

# オーバーレイネットワークにおける計測数削減手法の性能評価

正原 竜太<sup>†</sup> 長谷川 剛<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学基礎工学部 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

<sup>††</sup> 大阪大学 サイバーメディアセンター 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

<sup>†††</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: <sup>†</sup>r-shouhr@ics.es.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, <sup>†††</sup>murata@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし オーバレイネットワークの性能を維持または向上させるためには、定期的にオーバーレイノード間パスを計測し、ネットワーク性能を把握することが重要である。全てのパスを等しい頻度で計測する場合には、オーバーレイノード数の二乗のコストを必要とする。この問題に対し、オーバーレイパスの重複した部分の計測を行わず、重複部分の計測結果を統合することにより、オーバーレイネットワーク全体の性能を推定する、計測結果統合手法が提案されている。しかし、この手法を採用するにあたっては、計測結果の統合によって得られた推定結果と、実際の計測結果との誤差、つまり推定精度が問題となる。そこで本稿では、PlanetLab 上における計測結果を用いた、計測結果統合手法の精度評価を行う。また、推定精度を向上させるための、計測結果の統計処理手法を提案する。性能評価の結果、提案手法を用いることで、計測データをほとんど破棄することなく、遅延時間の推定誤差が 88% から 2% に改善することを示す。  
キーワード オーバレイネットワーク、ネットワーク計測、計測結果統合手法、精度評価

## Performance evaluation of spatial composition method of measurement results in overlay networks

Ryuta SHOHARA<sup>†</sup>, Go HASEGAWA<sup>††</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Engineering Science, Osaka University 1-32, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-8531 Japan

<sup>††</sup> Cybermedia Center, Osaka University 1-32, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan

<sup>†††</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5, Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: <sup>†</sup>r-shouhr@ics.es.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, <sup>†††</sup>murata@ist.osaka-u.ac.jp

**Abstract** An overlay network is an application-layer network logically constructed on IP network. It is important for overlay networks to regularly measure the path performance to maintain and improve its service quality. One of the most accurate measurement method is full-mesh measurement, but when the number of overlay node is  $n$ , the method needs  $O(n^2)$  cost to measure all paths. So, the spatial composition method of measurement results has been proposed, which do not measure the overlapping part of the overlay path and estimate the path performance from measurement results of partial paths. However, we should discuss the estimation error between the estimated results and actually-measured results. Therefore, in this report, we evaluate the estimation accuracy of the spatial composition method using actual measurement results on PlanetLab environment. We also propose the statistical method to enhance the estimation accuracy. We present numerical evaluation results and confirm that the proposed method can decrease the estimation error from 88% to 2%, while keeping the measurement efficiency.

**Key words** Overlay networks, network measurement, spatial composition, accuracy evaluation

### 1. はじめに

近年、コンピュータやインターネットの普及によって、様々

なネットワークアプリケーションが登場している。これらのアプリケーションはそれぞれが独自の性質を持つため、それらの特性に適応させたネットワーク形態が必要とされる。このよう

なアプリケーションネットワークの例として、Skype [1] などに用いられている P2P ネットワーク、グリッドネットワーク、及び IP-VPN などが挙げられる。しかし、それらのアプリケーション毎に IP ネットワークを変更するのは難しく、かつ非効率である。そこで近年注目されているのが、IP ネットワークを変更することなく、アプリケーションごとに適切なネットワークを構築することができるオーバレイネットワーク技術である。

オーバレイネットワークは、図 1 に示すように、IP ネットワーク上に独自に構築された論理的なネットワークである。そのため、一般的に下位層となる IP ネットワークがどのような性能を持っているかは未知である。そのため、オーバレイネットワークの性能を向上させるためには、アンダーレイネットワークの性質（遅延時間、パケット廃棄率、利用可能帯域など）を常に正確に把握することが重要である。

これまで、オーバレイネットワークの性能に関する情報を得るための様々な手法が提案されてきた。例えば、Resilient Overlay Networks (RON) [2] においては、参加している全てのオーバレイノードが他ノードへのパスの性能を計測し、全ノード間で計測結果を交換する、フルメッシュ計測を行っている。しかし、この手法は、オーバレイネットワークが  $n$  台のオーバレイノードで構成されると仮定したとき、 $O(n^2)$  の計測コストが必要となるため、参加可能なオーバレイノード数は高々 50 程度であると指摘されている [3]。また、NICE [4] や HMTF [5] などは、全てのオーバレイノード間のパスの性能を把握する、という完全性を犠牲にすることにより、 $O(n)$  まで計測コストを削減することに成功しているが、完全性が失われているため、効率的なオーバレイネットワークを構築するために適してるとは言えない。

この問題に対して本稿では、オーバレイネットワークの全てのパスの計測結果を得ることを維持しつつ、計測コストを削減する計測結果統合手法 [6], [7] に注目した。この手法は、オーバレイパスの重複した部分の計測を行わず、重複部分の計測結果を統合してパスの性能を推定する手法である。一般的に、ネットワーク内に存在するオーバレイノード数が多い場合、オーバレイパスの経路上に他のオーバレイノードが存在することが多くなるため、オーバレイパスの経路重複が発生しやすく、計測コストの削減効果が大きくなる。計測コストの削減量は [6] において評価されており、計測パス数が最大で約 1/30 に削減されることが明らかになっている。

しかし、計測結果統合手法は全てのオーバレイパスを計測しないため、本手法が提供する計測結果には誤差が含まれる場合がある。計測結果統合手法においては、あるオーバレイノード間の経路上に他のオーバレイノードが存在する場合には、全体パスをその中間ノードで区切られる 2 つの部分パスに分割し、部分パスの計測を行う。その後、全体パスの性能を、部分パスの計測結果から推定する。このとき、オーバレイネットワーク処理負荷や計測時刻の不整合などにより、実際の計測結果との間に誤差が生じる場合がある。さらに、このような誤差は、遅延時間の計測結果を用いるアプリケーションの性能を低下させる可能性がある。

そこで本稿では、計測結果統合手法により発生するパス性能の推定誤差に着目し、計測結果統合手法の性能評価を行う。具体的には、PlanetLab 上における実際の計測結果を用いて、発生する推定誤差を評価する。また、十分な推定精度を得るため

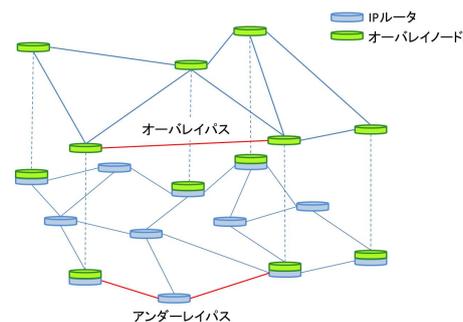


図 1 オーバレイネットワーク

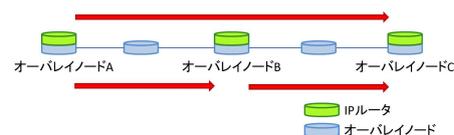


図 2 計測結果統合手法

に必要な計測回数や、計測結果の統計処理手法について議論する。さらに、計測結果を用いたアプリケーションとして、オーバレイネットワークにおける経路選択問題（オーバレイルーティング）を挙げ、推定誤差によって引き起こされる、性能の良いパスを選択できない確率を評価する。これにより、計測結果統合手法の、実ネットワーク環境に対する適用性を明らかにする。

以下、2. 章において、計測結果統合手法におけるオーバレイパスの性能の推定方法についてまとめる。3. 章では推定精度を向上するための、計測結果に対する統計処理手法を提案する。4. 章では 3. 章の提案手法により得られる推定精度、及び計測結果統合手法の有用性について評価する。最後に、5. 章で本編のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 計測結果統合手法

本稿で着目している計測結果統合手法 [6], [7] は、オーバレイネットワーク上の全てのパスの性質を計測せず、オーバレイパス同士の経路の重複関係に着目し、重複している箇所を計測を回避する。さらに、計測を行わないパスの性能は、計測を行ったパスの計測結果を用いて推定することによって得る。図 2 に推定方法の例を示す。図 2 においては、オーバレイノード A, B, C が存在し、パス AC の経路上に B が存在する。計測結果統合手法は、パス AC の性能を計測せず、その計測結果をパス AB とパス BC の計測結果から推定する。これにより、オーバレイネットワーク全体での計測コストを削減することができる。

ここで、パス AC の遅延時間、パケット廃棄率、利用可能帯域を実際に計測して得られる値をそれぞれ  $T_{AC}$ ,  $P_{AC}$ ,  $B_{AC}$  と定義する。遅延時間の推定においては、パス AC の遅延時間はパス AB とパス BC の遅延時間を加算することで推定できると考えられる。したがって、パス AC の遅延時間の推定値 ( $T'_{AC}$ ) は以下の式 (1) のように導出される。

$$T'_{AC} = T_{AB} + T_{BC} \quad (1)$$

同様に、パス AC のパケット廃棄率の推定値 ( $P'_{AC}$ ) は以下の式 (2) で求めることができる。

$$P'_{AC} = 1 - (1 - P_{AB})(1 - P_{BC}) \quad (2)$$

最後に、パス AC の利用可能帯域 ( $B'_{AC}$ ) は以下の式 (3) で与

えられる。

$$B'_{AC} = \min(B_{AB}, B_{BC}) \quad (3)$$

このような推定を行うにあたっては、計測によって得られる遅延時間などの値の信頼性が重要となる。例えば、(1)式を用いたパス AC の遅延時間の推定においては、パス AB の遅延時間、およびパス BC の遅延時間をいかに高精度で計測できるかが重要となる。そこで次章においては、パスの性能の計測結果の信頼性を向上するための統計処理手法を提案する。

なお、本稿では、紙面の都合上、遅延時間の推定手法のみを対象とする。

### 3. 統計処理手法

#### 3.1 遅延時間の計測における統計的処理

本稿における オーバレイパスの遅延時間の計測は、複数回行い、統計処理を行うことで計測結果の精度の向上を図る。オーバレイネットワークにおけるオーバレイノードは、通常サーバ上の仮想マシンなどによって実現されることが多い[8]。そのため、サーバや仮想マシンの負荷の増大などにより、計測される遅延時間が異常に大きくなることもある。本稿では、そのような計測値を異常値と呼ぶ。遅延時間の計測は、オーバレイノード間のネットワーク性能を知ることが目的であることを考慮すると、このような計測結果が得られた場合には、計測そのものをやり直したり、異常な計測結果を除去することにより、ネットワークの遅延時間の推定精度を向上することが必要である。

そこで、提案手法においては、複数回の遅延時間の計測結果から、計測したパスの遅延時間を求める際には、平均値ではなく、中央値を用いる。これは、一般的に中央値は上述した異常値が与える影響を平均値に比べて小さくすることができるためである。しかし、オーバレイノードの負荷が長時間に渡って高い状況などにおいては、計測結果に異常値が多く含まれる場合がある。その場合、中央値を用いても計測結果が異常値から受ける影響を排除することができない。このように、異常値が多く含まれる計測結果が得られる場合には、計測結果全体を信頼せず、しばらく後に再度計測を行うべきである。一方、異常値がそれほど多く含まれない場合においては、計測結果に対して統計的検定を行い、上述の異常値に相当する外れ値を除去することによって、計測結果の信頼性を向上することが可能であると考えられる。

そこで、本稿における計測結果の統計処理は、以下の2つの手法を用いて計測結果の信頼性を向上する。

#### 3.2 統計的検定による異常値の除去

計測結果に含まれる異常値を除去し、計測結果の信頼性を向上させる手法として、スミルノフ・グラブス検定[9]に基づく統計的検定手法を提案する。提案手法においては、検定のために必要な帰無仮説および対立仮説を以下のように設定し、有意水準  $\alpha$  で片側検定を行う。具体的なアルゴリズムは下記の通りである。

帰無仮説  $H_0$ : 「全てのデータは同じ母集団からのものである」  
対立仮説  $H_1$ : 「データのうち、中央値からの差が最大のものは異常値である」

(i) 遅延時間の計測結果の個数を  $n$ 、計測結果を  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  とする。

(ii) 計測結果の平均を  $\bar{X}$ 、不偏分散を  $U$  とする。

(iii) 計測結果の中央値から差が最大の計測結果  $X_i$  に対し

て、(4)式により  $T_i$  を求める。

$$T_i = \frac{|X_i - \bar{X}|}{\sqrt{U}} \quad (4)$$

(iv) 計測回数と有意水準  $\alpha$  から有意点  $t$  を求める。

(v) 帰無仮説の採否を決める。

(v-i)  $T_i < t$  のとき、帰無仮説を採択する。つまり、 $X_i$  は異常値では無いと判断し、アルゴリズムを終了する。

(v-ii)  $T_i \geq t$  のとき、帰無仮説を棄却する。つまり、 $X_i$  を異常値と判断し、計測データの集合から除去し、(i)へ戻る。

上述のアルゴリズムを用いることで、特に、計測結果に含まれる異常値の割合が少ない場合においては、異常値が効果的に除去されるため、計測結果の信頼性が向上することが期待される。

#### 3.3 計測環境に応じた計測結果の削除

本手法においては、計測結果全体が信頼できないか否かを判断し、信頼できない場合には計測をやり直すことを前提とする。計測結果が信頼できるか否かは、計測環境が閾値を超えるほど悪いか否かで判断する。ここで、計測環境を示す指標として、計測された最大遅延時間、計測中のオーバレイノードの負荷、計測中の計測パケットの廃棄率を挙げる。これらの指標が設定した閾値を超えていた場合には、計測結果全体を信頼できないと判断して、得られている計測結果を破棄し、計測をやり直す。この手法は主に、通常のネットワーク環境においてはあり得ないような計測結果が得られるような状況を想定している。

## 4. 精度評価

#### 4.1 評価環境

本稿における評価においては、PlanetLab[10]上のノード間のネットワーク性能を計測した結果を用いる。計測はノード間の往復遅延時間およびパケット廃棄率に関して行い、UDPパケットを送受信する計測アプリケーションを使用した。計測手法は以下の通りである。

(1) 3台のPlanetLabノードを選出する(ノードA、ノードB、ノードCとする)。

(2) ノードBを経由するパスACの遅延時間を計測する。

(3) パスABの遅延時間を計測する。

(4) パスBCの遅延時間を計測する。

図3に計測手法を図示する。計測結果統合手法ではパスABとパスBCの性能からパスACの性能を推定するため、パスACの計測においては、ノードBを経由するような経路が用いられるように、アプリケーションにより制御する。(2)-(4)における遅延時間の計測においては、1000個のUDPパケットを送出し、それぞれのパケットの遅延時間を取得した。パケット廃棄率は、1000回の計測中に失われたパケットの個数を用いて導出する。ここで、3台のPlanetLabノードA、B、Cに対する、パスACの計測結果、パスABの計測結果、及びパスBCの計測結果を、1つのデータセットと定義する。また、本章における評価では、推定精度を評価する際、計測結果が信頼できないと判断された場合には、計測をやり直すのではなく、そのデータセットを推定誤差の評価の対象から除外する。これにより、3章で提案した計測結果の統計処理手法の有効性を評価する。以降の評価結果は、47,503個のデータセットを用いた結果である。

遅延時間の推定精度として、パスACの計測値とパスACの推定値との相対誤差を用いる。パスACにおける計測値  $T_{AC}$

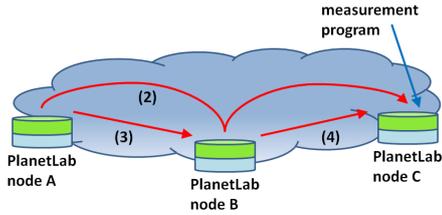


図3 PlanetLabにおける計測手法

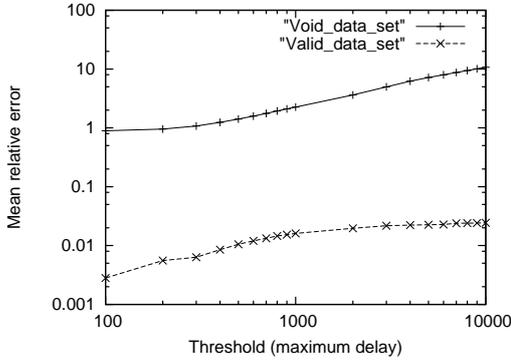


図4 最大遅延時間の閾値と遅延時間の平均相対誤差の関係

と推定値  $T'_{AC}$  との相対誤差  $\Delta$  は以下の式 (5) により導出する。

$$\Delta(T_{AC}, T'_{AC}) = \frac{|T_{AC} - T'_{AC}|}{T_{AC}} \quad (5)$$

上述の指標を用いて導出した、全てのデータセットを、3章で提案した統計処理手法を適用せずにそのまま用いた場合における、遅延時間の平均相対誤差は 0.88 となった。これは、遅延時間の計測誤差としては極めて大きい。これは、3章で提案した統計処理手法を用いずに、計測結果をそのまま用いると、計測結果統合手法の推定誤差が非常に大きくなることを示している。

#### 4.2 計測環境に応じた計測結果の削除手法の評価

本節では、3.2節で提案した、計測結果の削除手法の有効性を評価する。図4は計測結果中の最大遅延時間の閾値と、閾値によって削除されたデータセットの平均相対誤差、および削除されなかったデータセットの平均相対誤差の関係を示したものである。ここで、削除されたデータセットを無効データセット (Void data set)、削除されなかったデータセットを有効データセット (Valid data set) と定義する。

図4より、最大遅延時間の閾値を 10000msec としても、遅延時間の平均相対誤差は 0.025 以内であることが分かり、全ての計測結果を統計処理を行わずに用いた場合と比較すると、非常に高い精度で推定できていると言える。これは、PlanetLabにおける遅延時間の計測結果には、平均相対誤差に大きな影響を与えるような、極めて大きな計測値が含まれることが原因であると考えられる。このことは、無効データセットの平均相対誤差が、1.0 を上回っていることからわかる。

図5に最大遅延時間の閾値と、有効データセット数の割合との関係を示す。この割合は、PlanetLab上のあるノード間で計測を行った時に、その計測結果全体が信頼できる確率に相当する。そのため、この割合が大きいほど、計測結果を効率的に利用していると言える。図から、最大遅延時間の閾値を 1000msec とした場合には約 60%、3000msec とした場合には約 80%の計測が有効であることがわかる。しかし、イン

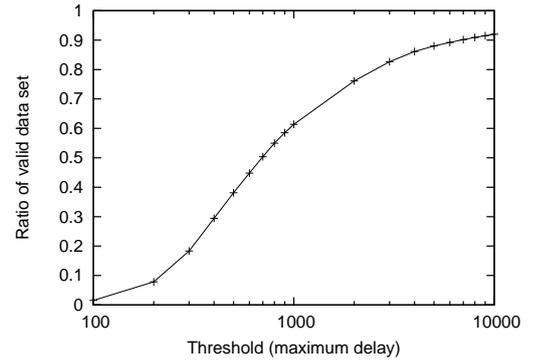


図5 最大遅延時間の閾値と有効データセット数割合の関係

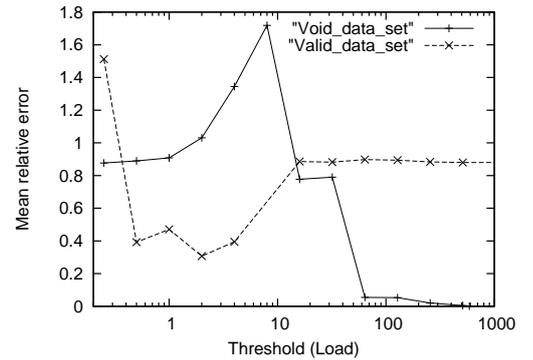


図6 ノード負荷の閾値と平均相対誤差の関係

ターネット環境における遅延時間が 1000msec を超えることは稀であること、また、図4より、最大遅延時間の閾値がおよそ 1000msec を超えると、無効データセットにおける平均相対誤差がより大きくなっていることから、最大遅延時間の閾値としては 1000msec が適切であると考えられる。

図6に、閾値としてオーバレイノードの負荷 (送信ノード、中継ノード、及び受信ノードの負荷の平均値) を用いた場合における、負荷の閾値と遅延時間の平均相対誤差の関係を示す。図から、負荷の閾値が 2.0 の時に、有効データセットの平均相対誤差が最小となっていることがわかる。このことから、今回の計測環境においては、負荷の閾値は 2.0 が適切であると考えられる。しかし、無効データセットの平均相対誤差が比較的小さいこと、また、負荷の閾値に対して遅延時間の平均相対誤差が安定的な結果を示していないことから、負荷を閾値をすることの有効性は低いと考えられる。

図7に、パケット廃棄率を閾値として用いた場合における、閾値と遅延時間の平均相対誤差の関係を示す。図から、パケット廃棄率が 0.3 を超えると、有効データセットの平均相対誤差が急激に増加することがわかる。また、無効データセットの平均相対誤差が、閾値が 0.3 の時にほぼ最大となっている。このことから、本稿における計測環境においては、パケット廃棄率の閾値として 0.3 が適切であると考えられる。図8に、閾値としてパケット廃棄率を用いた場合における、閾値と有効および無効データセット数の関係を示す。図から、閾値として 0.3 を用いることで、約 97%の計測結果が有効になることがわかる。

#### 4.3 複合条件下におけるパスの推定精度

前節では、最大遅延時間、負荷値、及びパケット廃棄率を、それぞれ単独で閾値として用いた場合における、計測精度評価を行い、計測結果を信頼するための条件として、それぞれの閾

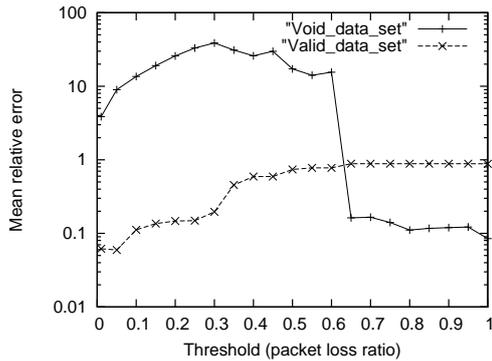


図 7 パケット廃棄率の閾値と平均相対誤差の関係

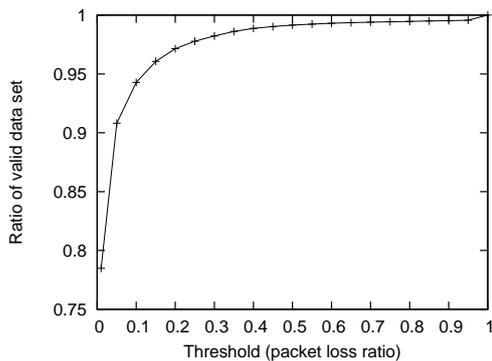


図 8 パケット廃棄率の閾値と有効データセット数割合の関係

表 1 複合条件によるパスの推定精度と有効データセット数割合

条件	平均相対誤差	有効データセット数割合
条件なし	0.8800	1.0000
条件 A	0.0161	0.6138
条件 B	0.3072	0.2083
条件 C	0.1962	0.9823
条件 A and 条件 B	0.0147	0.1630
条件 A and 条件 C	0.0157	0.6042
条件 B and 条件 C	0.2501	0.2045
条件 A and 条件 B and 条件 C	0.0142	0.1606
条件 A or 条件 B	0.1085	0.6591
条件 A or 条件 C	0.1947	0.9918
条件 B or 条件 C	0.2084	0.9861
条件 A or 条件 B or 条件 C	0.2072	0.9933

値を下記のように導出した。

- 条件 A. 計測中の遅延時間の最大値が 1000msec 以下
- 条件 B. 計測中のオーバーレイノードの負荷値が 2.0 以下
- 条件 C. 計測中のパケットの廃棄率が 0.3 以下

しかし、一般に、遅延時間とパケット廃棄率には相関関係があることが多く、また、ノードの負荷の増大に伴い、遅延時間の増大やパケット廃棄が引き起こされることが考えられる。したがって、これらの条件を複合的に用いることで、計測結果を信頼するか否かの判断精度がさらに向上することが考えられる。

表 1 に、これら条件の論理積または論理和を用いて計測結果の削除を行った場合における、遅延時間の平均相対誤差と有効データセット数割合を示す。この表から、遅延時間の平均相対誤差を 0.02 以下に抑えつつ、有効データセット数割合を 0.6 程度にすることができるような条件が存在することがわかる。また、有効データセット数割合を 0.98 以上にしつつ、遅延時間の平均相対誤差を 0.2 程度に抑えることができる条件も存在する。これらの結果から、計測精度と計測結果の有効性にはトレード

表 2 閾値による判定後に検定を行う場合の平均相対誤差と有効データセット数割合

条件	相対誤差平均	有効データセット数割合
条件なし	0.8803	1.0000
条件 A	0.0160	0.6138
条件 B	0.3071	0.2083
条件 C	0.1952	0.9823
条件 A and 条件 B	0.0146	0.1630
条件 A and 条件 C	0.0156	0.6042
条件 B and 条件 C	0.2500	0.2045
条件 A and 条件 B and 条件 C	0.0141	0.1606
条件 A or 条件 B	0.1084	0.6591
条件 A or 条件 C	0.1929	0.9975
条件 B or 条件 C	0.2075	0.9861
条件 A or 条件 B or 条件 C	0.2063	0.9933

表 3 検定を行った後に閾値による判定を行う場合の平均相対誤差と有効データセット数割合

条件	相対誤差平均	有効データセット数割合
条件なし	0.8803	1.0000
条件 A	0.0200	0.9853
条件 B	0.3071	0.2083
条件 C	0.1952	0.9823
条件 A and 条件 B	0.0180	0.2042
条件 A and 条件 C	0.0196	0.9700
条件 B and 条件 C	0.2500	0.2045
条件 A and 条件 B and 条件 C	0.0175	0.2013
条件 A or 条件 B	0.0808	0.9894
条件 A or 条件 C	0.0808	0.9894
条件 B or 条件 C	0.2075	0.9861
条件 A or 条件 B or 条件 C	0.2054	0.9984

オフの関係があるが、条件を適切に設定することによって、アプリケーションの要求に応じた閾値の設定を行うことができることがわかる。

#### 4.4 統計的検定による計測結果の信頼性の向上

3.2 節で提案した統計的検定手法を、全てのデータセットに対して適用すると、適用後の平均相対誤差は 0.8803 となり、検定前とほぼ同じ値となった。これは、異常値が多く含まれるデータセットにおいては、検定を行うことにより、異常値でない計測結果が削除されてしまうためであると考えられる。そこで本稿では、4.2 および 4.3 節で検討した、閾値を用いたデータセットの削除手法と、統計的検定手法を組み合わせた場合における、計測精度の評価を行う。

表 2 に、閾値を用いて計測結果を信頼するか否かの判定を行った後に、有効データセットに対して統計的検討を行った場合の、遅延時間の平均相対誤差と有効データセット数割合を示す。また表 3 には、全計測結果に対して統計的検定を行った後に、閾値を用いて計測結果を信頼するか否かの判定を行った場合の、遅延時間の平均相対誤差と有効データセット数割合を示す。表 2 と表 3 を比較すると、遅延時間の平均相対誤差の平均値はほぼ同等であるが、特に、最大遅延時間を閾値として用いる場合において、先に統計的検定を行う場合の方が、有効データセット数割合が大きいことがわかる。特に、条件 A と条件 C の論理積を用いることによって、97% のデータセットの平均相対誤差を 0.02 以下に抑えることができる。この結果から、本稿における計測環境においては、計測結果に対して統計的検定を行った後に、最大遅延時間を閾値として計測結果の有効性を判断することが有効であることがわかる。

#### 4.5 遅延時間の計測回数と計測精度の関係

次に、遅延時間の計測回数が計測精度に与える影響を評価する。ここでは、遅延時間の計測を 1000 回行い、統計的検定や

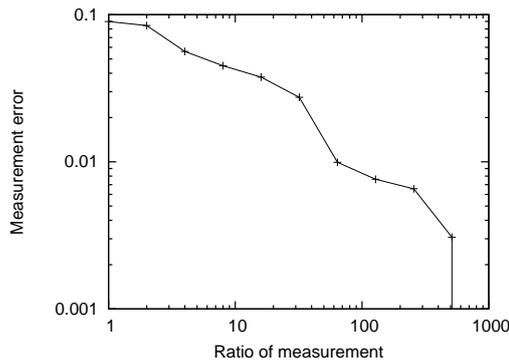


図 9 遅延時間の計測回数と計測精度の関係

閾値を用いた判定による信頼性の向上を行った後に、中央値により導出した遅延時間を、正しい遅延時間の計測結果と仮定する。それに対して、計測回数を削減した場合は、1000回の計測結果のうち、連続した計測結果の一部分を、少ない計測回数における計測結果であると見なし、同様の統計処理を行い、計測結果を得る。計測精度の評価は、得られた計測結果の、正しい遅延時間の計測結果に対する誤差を評価する。

図 9 に計測回数と計測精度の関係を示す。この図から、計測回数が非常に少ない場合には、統計的検定の影響が小さく、計測精度は低いことが分かる。しかし、計測回数が増加するにつれて、計測誤差が低下している。このことから、アプリケーション要求に応じて、適切な計測回数を設定することが可能であることがわかる。

#### 4.6 遅延時間を用いるアプリケーション性能

最後に、遅延時間の計測結果を用いるアプリケーションとして、オーバーレイネットワークにおける経路選択問題を想定する。すなわち、計測結果統合手法を用いて 2 つのパスの遅延時間を推定し、遅延時間が短いと考えられるパスを選択した際に、その選択が誤っている確率を評価する。具体的には、パス AC 及びパス AD の遅延時間を計測結果統合手法を用いて推定し、遅延時間を比較した結果と、2 つのパスを実際に計測して遅延時間を比較した結果が異なる場合に、経路選択を誤ると考える。つまり、下記が満たされる時に経路選択を誤ると見なす。

$$(T_{AC} < T_{AD} \text{ and } T'_{AC} > T'_{AD})$$

$$\text{or } (T_{AC} > T_{AD} \text{ and } T'_{AC} < T'_{AD})$$

図 10 に、3 章において提案した統計処理手法を用いず、全てのデータセットを用いる場合、及び統計的検定を行った後、4.4 節において導出した条件 A と条件 C の論理積を条件として用いて計測結果の有効性を判断した場合の両方における、経路選択を誤る割合を示す。図の横軸は、2 つのオーバーレイパスの実際の計測値の差 ( $|T_{AC} - T_{AD}|$ ) を示し、縦軸は、計測データセットから得られる全てのパスの組み合わせに対する、経路選択を誤る割合を示している。この図から、本稿における提案手法を適用することによって、誤判断確率を最大で 2 桁程度改善できることがわかる。一方、実際の計測結果の差が非常に大きい場合においては、誤判断確率が増加していることが分かる。これは、提案手法では、実際の計測値が非常に小さく、1000msec を超えない異常値が多い場合においては、異常値を完全に排除し切れないことが原因であると考えられる。

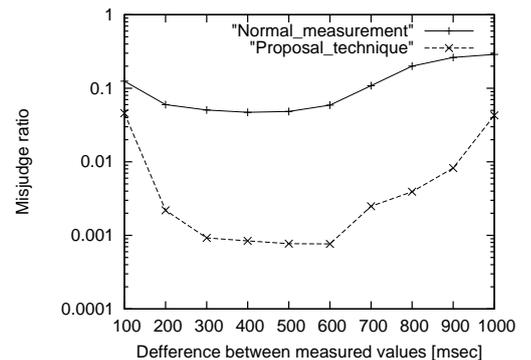


図 10 遅延時間の大小関係と誤判断確率

## 5. おわりに

本稿においては、PlanetLab 環境における計測結果を用いて、計測結果統合手法の計測精度の評価を行い、計測精度を向上させるための統計処理手法を提案した。その結果、適切な統計処理を行うことで、約 97% の遅延時間の計測結果に対して、遅延時間の推定誤差を 0.02 以下に抑えることができることがわかった。また、遅延時間を用いるアプリケーションとして、オーバーレイネットワークにおける経路選択を対象とし評価した結果、計測結果統合手法が非常に有効であることが明らかとなった。

今後の課題として、異なるネットワーク環境における性能評価が挙げられる。また、遅延時間を用いる他のアプリケーションを想定した性能評価も重要であると考えられる。

## 謝 辞

本研究の一部は、情報通信研究機構からの委託研究「ダイナミックネットワーク技術の研究開発 課題力」によっている。ここに記して謝意を示す。

## 文 献

- [1] “Skype web page”, available at <http://www.skype.com/>.
- [2] D.G.Andersen, H.Balakrishnan, M.F.Kaashoek and R.Morris, “Resilient overlay networks”, in *Proceedings of 18th ACM Symposium on Operating Systems Principles*, Oct. 2001.
- [3] A.Nakano, L.Peterson, and A.Baver, “Scalable routing overlay networks”, *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 40, pp. 49–61, 2006.
- [4] S.Banerjee, B.Bhattacharjee and C.Kommareddy, “Scalable application layer multicast”, in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2002*, Aug. 2002, pp. 205–220.
- [5] B.Zhang, S.Jamin and L.Zhang, “Host multicast: A framework for delivering multicast to end users”, in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2002*, June 2002, pp. 1366–1375.
- [6] 森弘樹, 長谷川剛, 村田正幸, “オーバーレイネットワークにおける経路重複を利用した計測手法”, 電子情報通信学会技術研究報告 (ICM2008-67), vol. 108, no. 481, pp. 53–58, Mar. 2009.
- [7] 長谷川剛, 村田正幸, “オーバーレイネットワークにおける計測結果統合手法の精度評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 110, no. 39, pp. 1–6, May 2010.
- [8] 樋口淳一, 吉川隆士, “耐障害型オーバーレイネットワークの評価”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, vol. BS-3-4, Sept. 2010.
- [9] S.Burke, “Missing values, outliers, robust statistics & non-parametric methods”, *LC-GC Europe Online Supplement, Statistics & Data Analysis*, vol. 2, pp. 19–24, Jan. 2001.
- [10] “Planetlab web page”, available at <http://www.planetlab.org/>.