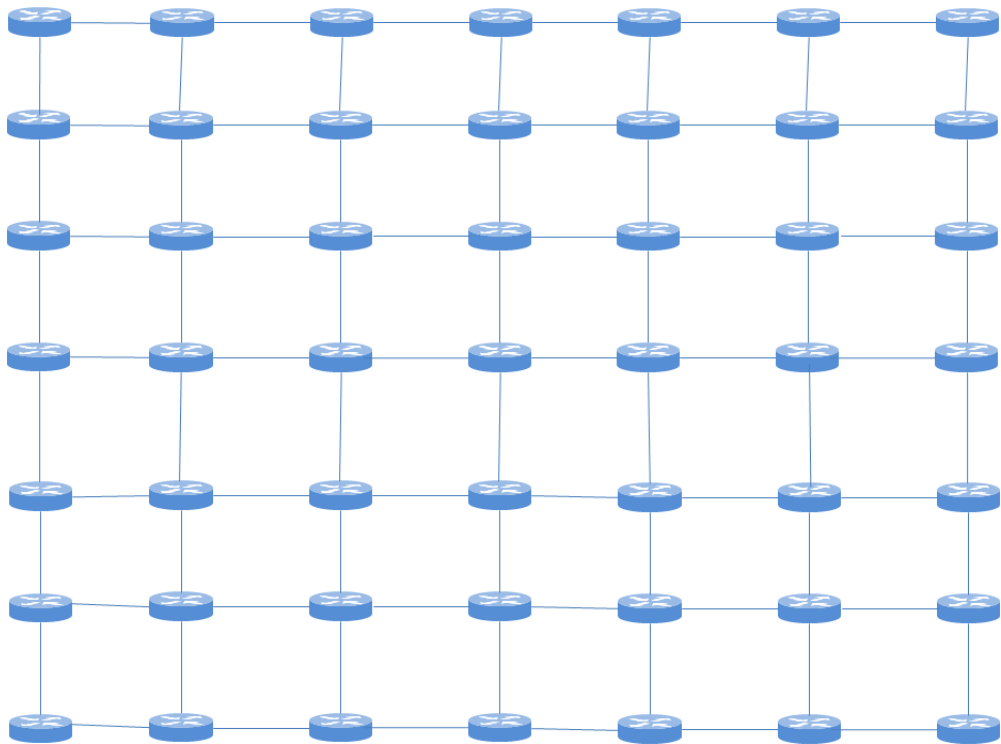


図 6: 格子状トポロジ

4.3 格子状トポロジにおける評価

図 6 に示す 49 ノード 168 リンクの 7×7 の格子状トポロジにおいてシミュレーションを行った。全ノードからトラヒックの流入、流出があるものとし、各ノードに外部から流入流出するトラヒック量は常に観測するものとする。図 7(a)、7(b) では縦軸はそれぞれトラヒックマトリクスおよびリンクのトラヒック量の RMSRE、横軸は観測したリンク数を示す。また、“min”は少量トラヒック優先選択手法、“max”は多量トラヒック優先選択手法、“flow”は少数フロー優先選択手法のそれぞれの手法によって選択を行った場合、“random”はランダムに観測リンクを選択した場合の結果を示す。本評価では、異なるトラヒックマトリクスを用い、50 回の試行を行った。図 7(a)、図 7(b) で示されている RMSRE は、50 回の試行の平均値を示している。

図 7(a) より、トラヒックマトリクスの RMSRE は、ツリー状トポロジの結果と異なり、観測リンク数を増やしても、さほど改善しないことが分かる。これは、本評価において、常に観測可能であるとしている、各ノードの流入・流出トラヒック量に該当するリンクの本数が、ツリー状トポロジと比べて著しく多く、流入・流出トラヒック量のみからでも、高い精

度でトラヒックマトリクス of 推定を行うことができているためである。

しかしながら、図 7(b) に示されるように、リンク使用率の RMSRE は、観測リンクが追加されるにつれ、削減される。これは、流入・流出リンクのトラヒック量のみでは、他のリンクを流れるトラヒック量に完全に合致した推定を行うことができているためであり、観測リンクを追加することにより、トラヒックマトリクス of 推定精度は向上できなくても、ネットワーク内のリンクを流れるトラヒック量に合致した推定結果を得ることができるようになるためである。

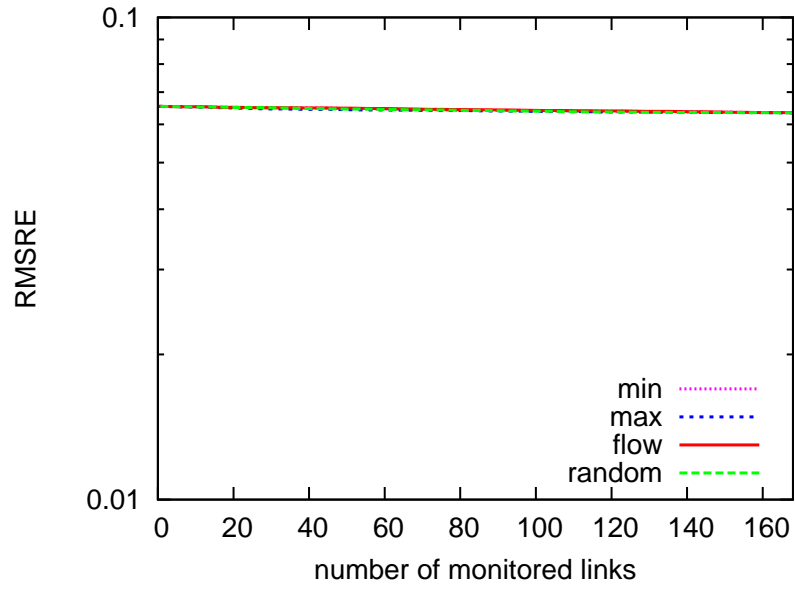
また、図 7(b) の結果より、少量トラヒック優先選択手法や少数フロー優先選択手法で観測リンクを選択した場合に、リンク使用率の RMSRE を最も小さくすることができることが分かる。この原因は次のように考えられる。格子状トポロジで、少量トラヒック優先選択手法や少数フロー優先選択手法で観測リンクを選択した場合、図 8(a) のように、観測対象から除外されるリンクは、トポロジの中心部で、フロー数が多く、トラヒック量が多い箇所である。このようなトポロジの中心部に位置するリンクを経由する対地間トラヒックの多くは、周辺のリンクを経由する対地間トラヒックと共通である。そのため、周辺のリンクが観測リンクとして選択されていれば、周辺の観測リンクのリンク使用率に合致するようにトラヒックマトリクスを推定することにより、観測対象外のリンクのリンク使用率の誤差も削減することができる。

それに対して、多量トラヒック優先選択手法で観測リンクを選択した場合は、図 8(b) のように、フロー数が少なくトラヒック量が少ない、トポロジ周縁部のリンクが観測の対象外となる。トポロジ周縁部のリンクは、経由する対地間トラヒック数が少ないため、リンクの両端のノードが送信元・宛先となるトラヒックが、リンク上のトラヒック量に占める割合が大きい。このような 1 ホップの対地間トラヒックは、周辺のリンクの観測結果から推定することはできない。さらに、図 8(b) で示すように、多量トラヒック優先選択手法により、観測リンクが選択された場合は、観測対象外のリンクの周辺で観測リンクとして選択されるリンクも少なくなる。その結果、リンク使用率を正確に推定することが難しく、ランダムに観測リンクを選択した場合よりもさらに、RMSRE が大きくなる。

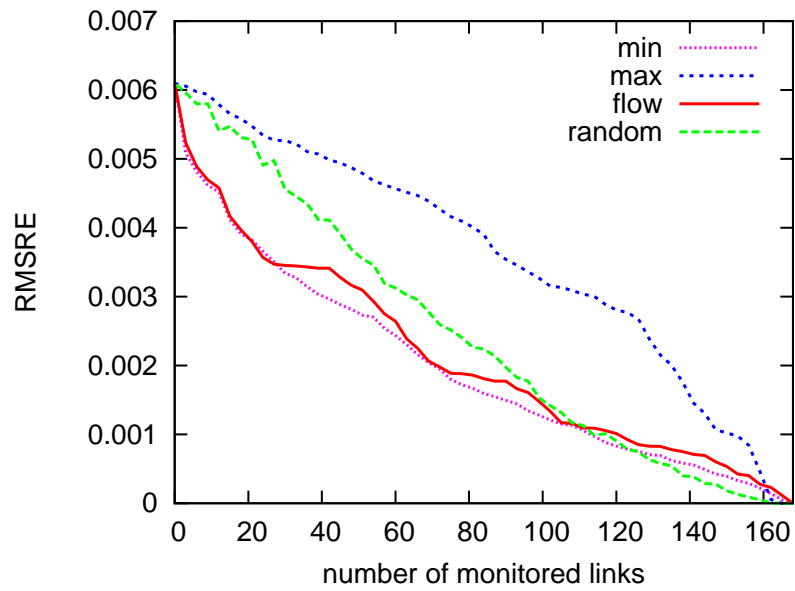
図 7(b) において、少量トラヒック優先選択手法と少数フロー優先選択手法のリンク使用率の RMSRE を比較すると、少量トラヒック優先選択手法が RMSRE をより小さくすることができることが分かる。これは、今回のシミュレーションでは、フロー数が等しいリンクは、リンク ID が小さいリンクから選択されるように少数フロー選択手法の実装を行ったためであり、少量トラヒック優先選択手法で選択された場合と比べて、観測対象として選択される箇所が、地理的に近いリンクに集中するためと考えられる。

このように、格子状トポロジでは、周囲のリンクから推定を行うことが難しい、周縁部のリンクを観測リンクとして選択することにより、リンク使用率の推定誤差を抑えることがで

き、少量トラヒック優先選択手法や少数フロー優先選択手法で選択することにより、RMSREを最も小さくすることができる。

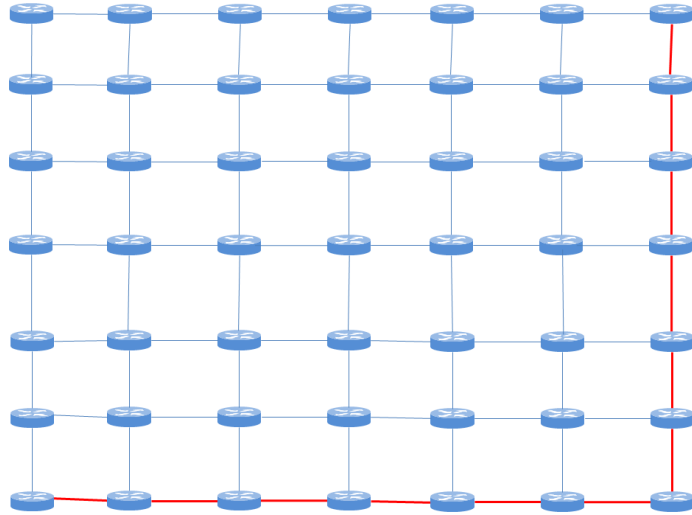


(a) トラフィックマトリクス of RMSRE

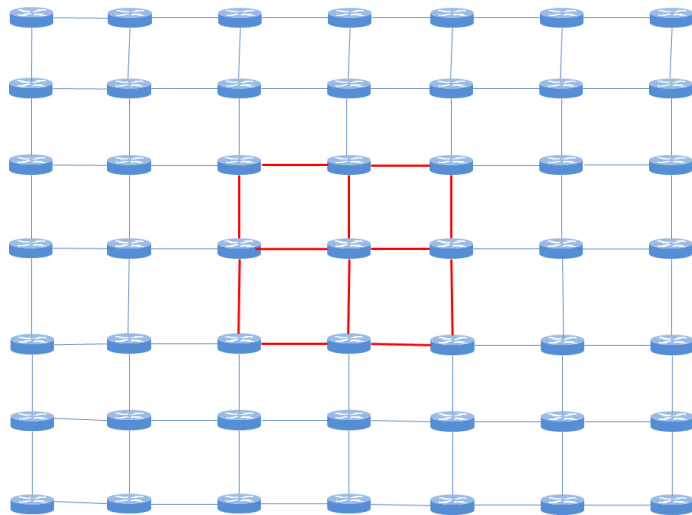


(b) リンク使用率 of RMSRE

図 7: 格子状トポロジにおける評価結果



(a) 少量トラフィック優先選択手法、少数フロー優先選択手法において観測される箇所。赤いリンクが観測箇所として選択されている。情報を推定することが困難な周縁部分から優先的に選択される。



(b) 多量トラフィック優先選択手法において選択される箇所。赤いリンクが観測箇所として選択されている。周縁部のリンクの周囲には、観測リンクとして選択されたリンクは少ない。

図 8: 格子状トポロジで選択される観測リンク

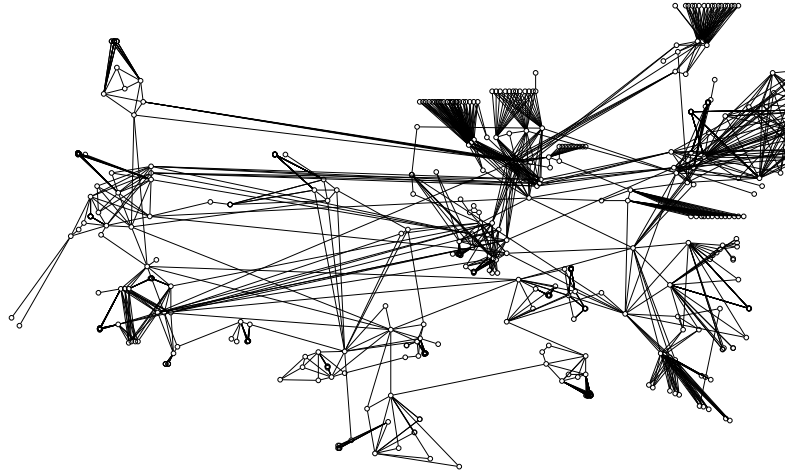


図 9: AT&T トポロジ

4.4 AT&T トポロジにおける評価

図 9 に示される米国の通信会社 AT&T 社のネットワークを計測することにより得られた 523 ノード 1304 リンクのトポロジ [17] を用いて観測リンク選択手法の評価を行った。本シミュレーションでは全ノードからトラヒックの流入、流出があるものとし、トラヒックの流入・流出に関するリンクは常に観測するものとする。

図 10(a)、10(b) の縦軸はそれぞれトラヒックマトリクスおよびリンクのトラヒック量の RMSRE、横軸は選択したリンク数である。また、“ max ”は多量トラヒック優先選択手法、“ min ”は少量トラヒック優先選択手法、“ flow ”は少数フロー優先選択手法のそれぞれの選択手法を行った場合であり、“ random ”はランダムに観測リンクを選択した場合である。

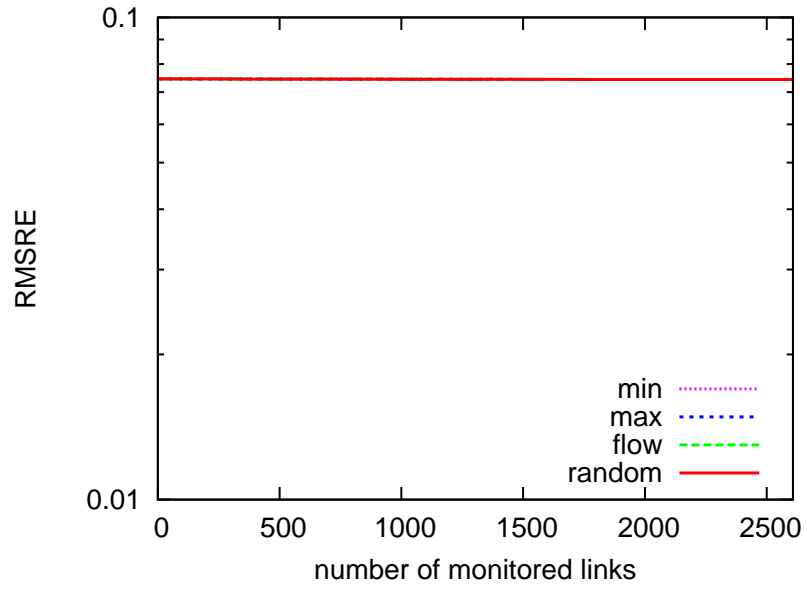
図 10(a) より、格子状トポロジと同様、トラヒックマトリクスの RMSRE は、観測リンク数を増やしても、さほど向上しない。この原因も、格子状トポロジと同様、トラヒックが流入・流出する地点のリンクのみからでも精度よくトラヒックマトリクスを推定することができるため、他のリンクの情報を追加することによるトラヒックマトリクス推定精度の向上が著しく小さくなるためである。

図 10(b) より、格子状トポロジの結果と同様、少量トラヒック優先選択手法や少数フロー優先選択手法で選択された観測リンクの情報を追加することにより、少数のリンクの観測でリンク使用率の RMSRE を著しく削減できる。これは、AT&T トポロジにおいても、格子

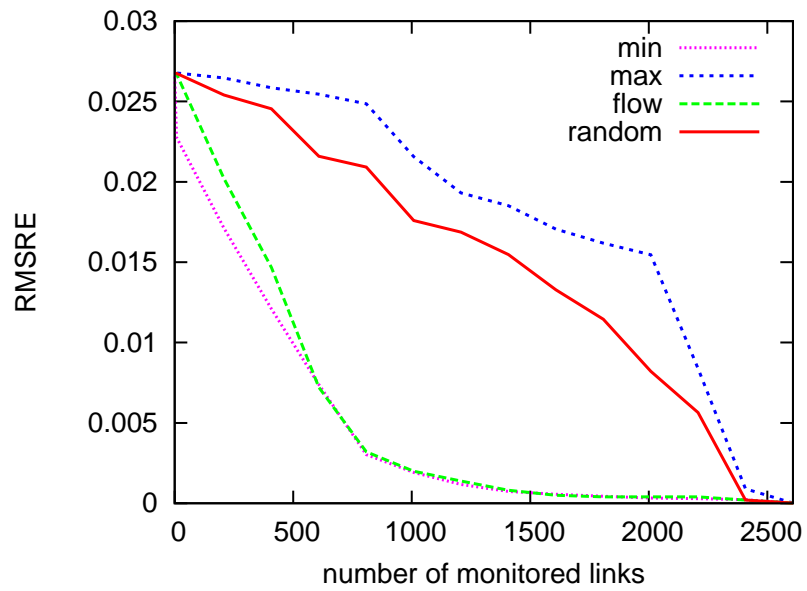
状トポロジと同様、フロー数が少なくトラヒック量が少ないリンクのリンク使用率の推定は、推定時に用いることができる他のリンクの観測結果が少なく、難しいためである。

また、図 10(b) より、AT&T トポロジでは、格子状トポロジの結果と比べ、少量トラヒック優先選択手法、少数フロー優先選択手法で観測リンクを選択した場合のリンク使用率の RMSRE とランダムに観測リンクを選択した場合の RMSRE の差が、大きくなっていることが分かる。これは、AT&T トポロジでは、格子状トポロジに比べ、ノード次数の分散が大きいためであると考えられる。ノード次数が大きいノードに接続しているリンクのリンク使用率は、多くのリンクの情報を推定に用いることができるため、精度よく推定を行うことができる。そのため、ノード次数が大きいノードが存在する AT&T トポロジでは、ノード次数の大きなノードに接続しているリンクを観測リンクから除外しても、そのリンク使用率を格子状トポロジの場合よりも正確に推定することができ、RMSRE をより小さく抑えることができる。

このように、ISP のルータレベルトポロジにおいても、少量トラヒック優先選択手法・少数フロー優先選択手法を用いて観測リンクを選択することにより、リンク使用率の推定誤差を抑えつつ、観測リンク数を削減することができる。



(a) トラフィックマトリクス of RMSRE



(b) リンク使用率 of RMSRE

図 10: AT&T トポロジにおける評価結果

4.5 考察

以上の結果より、少量トラフィック優先選択手法や少数フロー優先選択手法を用いることにより、リンク使用率の RMSRE を抑えつつ、観測リンクの本数を削減することができることが分かった。また、少量トラフィック優先選択手法と少数フロー優先選択手法の差は少ないことも分かった。そのため、リンク上を流れているトラフィック量の情報を用いなくても、ルーティング情報のみから適切に観測リンクを選択することが可能であると考えられる。しかしながら、少数フロー優先選択手法で選択した場合、同じフロー数のリンクのうち、どのリンクを選択するかによって、リンク使用率の RMSRE も変わってくると考えられ、フロー数が同じリンク内の選択優先順位については、今後検討を行う必要がある。

また、本評価では、 Δ は分散 1 で与えており、トラフィックマトリクスが Gravity モデルに近い環境での評価となっているが、トラフィックマトリクスと Gravity モデルの差が大きいネットワークも存在することも確認されている [18]。推定に用いるトラフィックモデルと実際のトラフィックマトリクスの誤差が大きい環境における評価は今後の課題であるが、各リンクのリンク使用率の推定に用いることが可能な他のリンクの観測結果の数は、推定に用いるトラフィックモデルの誤差に依存せずに決まるため、トラフィックモデルと実際のトラフィックマトリクスの誤差が大きい環境においても、本報告の結果と同様の結果が得られると予想される。

5 おわりに

本報告では、一部の観測リンクを選択し、選択された観測リンクの情報から、ネットワークの全リンクのリンク使用率を推定することにより、トラフィックエンジニアリングを行うために観測・収集が必要な情報量を削減する手法を提案した。また、リンク使用率の推定精度は、観測リンクの選択方法に依存すると考えられるため、リンク上を経由する対地間トラフィックの本数を基準とした手法、リンク上のトラフィック量が多いリンクを選択する手法、トラフィック量が少ないリンクを選択する手法の3種類の観測リンク選択手法を提案し、比較評価を行うことにより、観測対象外のリンクのリンク使用率を最も正確に推定することができる観測リンク選択手法を明らかにした。評価結果より、経由するフロー数が少ないリンクを観測リンクに選択する手法が最も正確にリンク使用率を推定することができ、AT&T トポロジでは、4割のリンクを観測することで、RMSREを流入・流出リンクのみを用いた場合の1/10にすることができることが明らかになった。

今後は、フロー数が同一のリンク間の観測リンク選択の優先順位の検討するとともに、より大規模なネットワークでの適用性の評価や推定されたリンク使用率を用いてトラフィックエンジニアリングを行った場合の評価を行う予定である。

謝辞

本報告を終えるにあたりまして、日頃より熱心にご指導してくださいました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授、ならびに荒川伸一助教、大阪大学大学院経済学研究科の
大下裕一助教に厚く御礼を申し上げます。また、大阪大学大学院情報科学研究科の若宮直紀
准教授には適切な助言を頂き、指導して頂きました。心より御礼申し上げます。さらに日頃
から様々な相談に応じて頂きました筒井宣充氏、平山孝弘氏をはじめとする村田研究室の皆
様方に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] N. Feamster, L. Gao, and J. Rexford, “CABO: Concurrent architectures are better than one.” <http://www.netsfind.net/Funded/Cabo.php>.
- [2] “PlanetLab.” <http://www.planet-lab.org/>.
- [3] T. Miyamura, Y. Ohsita, E. Oki, S. Arakawa, Y. Koizumi, A. Masuda, K. Shiimoto, and M. Murata, “Network virtualization server for adaptive network control,” in *Proceedings of 20th ITC Specialist Seminar on Network Virtualization - Concept and Performance Aspects*, May 2009.
- [4] B. Fortz and M. Thorup, “Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, vol. 2, pp. 519–528, Mar. 2000.
- [5] M. Roughan, M. Thorup, and Y. Zhang, “Traffic engineering with estimated traffic matrices,” in *Proceedings of the 3rd ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement*, pp. 248–258, Nov. 2003.
- [6] Y. Ohsita, T. Miyamura, S. Arakawa, S. Ata, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, “Gradually reconfiguring virtual network topologies based on estimated traffic matrices,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pp. 2511–2515, May 2007.
- [7] Y. Ohsita, T. Miyamura, S. Awakawa, E. Oki, K. Shiimoto, and M. Murata, “Estimation of current traffic matrices from long-term traffic variations,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E92-B, pp. 171–183, Jan. 2009.
- [8] I. Juva, “Robust load balancing,” in *Proceedings of GLOBECOM*, pp. 2708–2713, Nov. 2007.
- [9] Y. Zhang, M. Roughan, W. Willinger, and L. Qiu, “Spatio-temporal compressive sensing and internet traffic matrices,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 39, pp. 267–278, Aug. 2009.
- [10] A. Farrel, J. P. Vasseur, and J. Ash, “A path computation element (PCE)-based architecture.” RFC 4655, Aug. 2006.

- [11] Y. Vardi, “Network tomography: Estimating source-destination traffic intensities from link data.,” *Journal of the American Statistical Association*, vol. 91, pp. 365–377, Mar. 1996.
- [12] J. Cao, D. Davis, S. Wiel, and B. Yu, “Time-varying network tomography: Router link data.,” *Journal of the American Statistical Association*, vol. 95, no. 452, 2000.
- [13] I. Juva, S. Vaton, and J. Virtamo, “Quick traffic matrix estimation based on link count covariances,” in *Proceedings of IEEE ICC 2006*, vol. 2, pp. 603–608, June 2006.
- [14] A. Soule, A. Nucci, R. Cruz, E. Leonardi, and N. Taft, “Estimating dynamic traffic matrices by using viable routing changes,” *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 15, pp. 485–498, June 2007.
- [15] Y. Zhang, M. Roughan, N. Duffield, and A. Greenberg, “Fast accurate computation of large-scale IP traffic matrices from link loads,” *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol. 31, pp. 206–217, June 2003.
- [16] A. Nucci, A. Sridharan, and N. Taft, “The problem of synthetically generating IP traffic matrices: Initial recommendations,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 35, pp. 19–32, July 2005.
- [17] “Rocketfuel: An ISP topology mapping engine.” <http://www.cs.washington.edu/research/networking/rocketfuel/>.
- [18] A. Gunnar, M. Johansson, and T. Telkamp, “Traffic matrix estimation on a large IP backbone: A comparison on real data,” in *Proceedings of the 4th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement*, pp. 149–160, Feb. 2004.