

過去に観測された品質からの オーバーレイリンク品質の推定手法

柴田直樹^{†1} 安本慶一^{‡2} 森将豪^{†1}

インターネット上でオーバーレイネットワークの最適化などの目的で、帯域、レイテンシからなる経路の品質を知ることは有用である。このような品質を測定するために、パケットを実際に送信する方法が用いられてきた。しかし、このような方法は、既存のアプリケーションの通信品質に影響を与える可能性があり、通信を行う両端ノードで、計測のためにプログラムを動作させる必要がある。また、高い精度で測定するためには大量のパケットを使用した通信が必要である。本論文では、新たに測定を行うことなく、過去に測定した経路の品質より、経路の現在の品質を推定する手法を提案する。これにより、実行中のアプリケーションの通信に影響を与えることなく、高速にオーバーレイネットワークの最適化等を行うことができる。また、本稿では、Planetlab 上でのインターネットを用いた、提案手法の測定精度の評価結果について報告する。

Estimating Overlay Link Quality from Previously Observed Link Qualities

NAOKI SHIBATA,^{†1} KEIICHI YASUMOTO^{‡2}
and MASAOKI MORI^{†1}

In order to optimize overlay networks on the Internet, it is useful to estimate link qualities for each overlay link. Existing measurement tools for link qualities send probe packets from end to end, but they need measurement software to be executed on both of the end nodes. Besides, these tools send many probe packets to measure the quality accurately, and thus they can disrupt other communication. In this paper, we propose a technique for estimating link qualities from previously observed link qualities. Since our technique does not require sending probe packets, we can quickly estimate qualities for many links without disrupting other communication or wasting processing time on many nodes. We also show some results of experiments on PlanetLab for measurement accuracy by the proposed method.

1. はじめに

P2P オーバレイネットワークは、Skype などのサービスで広く利用され、インターネット上のアプリケーションを実現する上で重要な技術となっている。効率の良い P2P オーバレイネットワークを構築するためには、インターネット上の各ピア間で、帯域、レイテンシ、パケットロス率などの通信品質を考慮した上で使用する経路を決定することが望ましい。また、経路の通信品質を簡易に知る方法があれば、サーバクライアントモデルのアプリケーションにおいて、あるクライアントからのリクエストを処理するための最適なサーバを選択する等、様々な用途に利用することが可能である。経路の品質を知るためには、経路の一端からもう一端までパケットを実際に送信することで、測定を行う方法が一般的に用いられる。Pathload¹⁾ は、定期的に分られるパケット列が、利用可能な帯域を超えて送られたときに、到着するまでの遅延が上昇傾向を示す性質を利用して、経路の帯域を計測する。また、Abing²⁾ は、packet pair dispersion technique に基づいたツールであり、連続して送信される 2 つのパケットの到着時間の差を用いて経路のボトルネック部分の帯域を測定する。このような方式では、測定を行う両端のノードで計測のためのプログラムを動作させ、ネットワーク上に実際にパケットを伝搬させる必要がある。しかし、このためのトラフィックは実行中の他のアプリケーションの通信に影響を与える。また、送信するパケットの量が少ないと精度が低く、測定の精度を改善するためには、多くのパケットを送信する必要がある。したがって、精度の良い測定にはある程度の時間が必要となる。P2P オーバレイネットワークを構成する全てのノードペア間で経路の品質を知ることができれば、ネットワークの最適化に非常に有用であるが、明らかに経路の数はノード数の 2 乗に比例するので、既存の帯域測定ツール等を利用して、これらの経路全ての品質を得るのはノード数の増加に従って困難になる。

インターネット上のトラフィックは、突発的に変化し、輻輳が発生することもあるが、経験上、大部分の経路においてはほぼ常に帯域に余裕があり、また経路の品質はそれほど頻繁に急激に変化することはない。人々がインターネットを利用する時間帯は、現地時間の平日の昼間が多く、したがって輻輳が発生する時間帯と、輻輳の発生していない時間帯の経路の

^{†1} 滋賀大学経済学部情報管理学科

Faculty of Economics, Shiga University

^{‡2} 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科

Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

品質は、定期的に経路の品質を観測することで予測できると考えられる。これらの仮定が正しい場合、過去に観測した経路の品質情報を利用して、輻輳の有無およびリンクの品質を推測することが可能である。本稿では、まずこれらの仮説がどの程度正しいか、Planetlab上で実際に経路品質の推移を観測して調査する。また、過去に計測した経路の品質情報より、未来の経路の品質を予測する、教師あり学習に基づいた手法を提案する。予測にあたり、末端ノードの地理的位置を考慮する。品質の予測を行おうとしている経路に、輻輳が発生している場合は、リンクの品質は急激に変動すると考えられ、このような場合にもリンク品質の推定は困難になると考えられる。

以降、2章で関連研究について述べ、3章では、過去の経路品質の観測結果から未来の経路品質をどの程度の正確さで推測できるかについて議論する。4章では、教師あり学習を利用して未来の経路品質を推測する手法について述べる。5章では、Planetlab上での評価実験とその結果について述べる。6章でまとめを述べる。

2. 関連研究

これまで、広域ネットワークにおいて、エンドノード間の帯域幅や遅延を計測・推定する手法が多数提案されている。正確な利用可能帯域幅推定は、エンドノード間のスループットの最適化、オーバーレイネットワークの経路制御、ピアツーピアでのファイルの配布に加え、トラフィックエンジニアリングや、キャパシティプランニングのため重要である。本章では、主にエンド間パスの利用可能帯域幅に関して、測定方法、予測方法に分け、以降で説明する。

2.1 帯域幅測定方法

エンド間パスに対する帯域幅のメトリックには、容量 (capacity, 可能な最大帯域幅)、利用可能な帯域幅 (available bandwidth, 最大の未使用帯域幅)、TCP スループットおよびバルク転送容量 (TCP throughput/bulk transfer capacity, 達成可能な最大スループット) の3種類があり、計測方法として、大まかに、(1) Variable Packet Size (VPS) Proving, (2) Packet Pair/Train Dispersion (PPTD), (3) Self-Loading Periodic Streams (SLoPS), (4) Trains of Packet Pairs (TOPP) の4種類が存在する³⁾。(1) VPS Proving は、ソースノードから目的のリンクまでのRTTを様々なサイズのパケットに対し計測することで、各サイズの serialization delay を計算し、リンク容量を推定する方法である。(2) PPTD は、エンド間パスの容量を計測する手法であり、ソースノードは同じサイズのパケットのペアまたは列 (train) を連続して受信ノードに送信し、受信ノードにおけるそれらパケットの受信時刻の開き (dispersion) から、パスを構成するリンク中の最大の seriarization delay を算

出し、最小リンク容量 (すなわち、エンド間パスの容量) を求める。(3) SLoPS は、エンド間間の利用可能な帯域幅を求める方法であり、ソースノードは K 個の同じサイズのパケットを受信ノードに向け伝送レート R で送信し、受信ノードにおいて各パケットの遅延時間の変動を観測することで、 R が利用可能帯域幅 A より大きいかどうかを判定する。測定結果をもとに、 R を増減させ、2分探索の要領で、 A の値を求める。(4) TOPP は、パケットのペアを多数指定した伝送レートで送信することで、エンド間パスの容量と利用可能帯域幅を同時に計測する手法である。TOPP では、SLoPS と違い、伝送レートを線形に徐々に上げて行き、到着遅延を観測することで、利用可能帯域幅を推定する。

リンク容量測定ツールとして、Pathchar, Clink, Pchar が、エンド間パス容量測定ツールとして、Bprobe, Nettimer, Pathrate, Sprobe が実装・公開されている。また、利用可能帯域幅測定ツールとして、Cprobe, Pathload, IGI, pathChirp が実装されている。また、TCP スループットの測定ツールとして、Treno, Cap, TTCP, NetPerf, Iperf が提案されている。文献4) では、高速ネットワークのテストベッドにおいて、abing, pathchirp, pathload, Spruce, Iperf の性能を比較し、pathload と pathchirp が最も高い性能を示すことが確認されている。

上記のツールは、平均の利用可能帯域幅を計測するものがほとんどであり、帯域幅の変動を考慮していない。そこで、文献6) は、利用可能帯域幅の変動を計測する方法とツール Pathvar を提案している。

また、計測用トラフィックを過剰に発生させることなく、帯域幅を推定することを目的に、文献5) では、最小容量リンクを飽和 (congested) させることなく、容量および利用可能帯域幅を求める方法を提案している。

これら、既存の帯域幅測定手法・ツールは、主に probing パケットを送信ノード・受信ノード間で実際に交換することで帯域幅を測定する。しかし、これらは帯域幅をある程度正確に計測できる点で有用であるが、計測用トラフィックを多少なりとも発生させる (特に、SLoPS と TOPP では、最小容量リンクを一時的に飽和 (congested) させる)。そのため、数万~数百万ノード以上のピアツーピアネットワークにおいてこれらの手法によりエンド間パスの帯域幅を測定する際には、計測にかかるトラフィックが本来のアプリケーションの性能に与える影響は無視できなくなる。

2.2 帯域幅予測方法

ネットワークのトラフィックを予測するためのモデル (network traffic prediction model) が提案されている。ネットワークでは、self-similarity と呼ぶ、長い時間間隔で現れる相

互類似的なトラフィックパターンと、短い時間間隔で現れる multi-fractal と呼ばれるトラフィックパターンが存在することが知られている。文献 8) では、過去に計測したトラフィックの情報から、将来の複数時間ステップにおけるトラフィックを一度に予測できる方法を提案している。また、文献 7) は、文献 8) を進歩させた、より正確なトラフィック予測が可能な ARIMA/GARCH モデルを提案している。このモデルでは、ネットワークトラフィックにおける SRD (short-range dependence) と LRD (long-range dependence) をとらえ、self-similarity と multi-fractal の両方を観測可能としている。実際のトラフィックとの比較実験により、将来のトラフィックがある程度正確に予測できることが示されている。

これらのモデルは、過去の詳細な計測結果から将来のトラフィックを予測するものであり、エンド間パスの容量を別に計測しておくことで、利用可能帯域幅の予測にも使用できる。しかしながら、詳細な計測結果を事前に必要とする点から、利用可能帯域幅を低コストに推定する目的には適していない。

2.3 提案手法の新規性

トラフィック予測モデルは、トラフィックの self-similarity や multi-fractal などの性質を利用しており、これらの性質を異なる類似したパスに適用することで、少ない計測結果でもある程度正確に利用可能帯域幅を推定できる可能性がある。

本論文では、パス間の類似性を考慮し、類似したパスは似たトラフィックの傾向を示すと想定した、利用可能帯域幅推定法を提案する。提案手法のような、送信ノード・受信ノードのペアに対する事前計測をほとんど必要としない帯域幅推定法はこれまで存在しなかった。また、提案手法を実装し、PlanetLab での実測実験により、提案手法の性能を評価する。

3. 予備実験と考察

この章では時間の経過に伴うリンク品質の変化および、経路の類似度とリンク品質の類似度に関する、予備実験の結果について述べ、これについて考察する。インターネット上を流れるトラフィックの量は常に変化しており、曜日や季節等によっても変動があると考えられる。実際に、時間の経過に伴い、リンク品質にどの程度の変化があるのか、PlanetLab での観測に基づいて、議論を行う。以降、実験の設定、経路の類似度の定義、実験結果について順に述べる。

PlanetLab による観測結果

PlanetLab を用いて、2011 年 1 月 20 日から、7 日間にわたり、使用可能帯域幅とレイテンシを一時間毎に観測した。PlanetLab 上で約 500 個のノード間でランダムにペアを作り、

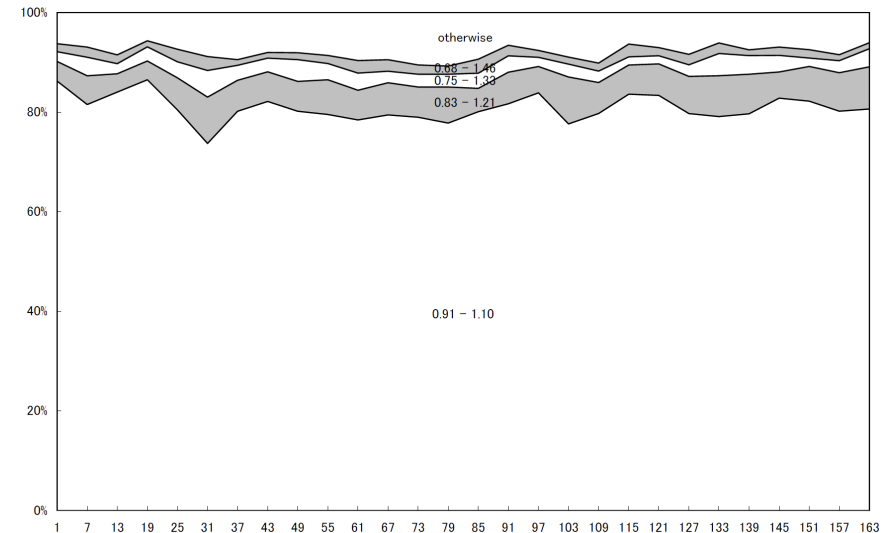


図 1 ping による計測値と、それ以降 1 時間毎の計測値の比の割合 (100%積み上げグラフ)、横軸は経過時間

これらの間の経路において、pathload により測定した利用可能帯域と ping を用いたレイテンシの計測を行った。

各経路に対する、「各時間のレイテンシと帯域の観測値」と「最初に観測した値」の比の、全ての経路に占める割合を 100%積み上げグラフで表したものを図 1 と図 2 にそれぞれ示す。図の一番下の系列が最初の観測値の 0.91 倍から 1.1 倍の範囲の値が観測された経路の割合、下から 2 番目の系列が 0.83 倍から 1.21 倍の範囲の値が観測された経路の割合である。

図 1 より、約 80%の経路に対して、経路のレイテンシの変化は 10%以内に収まり、また約一週間の間、時間が経過してもこの割合はそれほど変化しなかったことが分かる。また、図 2 より、計測より 20 時間の間、およそ 70%の経路に対して、帯域幅の変化は 10%以内であり、また、それ以降約一週間の間、およそ半分の経路に対して帯域幅の変化が 10%以内であったことが分かる。また、ping と pathload により計測値の双方に関して、一日を通しての周期的な値の変化および一週間を通しての周期的な変化は明確には認められなかった。

3.1 経路の類似度とリンク品質の類似度

オーバーレイネットワークの最適化のために利用するには、今までにリンク品質の観測の行われたことがない、未知の経路に対してリンク品質の推定ができれば便利である。ここで

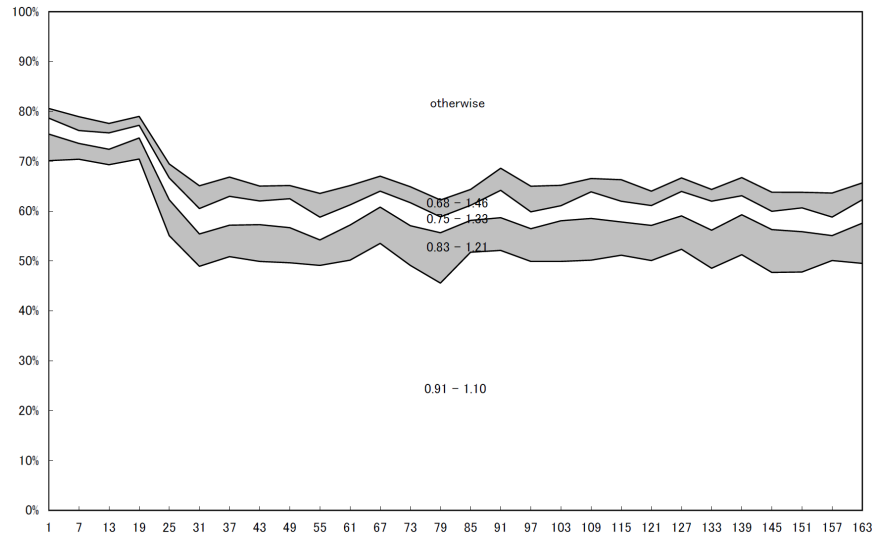


図2 pathload による計測値と、それ以降1時間毎の計測値の比の割合(100%積み上げグラフ), 横軸は経過時間

は、2つの異なるオーバーレイリンク間の類似度を、両端ノードの地理的位置に基づいて定義する。IP アドレスから、そのホストの地理的位置を求めるためのデータベースが公開されており、両端ノードの地理的位置から類似度を求める手法は、実用上高速・簡便に使用することができる。以下、定義した類似度とリンク品質の関係について PlanetLab 上での観測結果に基づいて議論を行う。

経路類似度

ここでは、経路同士の類似度として、経路の両端ノードの地理的距離の和を、2つの経路間の距離関数として定義する。つまり、ノード v_0 とノード v_1 を結ぶオーバーレイリンクと、ノード v_2 とノード v_3 を結ぶオーバーレイリンクがあるとき、これらのリンク間の距離は、 $\text{Min}(\text{「ノード } v_0 \text{ とノード } v_2 \text{ 間の地理的距離」} + \text{「ノード } v_1 \text{ とノード } v_3 \text{ 間の地理的距離」}), (\text{「ノード } v_0 \text{ とノード } v_3 \text{ 間の地理的距離」} + \text{「ノード } v_1 \text{ とノード } v_2 \text{ 間の地理的距離」})$ となる。

PlanetLab で得られた値による結果

PlanetLab を使用して、3と同様に、約500個のノード間でランダムにペアを作り、これらのペア間で ping を用いた計測を行った結果に対し、上で定義した類似度とレイテンシの

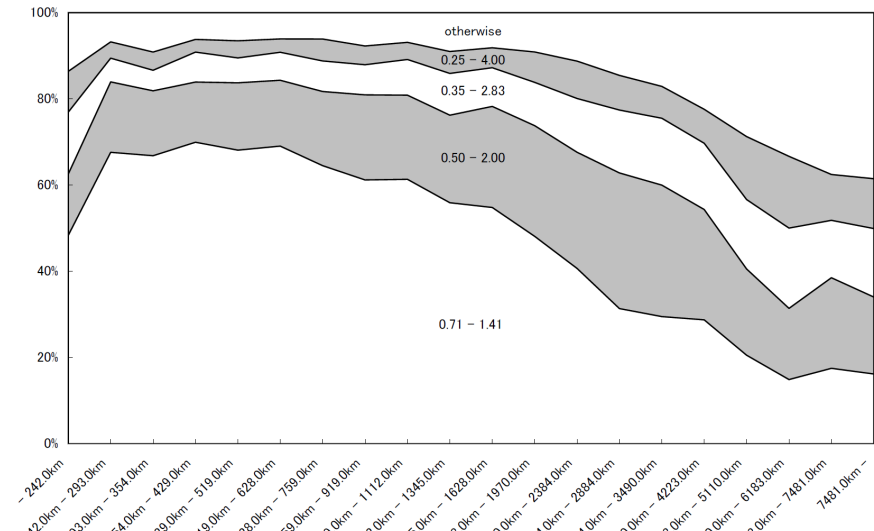


図3 経路の地理的類似度 vs ping による計測値の1時間後の変動幅の割合

近さについて調べた。図3と4に、最初に経路のレイテンシを計測してから1時間および6日間経った後の、リンク類似度と、レイテンシの変動幅の関係を、図示する。この2つの図はほとんど同じであり、時間の経過に伴うレイテンシの変動幅の変化はほとんど見られないことが分かる。また、類似度が高いほど変動幅が小さいことが分かり、経路の両端の距離の和が600kmまでであれば、80%の経路について、変動幅が50%から200%までに収まることが分かる。

また、pathload による帯域の測定結果に関しても同様の実験を行ったが、経路の類似度と変動幅の関係は認められなかった。これは、帯域がバックボーンではなくラストワンホップにより制限されている場合が多いためであると推測される。

4. 提案手法

この章では、予備実験の結果を踏まえて、実際に経路の品質を推定する手法について述べる。提案手法では、P2P ネットワーク上の各ピアが観測したリンク品質を定期的に中央サーバに送信し、これらの過去の観測データから教師つき学習手法である Weighted k -nearest

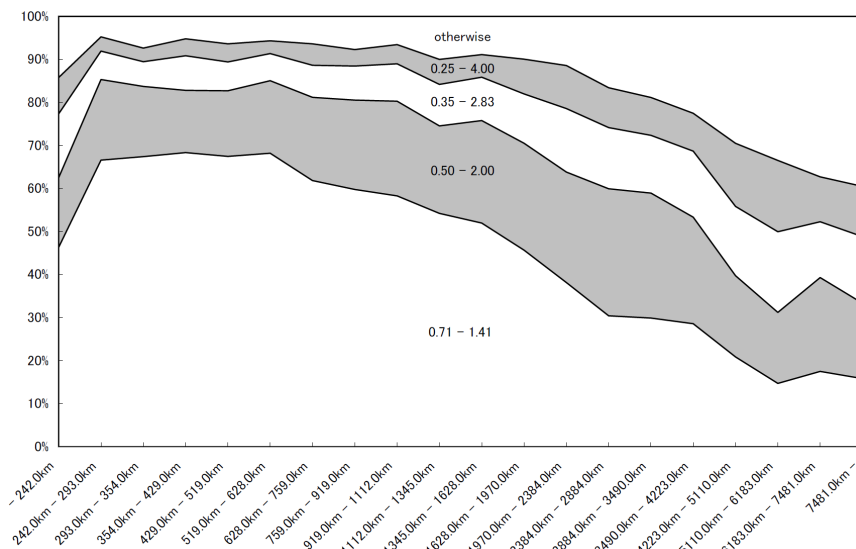


図 4 経路の地理的類似度 vs ping による計測値の 6 日後の変動幅の割合

neighbor algorithm (以下 WKNN 法) を用いて、あるリンクの現在の品質を推定する。

4.1 Weighted k -nearest neighbor algorithm

本手法で用いる教師あり学習手法である WKNN 法について述べる。WKNN 法では、学習データのインスタンスはオブジェクトと実数値の組で与えられ、オブジェクト (提案手法では、オブジェクトは経路) から実数値 (提案手法では経路の帯域またはレイテンシ) の関数を学習する。また、ユーザは、オブジェクト同士の距離を与える関数と、加重平均の重みを求めるための関数を与える。学習は、単純に全教師データをメモリに格納することにより行われる。推定フェーズでは、ある値に対応する実数値を推定する。教師データの中から、 k 個の最近傍のインスタンスを選択し、これらから、加重平均の重みを求めるための関数により計算される重みを用いて、加重平均を求めることで、推定値を得る。

4.2 提案手法の詳細

提案手法では、多数のユーザが P2P ビデオ配信等の、ピア間で連続して通信を行うアプリケーションを、数ヶ月程度に渡って使用する場合を想定する。本手法では、P2P ネットワーク上のシステムは、1つの中央サーバと、多数のピアからなるとし、各ピアでは、通信

を行っているピア間の通信品質を観測することが可能であることを仮定する。観測した通信品質は、中央サーバ上のデータベースに定期的に送信する。本論文では、集中制御による方式について述べるが、DHT などを用いて、分散実装することも可能である。中央サーバに集められたデータを元に、あるピアにおいて、以前経路品質が観測された経路と同じ、または似た経路の通信品質を推定する必要が生じた場合に、WKNN 法を用いて経路の品質を推定する。ただし、3.1 節で述べたように、pathload による帯域の測定結果に関しては、上で定義した経路の類似度と、観測される帯域の変動幅の関係は認められなかった。したがって、類似する経路から帯域を推定することはできない。本稿では、経路の帯域の推定に関しては、過去に全く同じ経路で計測した値を元に推定を行うとする。推定に伴う通信として、ピアは中央サーバに品質を推定する経路をクエリメッセージとして送信し、その後中央サーバで推定を行い、推定結果をピアに返答する。学習及び推定は、中央サーバで行う。WKNN 法においては、学習は単に全教師データをメモリに格納することにより行われるため、時間の経過とともに、このデータを格納するために必要なメモリが増大する。必要なメモリ量を限定するため、データ量が一定値を超えた場合、古いものから順に消去する。

ピアが中央サーバに品質情報を登録するまたは品質の推定結果を問い合わせる際にやりとりされるメッセージは、観測した経路と、品質からなり、200 バイト以下で済む。また、品質は、20 バイト以下で表現可能であり、このトラフィックは無視できる。中央サーバは IP アドレスから、そのノードの存在する地理的位置の緯度・経度を得るためのテーブルを持つとする。

本手法は、学習フェーズと、推定フェーズからなる。以下、これら二つのフェーズの詳細について解説する。

学習フェーズ

システムに属する各ノードは、提案手法を利用するアプリケーション (例えばビデオ配信) の機能を実現するために、頻繁に他のノードと通信を行っているとする。この際、経路の品質を観測できると仮定する。各ノードは、定められた期間ごとに、観測された経路の品質を中央サーバに送信する。このメッセージは、経路の両端ノードの IP アドレスと、観測された帯域、レイテンシからなる。

中央サーバでは、ピアから観測データを受信した場合、メモリにそのデータ、すなわち、経路の両端ノードと帯域、レイテンシの組を格納する。格納したデータの総量が一定値を超えている場合、最も昔に受信したデータを削除する。

推定フェーズ

各ピアは、ある経路の品質を推定する必要が生じた段階で、中央サーバにその経路データを含むクエリメッセージを送信する。中央サーバは、このクエリに含まれた経路の品質を推定する。設定された距離関数を用い、学習フェーズに蓄積された経路から、最近傍の k インスタンスを選択し、設定された、加重平均の重みを求めるための関数により計算される重みを用いて、加重平均を求めることで、クエリメッセージに含まれる経路の帯域とレイテンシをそれぞれ推定する。中央サーバはこれらの帯域、レイテンシをクエリメッセージを送信したピアに返答する。

以下に、推定の例を挙げる。あるピアが、ノード n_0 とノード n_1 間の経路 r_0 に関するクエリを中央サーバに送信したとする。中央サーバは、蓄積されたデータから、あらかじめ定められた距離関数を用い、ノード n_0 とノード n_1 間の経路に最も近い k 個の経路を選択する。ここでは、 $k = 2$ とし、経路 r_1 と r_2 が選択されたとする。サーバは次に、重みを計算する関数を用いて、 r_1 と r_2 の重みを計算する。ここでは、それぞれ 1 と 2 であったとする。また、 r_1 と r_2 で過去に計測された値がそれぞれ 3 と 4 であったとする。中央サーバは、これらの値の重み付き平均値である $(1 \times 3 + 2 \times 4) / (3 + 4) = 1.57$ をリプライとして返す。

距離関数と重み関数

3.1 節では、観測された時間が同じ 2 つのリンクの類似度を定義したが、本手法で利用するためには、異なった時間に観測された 2 つのリンクの類似度を定義する必要がある。リンクのレイテンシに関しては、3.1 節で述べたように、時間の経過に伴うレイテンシの変動幅の変化はほとんどないため、時間の経過は無視して、異なった時間に観測された値に対して上で定義したリンク類似度を距離関数として用いる。また、リンクの帯域に関しては、経路の類似度と観測される帯域の変動幅の関係が認められなかった（言い換えれば、異なる経路に対し、帯域の類似性は認められなかった）ため、観測された時刻から経過した時間を距離関数として用いる。

帯域の重み関数に関しては、3 章での測定結果において、帯域の変動幅が最初に計測した値の 0.91 倍から 1.1 倍に収まる経路の割合より、20 時間以内であれば 0.7、それ以降は 0.5 とする。レイテンシの重み関数については、同じく 3 での測定結果より、変動幅が 0.71 倍から 1.41 倍に収まる経路の割合より、 $0.7 - \frac{0.3}{5000} \cdot geo(v_0, v_1, v_2, v_3)$ とする。

5. 評価

この章では、提案手法の推定精度について評価を行う。提案手法の原理より、過去に帯域

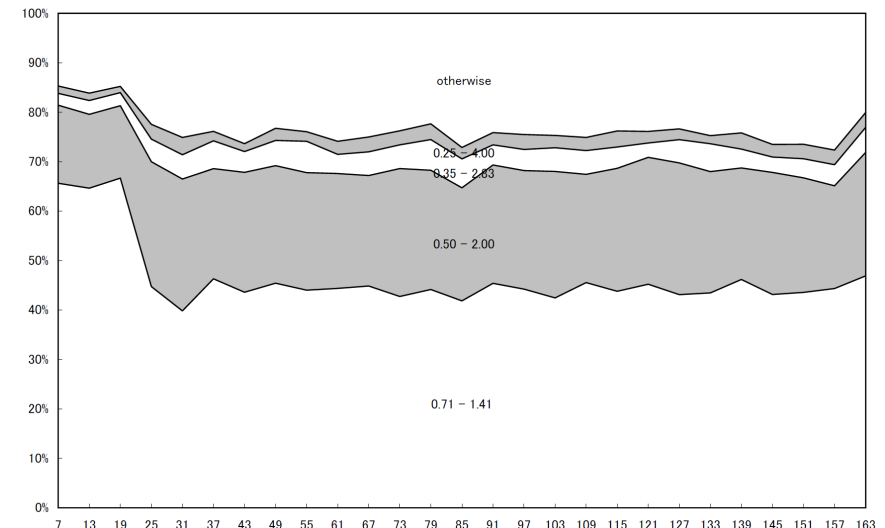


図 5 時間の経過に伴う、帯域の予測値と実際の値の比の割合の変化 (100%積み上げグラフ), $k=1$

を観測した時間から経過するほど、またレイテンシを観測した経路から地理的に離れるほど推定精度が悪化する。帯域に関しては時間経過と推定精度の関係について、レイテンシに関しては経路同士の距離と推定精度の関係について調べる。

5.1 帯域に関する評価結果

上で述べたとおり、帯域に関しては、いかに地理的距離の近い経路であっても、別の経路で過去に測定された値との関係は認められなかった。ここでは、ある経路で 1 時間おきに k 回測定した値および 1 日おきに k 回測定した値を用いて、最後に測定を行ってから経過した時間を変化させたときの推定精度について、 k を変化させて調べた。結果を図 5, 6, 7 に示す。

図 5, 6, 7 より、予備実験により予想する範囲内で帯域の推定を行うことができた。 k の増加に伴う推定精度の向上は認められなかった。

5.2 レイテンシに関する評価結果

ここでは、ある時刻における k 個の異なる経路に対するレイテンシの測定結果からの、提案手法による 6 日後のレイテンシの推定精度を調べる。 k 個の経路の距離関数の平均値を変化させたときに、推定精度がどのように変化するか、 k を変化させて調べた。結果を図 8, 9,

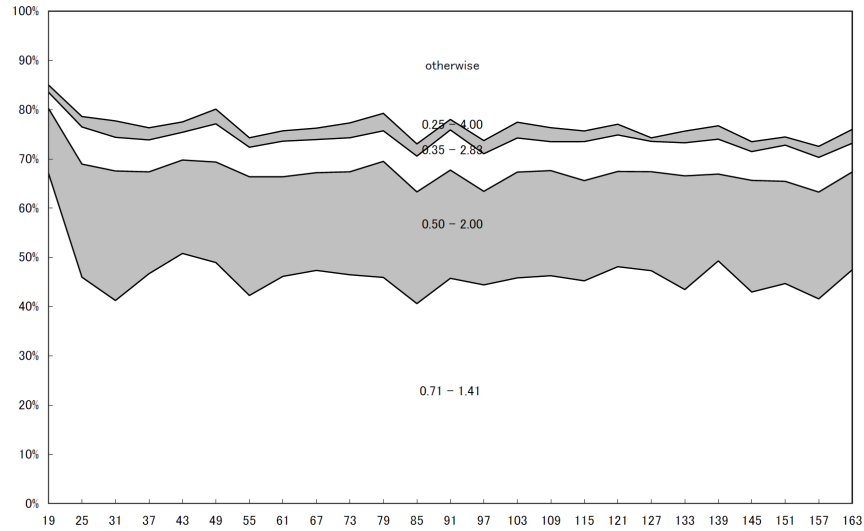


図 6 時間の経過に伴う、帯域の予測値と実際の値の比の割合の変化 (100%積み上げグラフ), $k=3$

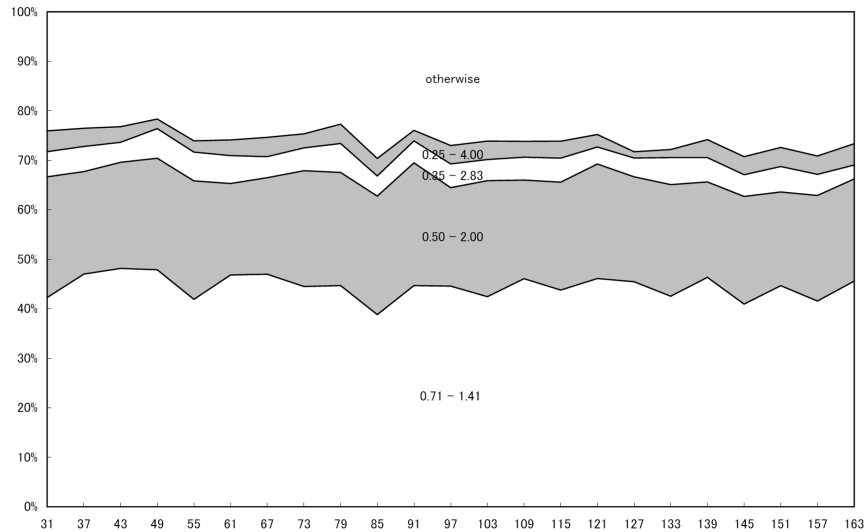


図 7 時間の経過に伴う、帯域の予測値と実際の値の比の割合の変化 (100%積み上げグラフ), $k=5$

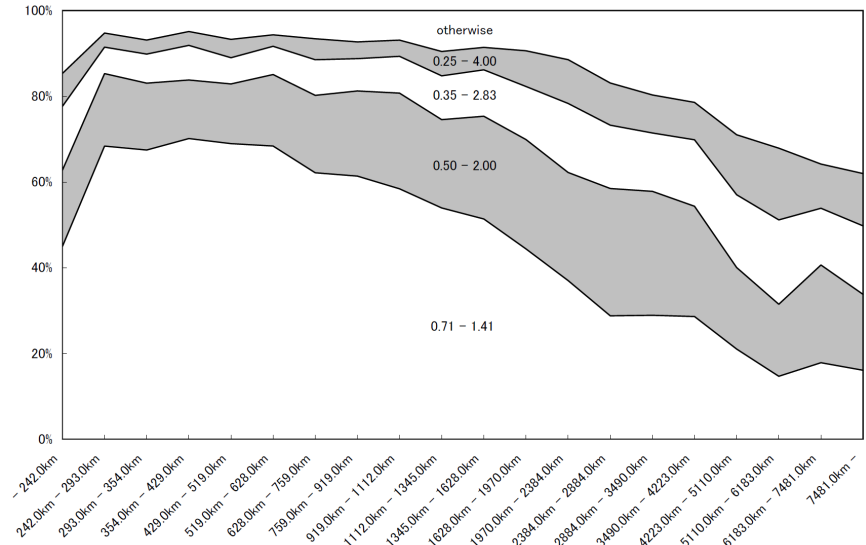


図 8 レイテンシの予測値と実際の値の比の割合 (100%積み上げグラフ), $k=1$

10 に示す。

図 8, 9, 10 より, 良好な推定が可能であったことが分かる。 k が増加するに伴い, 推定精度が向上していることが分かる。

6. ま と め

WKNN 法により, 過去に観測された帯域およびレイテンシから, 現在のこれらの品質値を推定する手法について述べた。レイテンシに関しては, 良好な推定精度を得ることができた。帯域に関しては, 単純に, 推定対象の経路において最も最近計測された帯域を用いるのと変わらないという結果を得た。

今後, 距離関数などを工夫することによって, さらによい推定精度が得られるか検討したい。

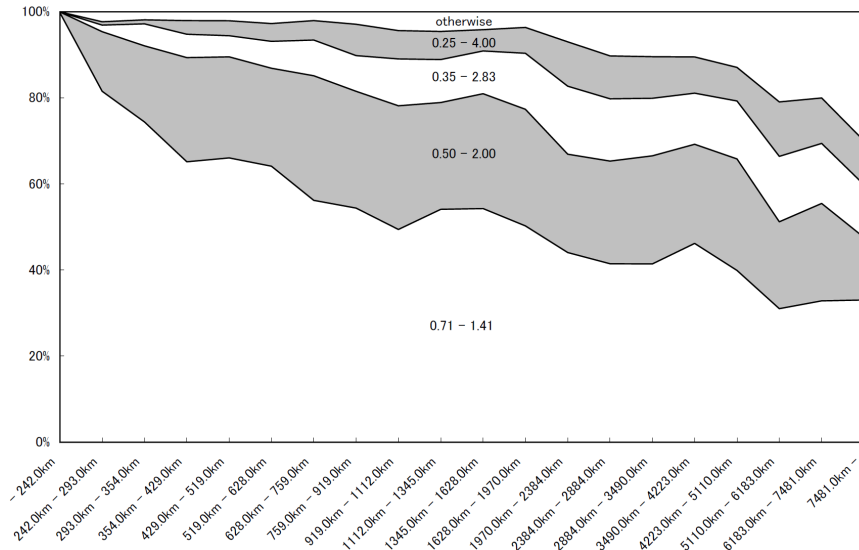


図 9 レイテンシの予測値と実際の値の比の割合 (100%積み上げグラフ), k=2

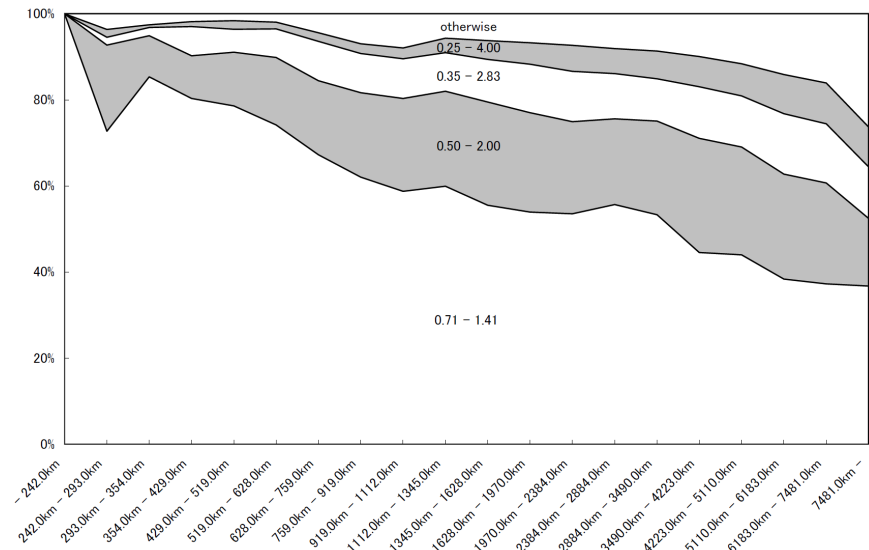


図 10 レイテンシの予測値と実際の値の比の割合 (100%積み上げグラフ), k=3

参考文献

- 1) Jain, M. and Dovrolis, C. : “End-to-end available bandwidth: measurement methodology, dynamics, and relation with TCP throughput,” IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 11, Issue 4, pp. 537–549, 2003.
- 2) Jiri Navratil and R. Les Cottrell : “ABwE:A Practical Approach to Available Bandwidth Estimation,” 2003.
- 3) R. S. Prasad and M. Murray and C. Dovrolis and K. Claffy : “Bandwidth Estimation: Metrics, Measurement Techniques, and Tools,” IEEE Network, vol. 17, pp.27–35, 2003.
- 4) Alok Shriram and Margaret Murray and Young Hyun and Nevil Brownlee and Andre Broido and Marina Fomenkov and Kc Claffy : “Comparison of Public End-to-End Bandwidth Estimation Tools on High-Speed Links,” Proc. of PAM ’05, pp.306–320, 2005.
- 5) Seong-ryong Kang and Xiliang Liu and Min Dai and Dmitri Loguinov and Dmitri Loguinov : “Packet-Pair Bandwidth Estimation: Stochastic Analysis Of a Single Congested Node,” Proc. of IEEE ICNP 2004, pp.316–325, 2004.

- 6) Manish Jain and Constantinos Dovrolis : “End-to-end Estimation of the Available Bandwidth Variation Range,” Proc. of ACM SIGMETRICS, 2005.
- 7) Bo Zhou and Dan He and Zhili Sun and Wee Hock Ng : “Network Traffic Modeling and Prediction with ARIMA/GARCH.”
- 8) Aimin Sang and San-qi Li : “A Predictability Analysis of Network Traffic,” Proc. of IEEE INFOCOM 2000, pp.342–351, 2000.