

## 複数パス利用環境におけるエンドツーエンド片方向特性推定方式

澤井新† 小川清\* 飯田登\*\* 渡辺尚††

†静岡大学大学院情報学研究所 \*名古屋市工業研究所 \*\*浜松大学 ††静岡大学情報学部

有線，無線インフラの普及により，1つの端末が複数の通信手段を同時に利用する環境が整いつつある．そのような環境では，複数の通信経路の中から，より適するエンドツーエンド片方向経路を選択可能である．最近ではエンドツーエンドでの片方向特性に敏感なアプリケーションが多く，適切な経路選択のためには，パスの片方向特性を考慮することが必要である．そのため，経路選択のための尺度のひとつとして片方向遅延差に注目する．片方向遅延差とは，2つの片方向遅延の差分であり，片方向遅延を比較できる．我々は，片方向遅延差を推定する方式を提案，実装し，エミュレーション環境において動作を確認した．さらに，実測実験により，実インターネット環境に適用させたのち，提案方式の評価を行った．その結果，経路選択において本方式が有効であることが確認できた．

### A study on measurement of one-way characteristics for end-to-end path selection

SAWAI Arata† OGAWA Kiyoshi\* IIDA Noboru\*\* WATANABE Takashi††

†Graduate School of Information,Shizuoka University \*Nagoya Municipal Industrial Research Institute

\*\*University of Hamamatsu ††Faculty of Information,Shizuoka University

There are many places where users can access to the Internet with wired or wireless links and it is soon able to use several links at the same time. In the situation, users can select better one-way path by considering its one-way characteristics. This paper proposes a measurement tool for inferring differences of one-way delay, which can be used to select the better path. We have developed a prototype of the tool and have evaluated the tool in Internet environment.

## 1 はじめに

近年，計算機の小型化，軽量化と通信インフラの普及が進んでいる．ADSL回線などの有線インフラの利用に加え，PHS，携帯電話によるインターネットへの接続や，ノートパソコン，PDA等の小型軽量端末と無線インフラを組み合わせたモバイル環境を利用するユーザも多い．今後も，第三代携帯電話，無線LANによるホットスポットサービス等の普及により，同時に複数の通信手段を利用可能な環境が多くなる．そのような環境では，複数の通信経路の中から，ユーザにとってより適するエンドツーエンドの経路を選択することが可能である．現在，ユーザはエンドツーエンド経路の選択の尺度として，往復パスに関する特性を利用していることが多い．しかし，使用するアプリケーションによっては，どちらか片方向のパスの特性に大きく影響を受ける．また，往路と復路が異なる経路を通ることにより，性能を向上させるような実装も考えられる．よって，より適切な経路選択のためには，パスの片方向特性を考慮することが重要である．われわれは，片方向ごとに経路を選択するために，片方向遅延差に注目し，その測定方式について研究を行った．

以下，本稿では，第2章で，既存の片方向遅延測定方式

を挙げ，第3章で，片方向遅延差推測方式を提案する．そして，第4章にて，実装した提案方式の動作確認と，精度の改善を行い，第5節で，片方向遅延差の測定と提案方式の評価を行う．最後に，第6節で，まとめと今後の課題について述べる．

## 2 既存の測定方式

以下に現在のインターネット環境において，片方向遅延を推定可能な方式のいくつか述べる．

### 2.1 往復 ping とタイムスタンプオプションの利用

この方式は，タイムスタンプオプションを指定したICMPエコー要求パケットとその応答を利用する．クライアントが，エコー要求を送信した時刻，応答を受信した時刻と，サーバで書き込まれたタイムスタンプにより，片方向遅延を計測する．片方向遅延を求めるためには，サーバとクライアント間の時刻同期がとれていること，および，サーバがタイムスタンプオプションに対応していることが必要である．遅延差を測るのであれば時刻同期は必要ない．

## 2.2 マルチキャストパケットの利用

MINC プロジェクトにより、マルチキャストパケットを用いて、木構造パスに沿ったエンドツーエンドの観測から内部リンクの特性を統計的に推定する方式の研究が行われている[1][2]。また、マルチキャストが普及していないため、複数のグループが、同様の推定原理をもとに、ユニキャストパケットを用いる方式を提案している[3]。いずれも、多数回の試行による統計的な推定を基にしている。

## 3 片方向遅延差推定方式

### 3.1 概要

我々は、本章において、片方向遅延差推測方式を提案する。本方式では、計測を行う送信端末（以下クライアント）が、1回の計測（以下1セット）ごとに複数のICMP エコー要求パケットを、ほぼ同時に送信先端末（以下サーバ。本稿では、計測パケットを返信するという点においてサーバと呼ぶ）に送信する。クライアント側で、送信するパケットの送信元アドレスを返信先のアドレスへ書き換えることにより、複数の往復パスを経由させる。クライアントが、送信パケットに送信時のタイムスタンプを書き込み、ICMP エコー応答パケットを受信した時刻とタイムスタンプの差をとり往復遅延を計測する。各往復パスを通過したパケットの往復遅延を用い片方向遅延差を推測する。

### 3.2 目的

研究の目的は、インターネット利用時、複数の経路の中から、より適した経路をユーザが選択可能にすることである。一般にユーザは接続リンクの帯域幅や往復遅延を考慮し、パス選択をすることが多いが、エンドツーエンドで、アプリケーションごとに、片方向ごとの経路が選択できることがより望ましい。そのために、本稿では、経路を選択するための尺度として片方向遅延差に注目し、片方向遅延差を測定するための測定方式を提案する。

### 3.3 想定環境

ユーザ端末が、無線有線は問わず、それぞれにIPアドレスの付加された複数の通信インタフェースを有している環境を想定する。例えば、PHSを使用してISP（Internet Service Provider）1のアクセスポイントに接続し、同時に、IEEE802.11bを使用してISP2に接続している環境である。帯域幅だけに注目し、IEEE802.11bを選択する場合があるが、それでは、ユーザから見て1つ目のリンクにおける1つの尺度しか評価していない。途中の経路で、帯域幅のボトルネックが存在したり、輻輳が生じている可能性もある。また、利用するアプリケーションによっては、遅延やパケットロス率などその他の要素がより重要になるだろう。

同じ通信方式を利用していても、接続ポイントが異なればエンドツーエンドの経路が異なるので経路選択の意義がある。例えば、2つのIEEE802.11bインタフェースにより異なるISPに接続している場合があげられる。このような例は、複数のサービス提供者が、電波範囲の重なる場所で、無線チャネルを重ならないようにし

てサービスを提供している時に起こりうる。

## 3.4 設計方針

本研究では、主に以下の点を考慮し、測定方式を設計している。

### 3.4.1 片方向遅延差

片方向の特性を表す尺度として、片方向遅延差を扱う。片方向遅延差とは、2つの片方向遅延の差分であり、経路の遅延の大小を決定することが可能である。片方向遅延自体を求めるためには、特別な機能がある測定対象サーバや代理サーバ等が必要となるため、片方向遅延はユーザにとって扱いにくい。本方式では、片方向遅延自体を求めることはしないで、片方向遅延差を推測する。片方向遅延差が求めれば、各パスを比較し、より遅延の小さい片方向パスを求めることができる。

### 3.4.2 即答性

測定方式には、即答性を求める。例えば、本測定方式の利用ケースとして、アプリケーションサーバへの最初のアクセス時に測定を行うことが考えられるが、測定自体に時間がかかりすぎるとサービスの低下につながる。許容範囲内の時間で経路選択の尺度を提示することを目指す。

また、[5]では、インターネット環境で、2つのpingの送信間隔を変更して送信し、往復遅延の相関関係について調査している。結果によると、最初のpingパケットの送信と2回目の送信との間隔の増加に伴い相関が低くなる。これは、ネットワークは常に状態が変化しており、長期間に渡って多数回測定した推測値は、測定時と推測値利用時との時間間隔の増加に伴い、利用時には有効性が低くなることを示している。そこで、推測値を利用する直前に行う即答性の高い測定を行うために、本方式は、測定を比較的短期間で行うものとする。

### 3.4.3 単体型測定

一般ユーザが、容易に利用可能な測定方式にするために、代理計測サーバを必要としないで、測定ツール単体で機能する方式をとる。その場合、ソースルーチングオプションを利用することにより、単体で機能することが可能だが、対応するルータは少数であるため利用しない。

### 3.4.4 サーバ機能

適応範囲を広くするために、サーバ側にIP層より上位の測定のための特別な機能を要求しない、また、サーバでの対応が少ないICMPタイムスタンプ応答も、本稿では利用しない。

## 3.5 片方向遅延差推定方式の動作と推測方法

### 3.5.1 往復パス $n \times n$ 経路の場合の動作と推測方法

往復パスが  $n \times n$  経路の場合とは、クライアントのインタフェースが  $n$  個存在し、サーバのインタフェースが1個の場合である。クライアントは各インタフェースに付加されたIPアドレスを送信元アドレスとしたICMPエコー要求パケット  $n$  個を、ほぼ同時に各インタフェー

スからサーバへ送信する。クライアントは ICMP エコー要求パケットのデータ部に、送信時の時刻を書き込み、受信時に受信した時刻とパケットのデータ部のタイムスタンプとの差を計算し、往復遅延を求める。推測は、得られた往復遅延同士を組み合わせた差分を計算することにより行う。送信パケットは1セットにつき、 $n \times n$ 個送信し、往路で  $n$  個、復路で  $n$  個の片方向遅延差を推定できる。これは、往復 ping とタイムスタンプオプションを利用した場合の効率と同じである。以下に、クライアントインタフェースが2個の場合を例にして動作と推測方法について述べる。

### 3.6 往復パス $2 \times 2$ 経路の場合の動作例

クライアントに IP アドレスの付加された通信インタフェースが2つあり、サーバに1つある場合の動作を述べる。クライアントは、インタフェース A (以下、IF\_A) とインタフェース B (以下 IF\_B) を有し、IF\_A には IP アドレス A (以下 Caddr\_A) が、IF\_B には IP アドレス B (以下 Caddr\_B) が付加されている。サーバは、IP アドレス Saddr\_A を有するものとする。

クライアント (図1のC) が2つ、サーバ (図1のS) が1つのインタフェースを有する場合、往路で2つの片方向パス、復路で2つの片方向パスが選択可能であり、往復パスでは4つのパスが存在することになる。

実際のインターネット上では、1つの片方向経路は常に同じ経路を通過するわけではない。IP ルーティングでは、ルータごとに送信先アドレスを参照して経路を決定するため、同じ送信先アドレスを指定したパケットが異なる経路を通過することがある。本稿での片方向パスは、始点が端末のインタフェース、終点が IP アドレスで決定されるものとする。

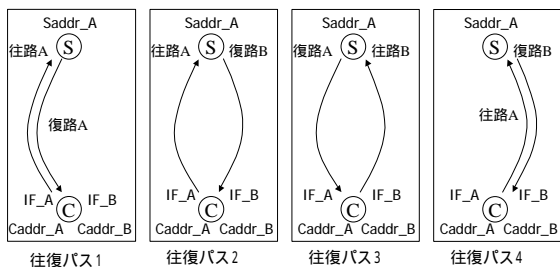


図1  $2 \times 2$  経路

1セットの測定で、4本の往復パスすべてに、ほぼ同時に計測パケットを送信する。クライアントは ICMP エコー要求パケットのデータ部に、送信時の時刻を書き込む。パス1を通過させるためには、送信先 IP アドレスを Saddr\_A、送信元アドレスを CaddrA に指定した ICMP エコー要求パケットを IF\_A から送信する。送信された ICMP エコー要求パケットは、往路 A を通過しサーバへ到着する。パケットを受信したサーバは、受信したパケットの送信元アドレスである CaddrA を送信先アドレスに、そして、自身の IP アドレスである Saddr\_A を送信元アドレスに指定し、ICMP エコー応答パケットを返信する。返信された ICMP エコー応答パケットは、復路 A を通過しクライアントの IF\_A に到着し、クライアントが受信する。パス4も同様にしてパ

ケットを通過させる。パス1とパス4での動作は ping コマンドを使用したときの動作と同様である。

パス2を通過させるためには、送信先 IP アドレスを Saddr\_A、送信元アドレスを CaddrB に指定した ICMP エコー要求パケットを IF\_A から送信する。送信された ICMP エコー要求パケットは、往路 A を通過しサーバへ到着する。パケットを受信したサーバは、受信したパケットの送信元アドレスである CaddrB を送信先アドレス、自身の IP アドレスである Saddr\_A を送信元アドレスに指定し、ICMP エコー応答パケットを返信する。返信された ICMP エコー応答パケットは、復路 B を通過しクライアントの IF\_B に到着し、クライアントが受信する。パス3も同様にしてパケットを通過させる。

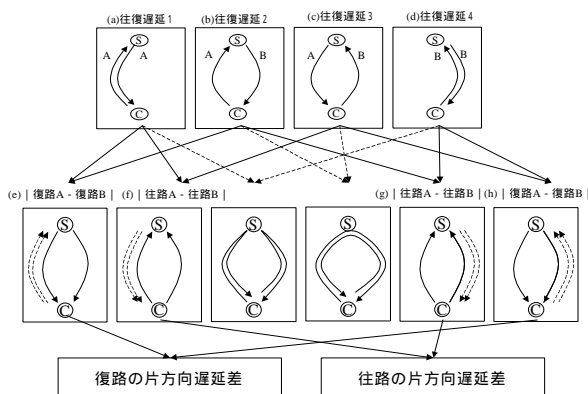


図2 片方向遅延差の推測

### 3.7 往復パス $2 \times 2$ 経路の場合の片方向遅延差推測

片方向遅延差は往復遅延の差をとることにより推測する。本節では、 $2 \times 2$ 本のパスが存在している場合を例にして、片方向遅延差の推測について述べる。図2の(a)から(d)は、各往復パスの往復遅延を表しているものとし、それぞれの往復遅延1から4と呼ぶ。

ほぼ同時に片方向パスを通過するパケットの遅延が同じであると仮定するならば、往復遅延1と往復遅延2の差分をとることにより、復路Aと復路Bの片方向遅延差を求めることができる(図2.(e))。同様に、往復遅延3と往復遅延4の差分をとることによっても、復路Aと復路Bの片方向遅延差を求めることができる(図2.(h))。その2つの片方向遅延差が通過した往路は、異なるパスである。以下、復路で経路Aを通る往路遅延差を往路遅延差A、復路でBを通る往路遅延差を往路遅延差Bと呼ぶ。

往路の片方向遅延差は、往復遅延1と往復遅延3、往復遅延2と往復遅延4の差により計算できる(図2.(f)、図2.(g))。復路で経路Aを通る往路遅延差を往路遅延差A、復路でBを通る往路遅延差を往路遅延差Bと呼ぶ。サーバによる ICMP エコー応答パケットの送信時刻は、ICMP エコー要求パケットの送信時刻と各往路で生じる遅延時間によりばらつきが生じ、同時刻ではない。本稿ではその時刻の差は小さいものとして、ICMP エコー応答パケットの返信時刻もほぼ同時であるとみなす。

### 3.8 制約

以下に、本方式を利用する上での制約について述べる。

### 3.8.1 送信元アドレスの書き換えパケットの破棄

本方式では、クライアントからの送信パケットの送信元アドレスを書き換えることにより、返信パケットの復路パスを操作している。クライアントの接続先の組織からみると、送信元として存在し得ない IP アドレスからパケットが送信されてきたことになる。インターネット上では、送信元アドレスを詐称することにより様々な不正行為が行われているため、そうしたパケットを転送せずに破棄するように設定されているルータやファイアウォールが存在する。そのような環境では、本方式の機能は制限される。すべての復路遅延差を推定するためには、少なくとも 1 本の往路パスで送信元アドレスの書き換えが可能であることが必要であり、すべての往路遅延差を推定するためには、少なくとも (往路パス本数 - 1) 本の往路パスで送信元アドレスの書き換えが可能であることが必要である。送信元アドレス書き換えパケット破棄の問題は、Mobile IPv4 でも存在しており、IPv6 においては、経路制御拡張ヘッダの利用により解消することが可能となる。その場合、拡張ヘッダにより、IPv4 でのソースルートオプションと同じように機能する。IPv4 であってもソースルートオプションがうまく機能すれば、本方式でも利用可能である。

### 3.8.2 ICMP パケットの到達と返信

本方式では、ICMP エコー要求、ICMP エコー応答パケットを計測に利用しているため、パケットは、それぞれ、クライアントからサーバへ、サーバからクライアントへ配送されなければならない。ルータやファイアウォールによっては配送しない場合がある。また、ICMP エコー要求パケットに対して、サーバが ICMP エコー応答パケットを返信しなければならない。サーバによっては、返信しない場合がある。ICMP エコー要求、ICMP エコー応答を利用する方法以外に、UDP エコープロトコルを利用する方法、UDP パケットと ICMP 宛先到達不能メッセージを利用し、クライアントで時刻を記録しておく方法がある。

## 3.9 実装上の考慮

### 3.9.1 ins\_interval の指定

本計測方式では、1 セットの計測中では、ほぼ同時にパケットを送信すると仮定している。それは、各計測パケットに同じネットワーク状態を経験させるためであるが、1 つのパスを通過する複数のパケットの間隔が短い場合、先発パケットが後発パケットに影響を与える。先発パケットは、パス上の各キューにおいて自然なキュー遅延を経験するが、後発パケットは、各キューにおいて先発パケットの影響を受け、遅延が増加してしまう可能性が高くなる。この影響を少なくするために、1 セット内では、同じ往路パス上は、一定の間隔を置いてパケット送信する。その間隔を *ins\_interval* とし、設定可能とする。具体的に、 $3 \times 3$  の経路が存在する場合を図 3 に示す。最初に、図 3.(a) の 3 つのパケットを連続して送信する。これらのパケットは、同じ片方向パスを通過しないため、相互の影響はあまりない (各パスが途中から同一リンクを通ることにより相互に影響を与えるこ

とがある)。次に、*ins\_interval* 経過した後、図 3.(b) のパケットを送信し、さらに *ins\_interval* 経過後、図 3.(c) のパケットを送信する。ここまでをセットと呼ぶ。複数セット計測する場合は *set\_interval* で指定した間隔ごとに、同じ動作を繰り返す。

クライアントに  $n$  個のインタフェースが存在する場合、1 セットの計測にかかる時間は、*ins\_interval* が無い場合よりも  $ins\_interval \times (n - 1)$  時間増加する。そこで、*set\_interval* は、(往路の本数  $\times$  *ins\_interval*) 以上でなければならないと規定する。それは、セット間のパケットが、*ins\_interval* より小さな間隔で、同じパス上に送出されるのを防ぐためである。この規定があると、*ins\_interval* が増加すると、結果的に *set\_interval* も増加し、即答性が低くなる。

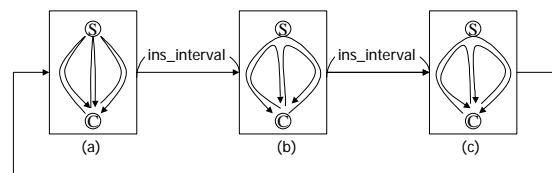


図 3 1 セットと *set\_interval*

### 3.9.2 初期パケット遅延増加の回避

あるパスにパケットを連続して送信するにあたり、最初のパケットの遅延時間が、それ以降のパケットに比べて増加することが知られている。これは、クライアント、パス上のリンクやルータ、サーバ等のパケット転送機能がしばらく使用されておらず、連続して送られているパケットに対して要する転送時間よりも初期パケットに要する転送時間が増加してしまうからであると思われる。そこで、最初の計測パケットを送信する前に各パスに対してパケットを送信し、計測の初期パケットへの遅延の増加を避ける。

### 3.10 応用：往復パス $n \times m \times n$ 本の場合

往復パスが  $n \times m \times n$  本の場合とは、クライアントのインタフェースが  $n$  個存在し、サーバのインタフェースが  $m$  個の場合である。 $m$  個のインタフェースが存在する場合として、例えば、クライアントと同じように複数のインタフェースをもつ端末がもう 1 台存在していて、その端末に対して通信を行う例がある。端末間で IP 電話サービスを利用する場合など、特に片方向パスごとの遅延差を求めることに意義があるであろう。 $n \times m \times n$  本パスがある場合、クライアントは各インタフェースに付加された IP アドレスを送信元アドレスとした ICMP エコー要求パケット  $n$  個を、ほぼ同時に各インタフェースから、サーバのインタフェース  $m$  個へ送信する。送信パケットは 1 セットの測定につき、 $n \times m \times n$  個になる。

## 4 予備実験

### 4.1 エミュレーション環境での動作実験

我々は、エミュレーション環境を構築し、複数の実験を行い、片方向遅延差測定方式の実装が正しく動作するか確認した。以下に行った実験のうち 2 つについて述べる。

#### 4.1.1 エミュレーション環境

エミュレーションネットワークを、クライアント PC 1 台、サーバ PC 1 台、NISTnet をのせた PC 2 台とハブ 1 台を用いて構成した(図 4) NISTnet は、LinuxPC を、ネットワークの様々な状況をエミュレートするルータとして構築するツールである[6]。NISTnet により、ルータ上で、ネットワークの片方向遅延や遅延の平均偏差等を設定することが可能である。

また、提案方式の計測中、クライアント、ルータ、サーバのインタフェースで、到着する ICMP パケットをモニタリングし、正しい経路を通過しているか確認した。

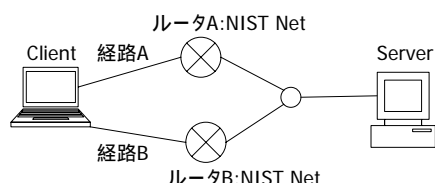


図 4 エミュレーション環境

#### 4.1.1 動作実験 1

動作実験 1 では、片方向遅延を、往路 A=125ms、往路 A=100ms、復路 B=150ms、復路 B=75ms と設定し、遅延の平均偏差は、すべて 0ms とした。4 セットの計測を行い、動作を確認した。得られた推測値を表 1 に記す。1 セットにおいて、往路の遅延差と復路の遅延差が 2 つずつ得られ、それぞれ片方向の遅延差を推測できていることを確認した。

表 1 動作実験 1 の片方向遅延差推測結果

|             | 1       | 2      | 3      | 4      | 平均       |
|-------------|---------|--------|--------|--------|----------|
| 往路遅延差 A(ms) | -24.753 | -25.07 | -24.78 | -24.78 | -24.8443 |
| 往路遅延差 B     | -25.005 | -25.15 | -25.15 | -25.01 | -25.079  |
| 復路遅延差 A     | 25.489  | 25.425 | 25.578 | 25.501 | 25.49825 |
| 復路遅延差 B     | 25.237  | 25.345 | 25.204 | 25.268 | 25.2635  |

#### 4.1.2 動作実験 2

実験 2 では、全片方向遅延を 100ms、往路 A だけ遅延平均偏差を 20ms にし、その他の経路の平均偏差を 0 に指定した。4 セットの計測を行い、動作を確認した。得られた推測値を表 2 に記す。往路 A の片方向遅延平均偏差が影響しているのは、往路 A を通過するパケットの往復遅延を利用して片方向遅延差を計算する場合であり、往路 A を通らない計測パケットによる推測値、復路遅延差 B は、影響を受けていないことを確認した。

表 2 動作実験 2 の片方向遅延差推測結果

|             | 1      | 2      | 3      | 4      | 平均       |
|-------------|--------|--------|--------|--------|----------|
| 往路遅延差 A(ms) | 23.146 | 12.102 | -15.9  | 22.766 | 10.5285  |
| 往路遅延差 B     | -5.948 | 9.401  | -13.06 | -4.534 | -3.53525 |
| 復路遅延差 A     | 29.349 | 2.832  | -2.643 | 27.523 | 14.26525 |
| 復路遅延差 B     | 0.255  | 0.131  | 0.195  | 0.223  | 0.201    |

#### 4.2 ins\_interval の設定実験

3.9.2 節で述べたように、ins\_interval が小さすぎる場合、1 セット内の先発パケットが、同じパスを通過する後発パケットの遅延を増加させる。

ある 1 本のパスに、ボトルネックとなるリンクが存在しているとする。そのパスに 2 つのパケットを同時に送信するとき、先発パケットがそのパスのボトルネックで待機させられる時間よりも、2 つのパケットの送信間隔が大きければ、後発パケットは、先発パケットの影響を受けない。そのため、ボトルネックでの遅延時間を求めることができれば、先発パケットの影響を受けない最小の ins\_interval を設定できる。

ボトルネックリンクを推測する方式は、いくつか存在するが、ユーザが利用しやすいような方法でなければ、実際に片方向遅延差測定を行うときに役に立たない。

本稿では、パス上の全リンクの状態を求めるのではなく、少なくとも端末に直接つながっているリンクの特性だけは、ある程度把握し、ins\_interval を求めるために利用する。研究の前提である複数経路を有する環境は、無線インフラを利用する場合に経験することが多いため、実際にボトルネックとなるのは、回線速度の小さい 1 ホップ目ではないかと予想する。もちろん、有線であったとしても、当てはまる可能性はある。その予想が間違っていたとしても、少なくとも 1 ホップ目におけるパケット同士の影響は排除できる。また、1 ホップ目のリンクは、クライアントからの通信が通過する確率が非常に高いので、そのリンクを通し異なるサーバにアクセスする時に、手間をかけずにその結果を再利用することができる。

我々は、直接接続リンクでの遅延増加の観察を行うために、最初に ping を用いて遅延増加の観察を行う。そして、その結果が、提案方式において妥当であるか、提案方式を用いて確かめる。

#### 4.2.1 ping を用いた遅延増加の観察

##### a) 実験方法

はじめに traceroute を使い、クライアントから 1 ホップ目にあるルータを求める(クライアントのルーティングテーブルより求めることが簡単であるが、実際にパケットが転送されるルータと異なることがある)。次に、送信時刻を記入した ICMP エコー要求パケットを、1 ホップ目ルータに、送信間隔 1000ms から 10ms まで変更して送信し、エコー応答パケットを受信することにより往復遅延を計測する。機能的には ping コマンドと同じであり、本方式においてインタフェースが 1 つである場合の動作と同じである。ICMP パケットは送信間隔につき 64 個ずつ送信を行う。また、あるサーバへのパスのボトルネックとなっているリンクが、直接接続されているリンクであるか確認するために、同じリンクを通し、サーバに対しても同じ計測を行った。対象とする通信方式は PDC、ADSL、PHS である。

##### b) 結果と考察

1 ホップ目にあるルータへ計測した遅延を“通信方式

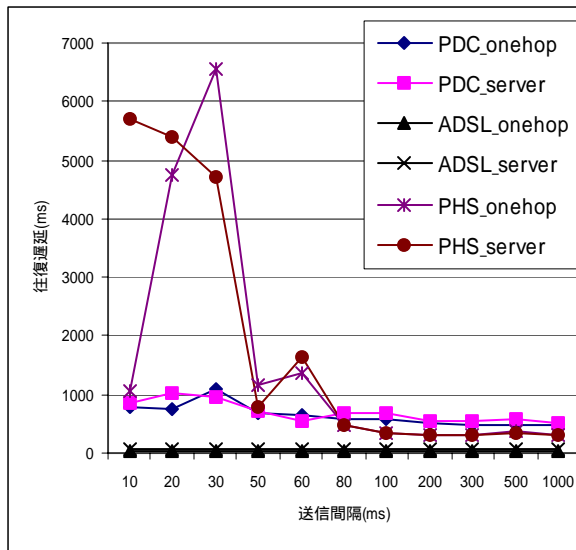


図5 接続リンクでの遅延増加

名\_onehop”，サーバへの計測値を“通信方式名\_server”とし，得られた結果を図5に示す．接続リンクが無線通信方式では，次ホップルータへの第一リンクがボトルネックとなっていることが図5より確認できる．図5では，送信間隔が小さくなるにつれて，第一リンクにおいて遅延が増加している．しかし，その後サーバを経由する経路を通過しても，ほぼ同じ増分のままである．つまり，直接接続リンクより先には，隣接パケットに対して遅延を発生させるボトルネックとなり得るリンクがないのである．この実験では，その他にも，サーバへの往復遅延と次ホップルータへの往復遅延を比較したとき，差分が全体の遅延よりも小さいことから，第一リンクの遅延がかなり大きいこともわかる．

次に，ins\_intervalの値について考察する．グラフより，無線通信では，約100msより送信間隔を小さくすると遅延の増加が激しくなることがわかる．特に，PHSにおいて顕著であり，ins\_intervalの値には十分注意しなければならない．同じ無線であってもPDCはそれほど急激な変動をとっていないこともわかる（ただし，PDCはロス率が高くなるため，パケットロス率の差を求めるときには，評価が悪くなる）．

#### 4.2.2 提案方式を用いた遅延増加の観察

##### a) 実験方法

本実験では，項4.2.1での結果が，実際の提案方式においても当てはまるか調査する．4.2.1節の結果より，無線通信方式の中から特にins\_intervalの値を長く設定しなければならないと思われるPHSを使用し，先発パケットが後発パケットに与える影響について調べる．

片方向遅延差推定方式を用い，ins\_intervalの値を変化させ，後発パケットの実測片方向遅延と先発パケットの実測片方向遅延の差の推移を観察する．経路AはADSL，経路BはPHS接続である．1つのset\_intervalごとに，測定は8セット行い，セット間の影響を少なくするためにset\_intervalは5000msに設定する．

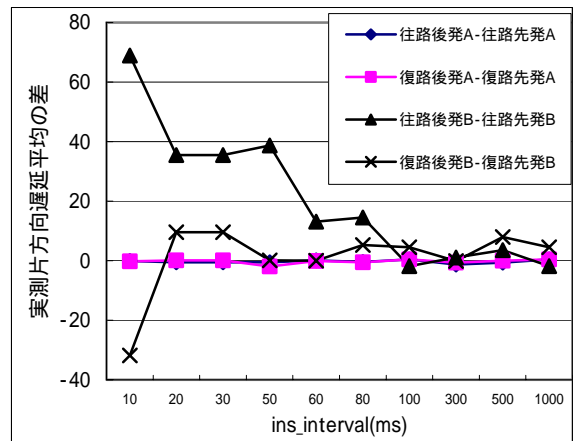


図6 実測片方向遅延平均の差

##### b) 結果と考察

結果を図6に示す．往路後発Bと往路先発Bは，どちらも，往路でPHS回線を通過している片方向遅延の平均である．ins\_intervalが小さくなるにつれ，後発パケットが先発パケットの影響を受けやすくなり，遅延差が増加している．また，ins\_intervalが100msで，先発パケットと後発パケットの影響が少なくなっている．これは，pingを用いた結果とほぼ一致し，連続する往復パケットによるins\_intervalの決定は，妥当であるといえる．ADSL回線を通る経路Bに関しては，先発と後発のパケットの影響がほとんどないことがわかり，これも4.2.1項の実験値と一致する．

#### 4.2.3 ins\_intervalの決定

以上の2つの実験の結果をふまえ，次章の複数の環境での測定実験では，ins\_intervalの値を200msに設定する．

### 5 片方向遅延差推定方式の評価実験

#### 5.1 測定実験環境

サーバは静岡大学浜松キャンパス内に設置し，クライアントは，PHS,ADSL,PDCをアクセス手段として用い，それぞれ異なるISPに接続する．実験で利用する通信方式，回線速度の理論値，接続先を表3に示す．サーバとクライアントはNTPを利用し，計測を行う直前に，同一LAN上で時刻同期をとる（片方向遅延差を求める場合に，実際には時刻同期は必要ないため，誤差は結果には影響しない）．さらに，サーバでは，クライアントから送信されてくるICMPパケットをモニタリングし，インタフェースへのエコー要求パケットの到着時刻と応答パケットの送信時刻を記録する．計測に使用するICMPエコー要求パケットは全実験において64byteとした．本稿では，主に片方向遅延差の計測による推測片方向遅延差の値と，サーバで計測された時刻を用いた実測片方向遅延差を比較する．

表 3 通信方式

|         |         |          |      |        |
|---------|---------|----------|------|--------|
| 通信方式    | PDC     | PHS      | ADSL | イーサネット |
| 上り(bps) | 9.6k    | 68k      | 512k | 100M   |
| 下り(bps) | 9.6k    | 128k     | 1.5M | 100M   |
| 接続先     | J-phone | b-mobile | OCN  | 静岡大学   |

5.2 実験方法

いくつかの通信方式の組み合わせにおいて, 決定した ins\_interval を設定し測定を行い, 推定値の値より推定方式について考察する. 使用する接続方式は, ADSL, PHS, PDC である. ins\_interval は 200ms, set\_interval は 500ms に設定し, 8セット測定した. 実験 4 で計測した通信方式とその結果の図番号を表 4 に示す.

表 4 各経路の通信方式

|            |      |     |      |
|------------|------|-----|------|
|            | 図 7  | 図 8 | 図 9  |
| 経路 A の通信方式 | ADSL | PDC | ADSL |
| 経路 B の通信方式 | PHS  | PHS | PDC  |

5.3 結果と考察

図 7, 8, 9 に得られた推測結果を示す. 片方向遅延差は, 以後, 経路 B - 経路 A の計算をして表示する. 経路 B の片方向遅延が経路 A よりも大きいと正の数としてプロットされる.

図 7 では, 推測往路遅延差 A と推測復路遅延差 A が非常に正確である. 本方式は 2 つのパスの共通パスで経験する遅延の差が小さいほど, 正確に片方向遅延差を計算できる. 上記の片方向遅延差推定が正確なのは, 共通パスが, 遅延変動の少ない ADSL だからである. 共通パスが PHS のときは, ADSL のときより, 実測値との差が大きいが, 片方向経路を選択するという目的からみると, 十分な精度である.

図 8 のグラフはかなり変動が大きくなっている. セット番号が前半の推測遅延が極端に大きくなっている. これは, PDC での遅延に比べて PHS での遅延が極めて大きいからである. ただし, 実測遅延差も同様な値をとっていることからわかるように, 測定の誤差ではない. 実際にこのような差をパケットが経験しているのである. その遅延変動は, 測定方式が原因で引き起こされるものではない. PHS を利用するとき, 送信し始めのパケット数個の遅延が非常に大きくその後落ちつくような現象が見られるのである. 本方式では, 初期パケット遅延の軽減を行うために 1 セットのパケットを送信しているが, この結果をみると十分でなかったと考えられる. これは, 今後の実装上の課題である.

推定の精度は, 共通パスが PDC である場合は実測値の変動が大きいかにも関わらず, 比較的正確なものになっている. Ping による実験で PDC は他の無線方式に比べ, 変動が少なかったが, その結果とうまく合致する. 次に, 共通パスが PHS の場合をみると 1 回の測定内の変動が大きいかにも関わらず, ある程度の精度が得られている. これは本測定方式が 1 セット内でのみ推測を行

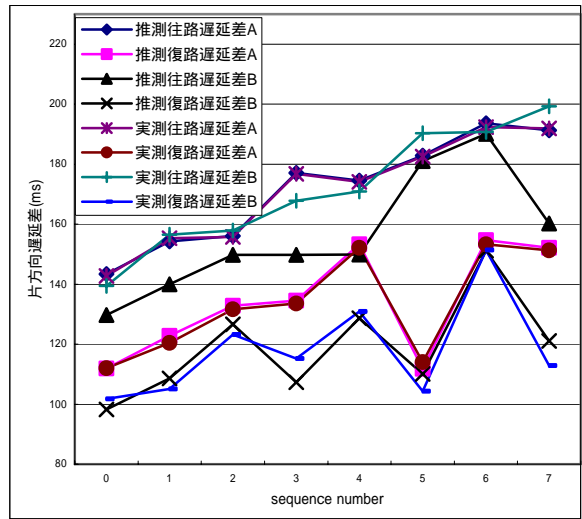


図 7 ADSL-PHS

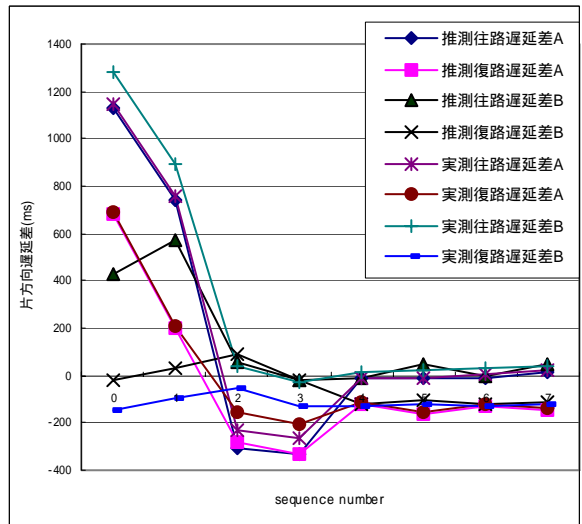


図 8 PDC-PHS

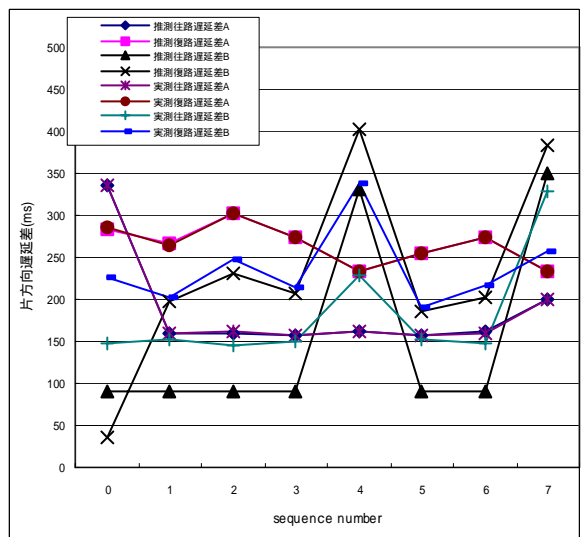


図 9 ADSL-PDC

っているからである。たとえセット間の変動が大きくとも、セット内で同じようなネットワーク環境を経験できれば、精度は悪化しない。一般に連続して送信するパケットの間隔が大きくなるほど、相関が低くなるため、ins\_interval の値を大きくし過ぎると、推測の精度が下がる。ただし、逆に ins\_interval の値を小さくしすぎると実験で述べたように後発パケットが先発パケットの影響を受け精度が下がってしまう。図 8 の場合は、セット内では、変動が小さかったため精度があまり落ちていないと考えられる。

図 9 の ADSL を共通部分としてもつ経路は、精度が高く推定できている。PDC を共通部分にもつ経路は、予想よりも正確に測定が行われていない。実験時の PDC と通る経路が安定していなかったことも考えられるが、その他の測定方式に起因する問題である可能性もある。ただし、経路選択は正しく行うことができる。

全体の結果より、本方式は、経路選択を行ううえで十分な精度があり、経路選択を有効に行えるといえる。

## 6 まとめと今後の課題

本稿では、片方向ごとに経路を選択するために、片方向遅延差に注目し、片方向遅延差推定方式を提案、実装した。片方向遅延差とは、2つの片方向遅延の差分であり、経路の遅延の大小を決定することが可能である。

片方向遅延差推定方式の実装後、動作確認を行い、実

際のインターネット上での計測を行った。その結果、経路選択において本方式が有効であることが確認できた。

今後は、多くの接続環境でより多くのデータの収集、精度の評価を行い、適した設定値の考察や実装の改良を行う。さらに、インタフェース数  $n$  の値を増加させた計測、 $n \times m \times n$  経路の計測、パケットロス率差の推測の実装を行う予定である。

## 参考文献

- [1] Andrew Adams, Ramon Caceres, Nick Duffield, and et.al., "The use of end-to-end multicast measurement for characterizing internal network behavior," IEEE Communications Mag., pp.152-158, May 2000
- [2] M. Coate, A. Hero, R. Nowak, and B. Yu, "Internet tomography," IEEE Signal Proc. Mag., pp.152-158, May 2002
- [3] N. Duffield, J. Horowitz, F. L. Presti, and D. Towsley, "Network delay tomography from end-to-end unicast measurements," in Proc. int. Workshop on Digital Communications, September 2001
- [4] M. Coates and R. Nowak, "Network distribution inference from end-to-end unicast measurements," in Proc. Int. Workshop on Digital Communications, September 2001
- [5] 山本幸寿, 渡辺尚, "分散オブジェクトシステムにおける複製配置方式の評価について," マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム論文集, vol.2000, no.7, pp.67-72
- [6] 澤井新, 小川清, 飯田登, 渡辺尚, "MobileIPにおける経路最適化選択の検討", 情報処理学会 MBL, November, 2000
- [7] <http://www.itl.nist.gov/div892/itg/carson/nistnet/>