

特別研究報告

題目

オーバレイネットワークにおける パケット廃棄率の計測結果の空間的合成手法

指導教員

中野 博隆 教授

報告者

飯島 優介

平成 24 年 2 月 16 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

オーバーレイネットワークにおける
パケット廃棄率の計測結果の空間的合成手法

飯島 優介

内容梗概

オーバーレイネットワークは IP ネットワーク上に論理的に構築されたネットワークである。その性能を維持、向上させるためには、定期的にオーバーレイノード間のネットワークパスを計測し、その性能を把握する必要がある。その際、オーバーレイネットワーク上の全てのパスを計測すると、オーバーレイノード数の増加に伴い計測負荷が急激に増大する問題がある。既存研究において、計測負荷を低減する手法がこれまでに提案されているが、それらの手法は、全てのパスの性能を把握する完全性が犠牲になる、特定の性能指標のみの計測を行う、などの欠点を持つ。

これに対し、オーバーレイネットワークの全てのパスの計測結果を得る完全性を維持しつつ、計測負荷を削減する、計測結果の空間的合成手法が注目されている。この手法は、複数のオーバーレイパスの経路が重複している場合に、全体のパスを複数の部分パスに分割し部分パスを必要に応じて計測することによって、重複部分の冗長な計測を回避する。また、部分パスの計測結果を合成し、エンド間パスの性能を推定する。この時、計測結果の空間的合成によって得られた推定結果と、実際の計測結果との間の誤差、すなわち推定精度を高く維持する必要がある。我々の研究グループにおける過去の研究において、遅延時間に関する空間的合成手法の推定精度の評価を行い、推定精度を向上させるための計測結果の統計処理手法が提案されている。しかし、遅延時間だけではなく、パケット廃棄率や TCP スループットなどの指標が重要になるアプリケーションが存在するが、これらについてはその精度が評価されていない。

そこで本報告では、PlanetLab 上における計測結果を用いた、パケット廃棄率の計測結果の空間的合成手法の精度評価を行った。また、推定精度を向上させるための計測結果のデータ処理手法を提案した。精度評価の結果、PlanetLab 環境における、実際のパケット廃棄率の計測結果と、空間的合成手法によって得られた推定値との平均対数誤差は約 0.4 であることがわかった。また、パケット廃棄率の計測においては、オーバーレイノード処理負荷が原因となり、計測開始後の数秒間にパケットが全く届かないことがあり、そのような計測結果を

削除した上で統合手法を適用することによって、推定精度が向上することがわかった。さらに、パケット廃棄率の計測結果に対し、統計的検定を適用し、外れ値を除去することにより、平均対数誤差を最大で 36%改善できることを示した。

主な用語

オーバーレイネットワーク、ネットワーク計測、空間的合成、パケット廃棄率、精度評価

目次

1	はじめに	4
2	オーバーレイネットワークにおける計測結果の空間的合成手法	7
3	パケット廃棄率の計測結果に対するデータ処理手法	9
3.1	概要	9
3.2	計測開始直後の計測結果の除去	9
3.3	統計的検定による異常計測結果の除去	9
4	性能評価結果と考察	11
4.1	性能評価環境	11
4.2	空間的合成手法の推定精度	13
4.3	提案手法の性能評価	15
4.3.1	計測直後の計測結果除去の効果	15
4.3.2	統計的検定による異常計測結果除去の効果	17
5	まとめと今後の課題	19
	謝辞	20
	参考文献	21

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。そ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] や BitTorrent [2]、Veoh [3]、などに用いられている P2P ネットワークやグリッドネットワーク [4]、及び IP-VPN [5] などが挙げられる。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、アプリケーション毎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 [6] 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。したがって、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。

これまでに、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) [7] においては、参加している全てのオーバレイノードが全ての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。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、オーバレイノード数の増加に伴い計測負荷が急激に増大し、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 [8]。また、NICE [9] や HMTP [10] といった手法においては、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、計測コストを $O(n)$ まで削減することに成功しているが、計測の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いるとは言えない。また、伝送遅延時間の計測に対しては、ルータ数に対してスケーラブルな計測手法が提案されている [11-14]。しかし、これらの手法はネットワーク帯域やパケット廃棄率などの計測には適用することができない。

この問題に対して本報告では、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の空間的合成手法 [15-17] に着目した。この手法は、複数のオーバレイパスの経路が重複している場合に、計測を分割し、重複部分の冗長な計測を回避する。また、部分的なパスの計測結果を合成して、エンド間パスの性能を推定する。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、本手法による計測コストの削減効果が大きくなる。計測コストの

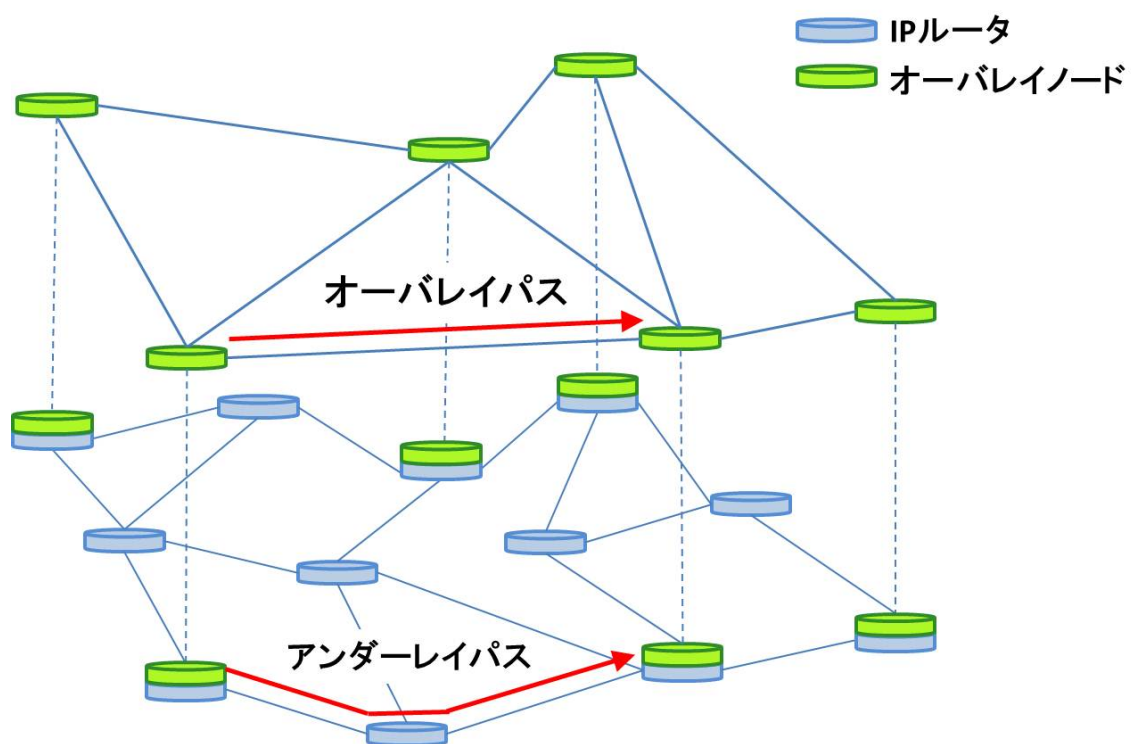


図 1: オーバーレイネットワーク

削減量は [16] において評価されており、計測パス数が最大で約 1/4000 に削減されることが明らかとなっている。

しかし、空間的合成手法は全てのオーバーレイパスの完全な計測を行わないため、本手法が提供する計測結果には空間的合成によって発生する誤差が含まれる場合がある。空間的合成手法においては、あるオーバーレイノード間の経路上に他のオーバー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、オーバーレイノードにおける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。

我々の研究グループにおいては、遅延時間にの計測結果に関して、その空間的合成手法の推定精度の評価と、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しており、遅延時間の推定誤差が 88% から 0.6% に改善することを明らかにしている [18]。一方で、パケット廃棄率や TCP スループットなどの指標が重要になるアプリケーションが存在するが、これらについてはその精度が評価されていない。

そこで、本報告では、オーバーレイネットワークにおけるパケット廃棄率の計測に関して、その空間的合成手法により発生する推定誤差に着目し、性能評価を行う。具体的には、PlanetLab [19] 上における実ネットワーク上の計測結果を用いて、発生する推定誤差を評価する。また、推定精度を向上させるためのデータ処理方法として、計測誤差が発生する際の特徴を利用した手法、および統計的検定に基づく手法を提案し、精度向上に対する効果を評価する。

本報告の構成は以下の通りである。2 章においては、本報告において対象とする、オーバーレイネットワークにおける計測結果の空間的合成手法について述べる。3 章では、本報告において提案する、パケット廃棄率の推定精度を向上するためのデータ処理手法について述べる。4 章では、PlanetLab 環境における計測結果を利用した、パケット廃棄率の空間的合成手法の計測結果推定精度を評価し、3 章において提案したデータ処理手法の性能評価を行う。最後に、5 章で本報告のまとめと今後の課題について述べる。

2 オーバレイネットワークにおける計測結果の空間的合成手法

本報告で着目している計測結果の空間的合成手法 [15-17] 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、重複している箇所の計測を回避する。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。計測結果合成手法は、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、ノード B を経由するパス 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} 、同様にパス AB, BC の遅延時間、パケット廃棄率、利用可能帯域を、 T_{AB} , T_{BC} , P_{AB} , P_{BC} , B_{AB} , B_{BC} とそれぞれ定義する。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 の利用可能帯域の推定値 (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やパケット廃棄率などの値の信頼度が重要となる。例えば、(2) 式を用いたパス AC のパケット廃棄率の推定においては、パス AB のパケット廃棄率、およびパス BC のパケット廃棄率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、推定精度を向上するためのデータ処理手法を提案する。

なお、本報告では、パケット廃棄率の推定手法のみを精度評価の対象とする。

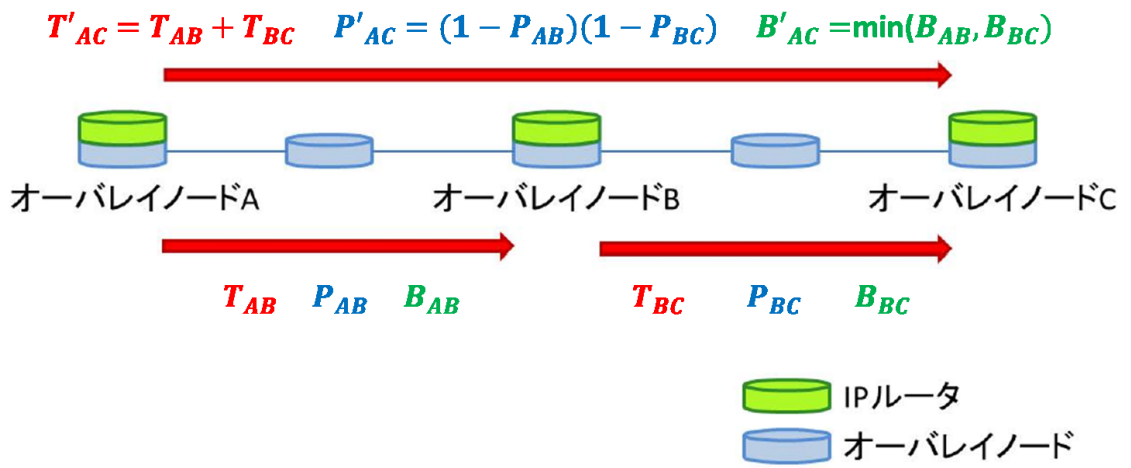


図 2: 計測結果の空間的合成手法

3 パケット廃棄率の計測結果に対するデータ処理手法

3.1 概要

本報告におけるオーバーレイパスのパケット廃棄率の計測は、計測パケットの送信を複数回行い、パケットが廃棄された割合を導出した値に関して、下記に示すような処理を行うことで、計測結果の精度の向上を図る。オーバーレイネットワークにおけるオーバーレイノードは、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 [20]。そのため、サーバや仮想マシンの負荷の増大などにより、計測されるパケット廃棄率が信頼できないことがある。本報告では、そのような計測値を異常値と呼ぶ。パケット廃棄率の計測は、オーバー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、ネットワークパスのパケット廃棄率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、異常な計測結果が得られる時の計測に現れる特性に基づいたデータ処理手法、および、統計的検定に基づいて異常値を検出し、そのような計測結果を排除する手法を提案する。以下では、それぞれの手法を順に説明する。

3.2 計測開始直後の計測結果の除去

オーバーレイネットワークにおけるパケット廃棄率の計測においては、計測開始直後の数秒間に、計測パケットが連続して廃棄されることがある。これは、計測パケットを処理するためのオーバーレイノード上のプログラムが、その起動直後において、パケットを処理するために大きな時間を要しているためだと考えられる。4章においては、PlanetLab 環境においてそのような現象が発生していることを示す。

このように、計測開始直後の先頭パケット群が連続して廃棄されると、ネットワークのパケット廃棄率の計測精度が大きく低下し、結果として、空間的合成手法によるパケット廃棄率の推定精度が劣化する。そこで本報告では、計測開始直後の先頭のパケット群の計測結果を除去することによって、この問題を解決する。

3.3 統計的検定による異常計測結果の除去

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 [21] 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、ネットワークパスのパケット廃棄率の計測結果に対し、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 α 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 H0: 全ての計測結果は同じ母集団からのものである

対立仮説 H1: 計測結果のうち、値が最大のものは異常値である

1. パケット廃棄率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。
2. 計測結果の平均を \bar{X} 、不偏分散を U とする。
3. パケット廃棄率の計測値が最大の X_i に対して、(4) 式により T_i を求める。

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

4. 計測回数と有意水準 α から有意点 t を求める。
5. 帰無仮説の採否を決める。
 - 5-1. $T_i < t$ 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。
 - 5-2. $T_i \geq t$ 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、計測結果の集合から除去し、1. へ戻る。

本報告では、インターネットにおけるパケット廃棄率の特性を考慮し、極端に大きな計測結果が得られた場合には、それがネットワーク輻輳によるものでは無い可能性を考慮し、を異常値として除去する。一方、小さなパケット廃棄率に関しては、少なくともネットワークにおいてパケット廃棄が発生していないことを示しているため、異常値としては取り扱わない。そのため、上述の手法における対立仮説に示すように、検定の対象とする計測値は、計測結果の中でパケット廃棄率が最大のものとしている。上述のアルゴリズムを用いることで、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、計測結果の信頼度及び推定精度が向上することが期待される。

4 性能評価結果と考察

4.1 性能評価環境

本報告における計測結果の空間的合成手法、及び提案手法の評価においては、Planet-Lab [19] 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 上のパケット廃棄率を計測する。
- (3) パス AB 上のパケット廃棄率を計測する。
- (4) パス BC 上のパケット廃棄率を計測する。
- (5) (2)-(5) を 10 回繰り返す。

図 3 に計測手法を図示する。計測結果合成手法ではパス 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) におけるパケット廃棄率の計測においては、送信ノードが 1,000 個の UDP パケットを受信ノードに向けて送出し、それを受信した受信ノードは、送信ノードに向けて UDP パケットを返送する。送信ノードは、受信ノードから返送された UDP パケットの割合を評価することによって、パケット廃棄率の計測結果を得る。この計測を各組み合わせにおいて 10 回繰り返すため、1,000 個のパケット送信に対するパケット廃棄率の計測結果が 10 個得られるため、それを、10,000 個のパケット送信に対するパケット廃棄率として見なす。

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データ処理手法の有効性を評価する。以降の評価結果は、PlanetLab 上において 2010 年 11 月 17 日から 2011 年 1 月 21 日の間に取得した、47,503 個のデータセットを用いた結果である。

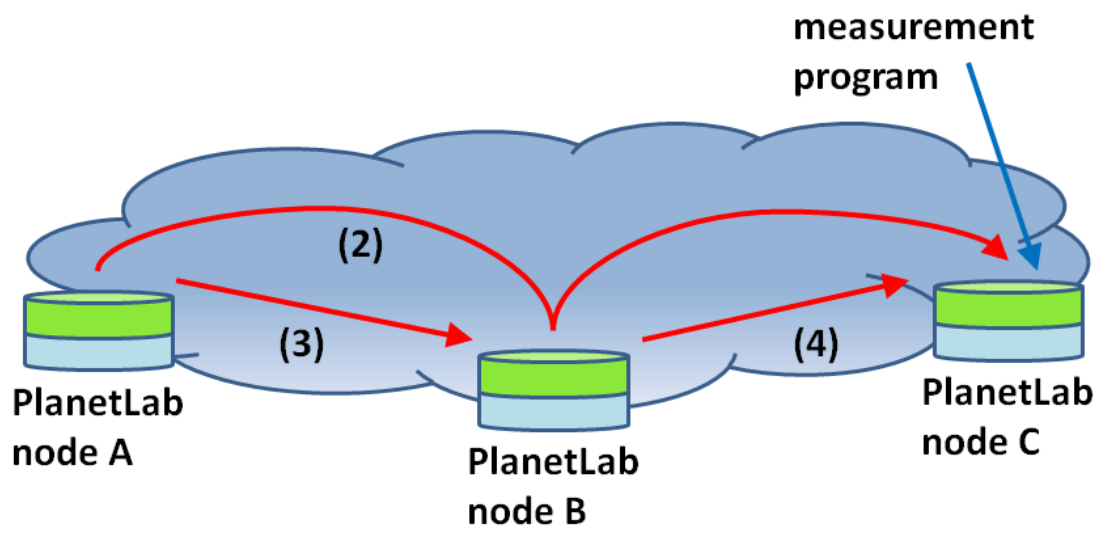


図 3: PlanetLab における計測環境

4.2 空間的合成手法の推定精度

図4に、パケット廃棄率の空間的合成手法の精度評価結果を示す。図の横軸は、実際に計測した経路ACのパケット廃棄率(P_{AC})を、縦軸は式(2)によって推定した経路ACのパケット廃棄率(P'_{AC})をそれぞれ表す。なお便宜上、図中の1e-05は、10,000回のパケット送信においてパケット廃棄率がゼロであったことを意味している。表1には、実際の計測値と推定値の平均対数誤差の、実際の計測値による変化を示している。図4および表1より、特に実際の計測によって得られた廃棄率がおよそ0.01以上の場合においては、式(2)による推定が概ね高い精度で全体経路のパケット廃棄率を推定することができると言える。このことは、アプリケーションにとって重要なネットワーク指標である、TCPスループットの推定にとっては大きな意義がある。なぜなら、TCPスループットはパケット廃棄率に大きな影響を受け、特に、パケット廃棄率がおよそ0.1%以上の区間においては、TCPスループットの変動が大きいためである。

一方、実際のパケット廃棄率が小さい場合には、計測精度が大幅に劣化する場合がある。これは、パケット廃棄率の計測のために用いた最大で10,000回のパケット送信では十分な精度のパケット廃棄率が得られないことを意味している。

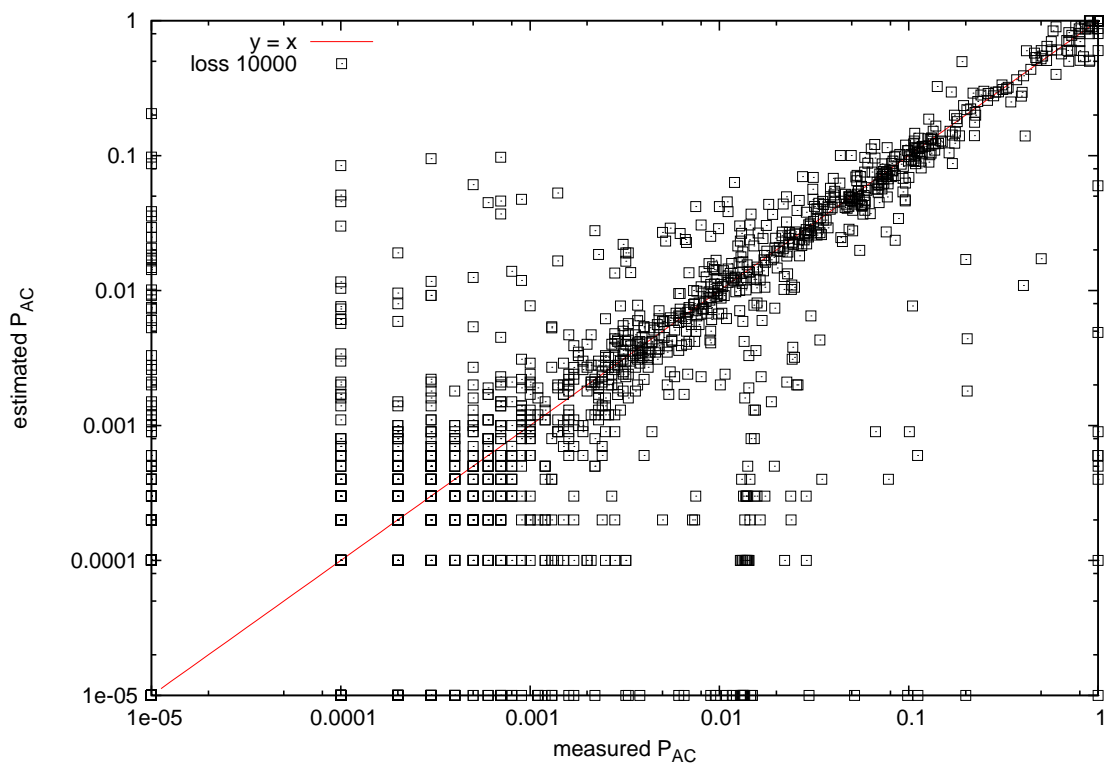


図 4: 空間的合成手法の精度評価結果

表 1: パケット廃棄率の推定手法における平均対数誤差

真の packets 廃棄率の区間	0-0.001	0.001-0.01	0.01-0.1	0.1-
推定手法の平均対数誤差	0.633	0.433	0.403	0.119

4.3 提案手法の性能評価

4.3.1 計測直後の計測結果除去の効果

図5に、3.2節において提案した、パケット廃棄率の計測の際の、計測開始直後の先頭パケットに対する計測結果を除去する手法を用いた場合における、パケット廃棄率の空間的合成手法の精度評価結果を示す。ここでは、先頭の20個の計測パケットを除去している。図の横軸は、実際に計測した経路ACのパケット廃棄率(P_{AC})を、縦軸は式(2)によって推定した経路ACのパケット廃棄率(P'_{AC})をそれぞれ表す。表2には、提案手法を用いない場合と用いる場合における、パケット廃棄率の推定における平均対数誤差の変化を示している。図5および表2より、提案手法を用いることによって、計測精度が大きく向上していることがわかる。このことから、3.2節において提案した手法が、計測精度の向上に大きく寄与することがわかる。しかし、除去する計測開始直後のパケット数は、ネットワーク環境やオーバレイノードのアーキテクチャや負荷によって大きく変動すると考えられる。適切な除去パケット数の設定方法については今後の課題としたい。

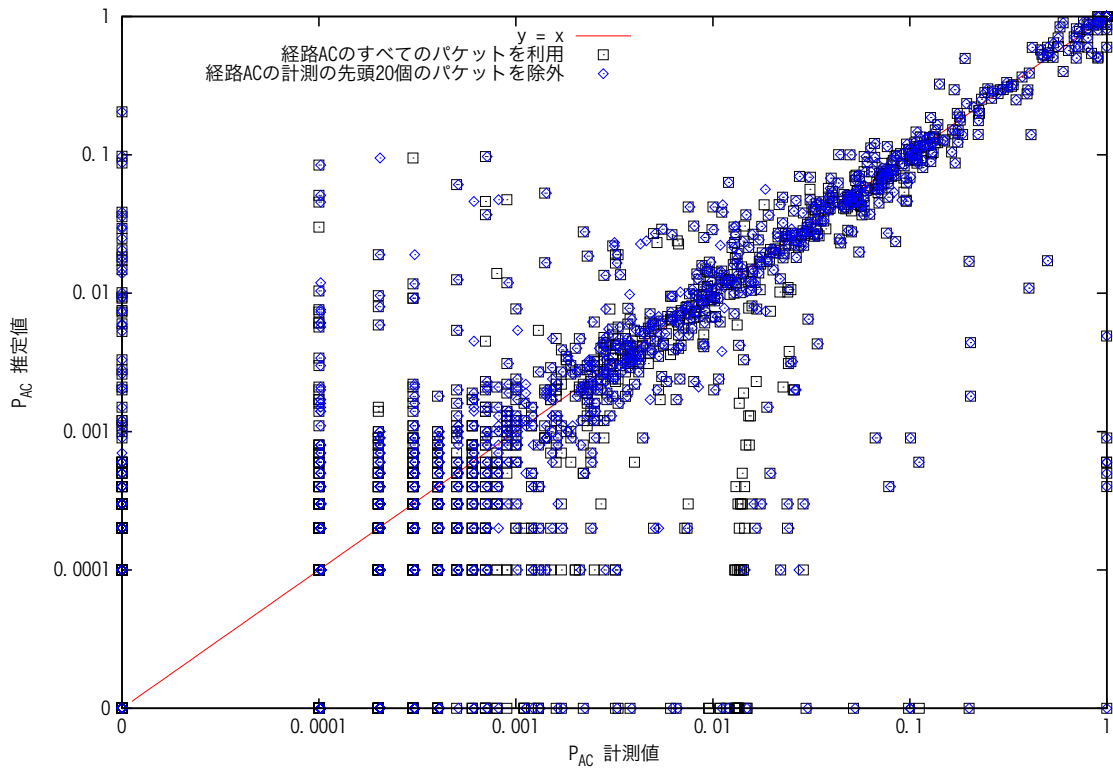


図 5: 計測開始直後の計測結果除去による計測精度の変化

表 2: 計測開始直後の計測結果の除去による平均対数誤差の変化

真のパケット廃棄率の区間	0.0001-0.001	0.001-0.01	0.01-0.1	0.1-	全体
除去前の推定手法の平均対数誤差	0.566	0.411	0.568	0.107	0.439
除去後の推定手法の平均対数誤差	0.560	0.347	0.311	0.107	0.390

4.3.2 統計的検定による異常計測結果除去の効果

図6に、3.3節において提案した、統計的検定による異常値の排除を行った場合における、パケット廃棄率の空間的合成手法の精度評価結果を示す。図の横軸は、式(2)によって推定した経路ACのパケット廃棄率(P'_{AC})を、縦軸は実際に計測した経路ACのパケット廃棄率(P_{AC})をそれぞれ表す。表3には、提案手法を用いない場合と用いる場合における、パケット廃棄率の推定における平均対数誤差の変化を示している。図6および表3より、提案手法を用いることによって、計測精度が大きく向上していることがわかる。このことから、3.3節において提案した統計的検定による計測精度向上手法が、計測精度を大きく改善できることがわかる。本手法は、3.2節で提案した手法とは異なり、その動作に、ネットワーク環境やオーバレイノード負荷などに応じたパラメータ設定を必要としないため、様々な環境で大きな効果が得られることが期待される。PlanetLab環境以外でのネットワーク環境における、提案手法の性能評価は、今後の課題としたい。

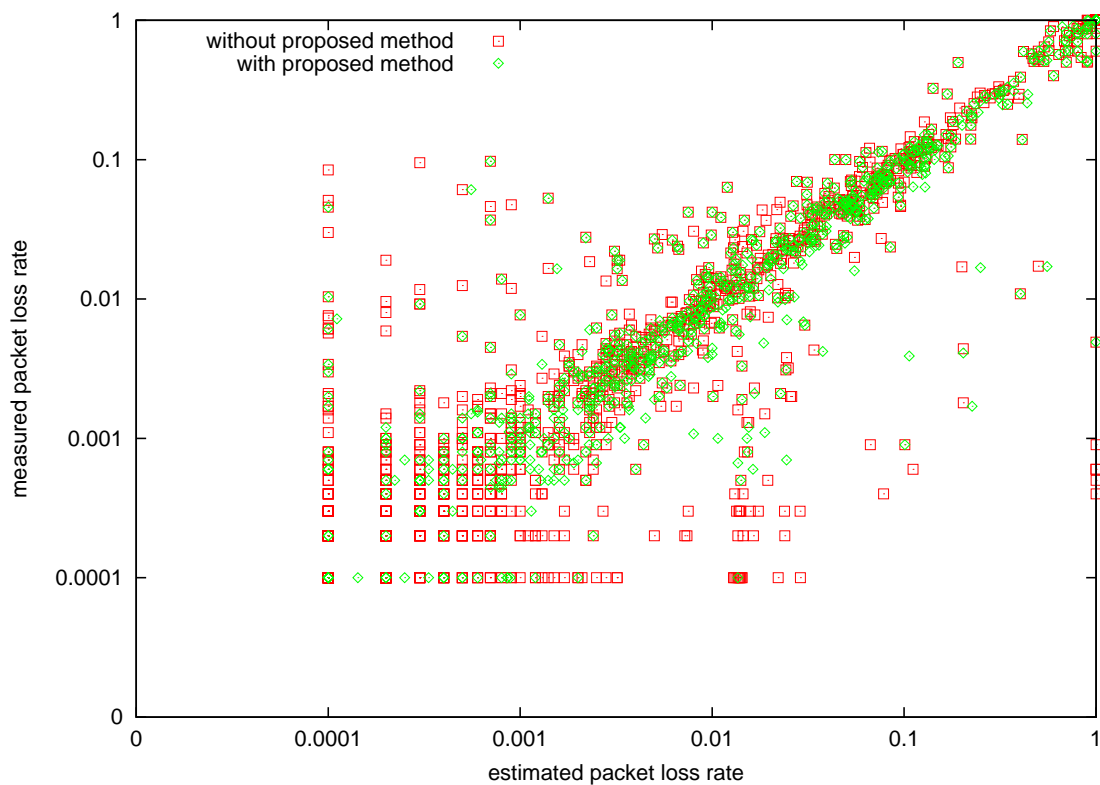


図 6: 統計的検定による異常計測結果除去による計測精度の変化

表 3: 統計的検定による異常計測結果除去による平均対数誤差の変化

パケット廃棄率の推定値の区間	0-0.001	0.001-0.01	0.01-0.1	0.1-
統計的検定前の推定手法の平均対数誤差	0.633	0.433	0.403	0.119
統計的検定後の推定手法の平均対数誤差	0.523	0.297	0.267	0.123

5 まとめと今後の課題

本報告にておいては、オーバレイネットワークにおけるパケット廃棄率の計測手法である、空間的合成手法の精度評価を行い、計測精度を向上させるためのデータ処理手法を提案した。評価の結果、提案方式を用いない場合においても、空間的合成手法によって、高い精度でパケット廃棄率を推定できることがわかった。特に、TCP スループットの推定にとって重要となる、およそ 0.1%以上の区間における計測精度が高いため、特に、大きなデータを送受信するアプリケーションにとっては有用であると考えられる。さらに、提案したデータ処理手法を適用することによって、計測精度を最大で 36% 改善できることがわかった。

今後の課題として、提案した統計処理手法の計算量と計測精度の関係の評価が挙げられる。また、異なるネットワーク環境における性能評価も挙げられる。さらに、計測結果の空間的合成手法を用いて、アプリケーションによってより重要となる性能指標である、TCP スループット及び利用可能帯域の推定精度の評価も重要であると考えられる。

謝辞

本報告を作成するにあたり、御多忙中にも関わらず、時間を割いていただき、様々な御指導、御教授を頂きました中野博隆教授、村田正幸教授に深く感謝いたします。また、本報告において終始的確かつ丁寧な御指導を頂きました長谷川剛准教授には、心よりお礼を申し上げます。最後に、日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂きました中野研究室の皆様にも心よりお礼申し上げます。

参考文献

- [1] “Skype web page.” available at <http://www.skype.com/>.
- [2] “Bittorrent web page.” available at <http://www.bittorrent.com/>.
- [3] “Veoh web page.” available at <http://www.veoh.com/>.
- [4] K.Czajkowski, S.Fitzgerald, I.Foster, C.Kesselman, “Grid information services for distributed resource sharing,” in *Proceedings of the tenth IEEE International Symposium on High-Performance Distributed Computing (HPDC-10)*, Aug. 2001.
- [5] B.Gleeson, A.Lin, J.Heinanen, G.Armitage, and A.Malis, “A framework for ip based virtual private networks,” *RFC 2764*, Feb. 2000.
- [6] Z.Duan, Z.-L.Zhang, and Y.T.Hou, “Proceedings of ieee icnp,” in *Service overlay networks: SLAs, QoS, and bandwidth provisioning*, Nov. 2002.
- [7] 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.
- [8] A.Nakao, L.Peterson, and A.Baver, “Scalable routing overlay networks,” *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 40, pp. 49–61, 2006.
- [9] S.Banerjee, B.Bhattacharjee and C.Kommareddy, “Scalable application layer multicast,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2002*, pp. 205–220, Aug. 2002.
- [10] B.Zhang, S.Jamin and L.Zhang, “Host multicast: A framework for delivering multicast to end users,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2002*, pp. 1366–1375, June 2002.
- [11] T.S.E.Ng and H.Zhang, “Predict internet network distance with coordinates-based approaches,” in *Proceedings of INFOCOM 2002*, June 2002.
- [12] S.Ratnasamy and et al., “Topologically-aware overlay construction and server selection,” in *Proceedings of INFOCOM 2002*, June 2002.

- [13] P.Francis, S.Jamin, C.Jin, Y.Jin, D.Raz and L.Zhang, “Idmaps: A global internet host distance estimation service,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 9, pp. 525–540, Oct. 2001.
- [14] Y.Chen, K.H.Lim, R.H.Katz and C.Overton, “On the stability of network distance estimation,” *SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol. 30, pp. 21–30, Sept. 2002.
- [15] G.Hasegawa and M.Murata, “Scalable and density-aware measurement strategies for overlay networks,” in *Proceedings of ICIMP 2009*, May 2009.
- [16] 森弘樹, 長谷川剛, 村田正幸, “オーバ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**, vol. 108, pp. 53–58, Mar. 2009.
- [17] 長谷川剛, 村田正幸, “オーバ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, pp. 1–6, May 2010.
- [18] 正原竜太, 長谷川剛, 村田正幸, “オーバレイネットワークにおける計測数削減手法の性能評価,” **電子情報通信学会技術研究報告**, vol. 110, pp. 217–222, Mar. 2011.
- [19] “Planetlab web page.” available at <http://www.planet-lab.org/>.
- [20] 樋口淳一, 吉川隆士, “耐障害型オーバ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.
- [21] S.Burke, “Missing values, outliers, robust statistics & nonparametric methods,” *LC-GC Europe Online Supplement, Statistics & Data Analysis*, vol. 2, pp. 19–24, Jan. 2001.