

特別研究報告

題目

実測に基づいたインターネットにおける
パケット転送遅延のモデル化とプレイアウト制御への適用

指導教官

村田 正幸 教授

報告者

藤本 康平

平成 12 年 2 月 23 日

大阪大学 基礎工学部 情報工学科

実測に基づいたインターネットにおける
パケット転送遅延のモデル化とプレイアウト制御への適用

藤本 康平

内容梗概

インターネットアプリケーションにおける重要な通信品質特性項目としてパケット転送遅延がある。特に、データ転送系サービスである TCP におけるタイムアウト時間や実時間アプリケーションにおけるプレイアウト時間などの設定には、パケット転送遅延分布のすその部分の特性を明らかにしておく必要がある。

本報告では、まずパケット転送遅延の計測データを用いて、その確率分布関数によるモデル化を行っている。具体的手法としては、いくつかの確率分布関数を与え、その中からもっとも適合した分布関数を統計的手法によって選択することによって、インターネットにおける遅延特性を明らかにしている。その結果、全体の遅延時間分布についてはパレート分布がよく適合することが分かった。さらに、本報告では、ネットワークの混雑状況を考慮して時間帯ごとの特性を調べ、分布のすその部分については、特にネットワークが混雑している時にはパレート分布がもっとも適していることがわかった。一方、ネットワークが空いている時には分布のすその部分が短い対数正規分布が適合している。

次に、モデル化の応用として、実時間アプリケーションにおけるプレイアウト制御に適用した。プレイアウト制御においては、プレイアウト時間を小さくするとネットワークにおける遅延時間の変動を吸収できなくなり、パケットの再生率が劣化する。一方、逆にプレイアウト時間を大きくすると再生するまでの時間が大きくなってパケット再生率は確実に高くなるが、実時間性は損なわれる。そこで、モデル化によって得られた分布をもとにしたプレイアウト制御を新たに提案し、再生率を損なうことなく、プレイアウト遅延を小さくできるような方式を明らかにしている。

主な用語

パケット転送遅延特性、往復伝搬遅延時間、片方向伝搬遅延時間、プレイアウト時間、累積分布関数、分布の99%値

目次

1	はじめに	7
2	パケット転送遅延時間の測定方法	9
2.1	RTT 測定方法	9
2.2	片方向遅延時間測定方法	11
3	パケット転送遅延時間分布のモデル化	12
3.1	累積分布関数とパラメータ推定法	12
3.2	モデル分布の判定方法	12
4	分析結果	15
4.1	RTT の分析結果	15
4.1.1	基本特性	15
4.1.2	時間帯の影響	16
4.2	片方向伝搬遅延特性の分析結果	19
4.2.1	基本特性	19
4.2.2	時間帯の影響	21
4.2.3	パケット送信間隔、計測時間の影響	22
5	プレイアウト制御への適用	26
5.1	プレイアウト時間の設定方法	26
5.2	プレイアウト時間の制御方法	27
5.2.1	近似式を利用した方法 (文献 [1])	27
5.2.2	提案手法	28
5.3	適用結果とその評価	30
5.3.1	シミュレーション環境	30
5.3.2	評価結果	30

目 次

1	RTT のモデル	9
2	計測した RTT の累積分布とモデル分布	15
3	RTT 値の時間的な変化	17
4	回線状況による RTT 分布とモデル化の結果	18
5	送受信ホストの時計のずれ	20
6	時間補正後の片方向遅延時間	21
7	片方向遅延分布とモデル分布	22
8	時間帯による片方向遅延時間分布とモデル化の結果	23
9	送信間隔が小さい場合の片方向遅延時間分布とモデル化の結果	25
10	パケット送受信のタイミング	26
11	遅延時間とプレイアウト時間の変化	33

表 目 次

1	モデル分布関数の判定値	16
2	図 4 におけるモデル分布関数の判定値	19
3	図 7 におけるモデル分布関数の判定値	20
4	図 8 におけるモデル分布関数の判定値	24
5	図 9 におけるモデル分布関数の判定値	24
6	シミュレーション結果 (ネットワーク輻輳時)	32
7	シミュレーション結果 (ネットワークが空いている時)	32

1 はじめに

インターネットはいわゆるコネクションレス型パケット交換ネットワークであり、ルータはパケット単位の処理を行っている。現在、ルータにおけるパケット処理規律は基本的にパケット到着順処理による簡素なものになっており、それが、インターネットが現在のように広く利用されるようになった理由にもなっている。しかしながら、そのようなルータにおける到着順処理によるパケット転送は、パケット転送時間に対する保証を行っていないことを意味しており、その結果、インターネットにおけるエンドホスト間のパケット転送時間はネットワークの輻輳状態に応じて変化することを意味する。また、コネクションレス型通信であるためにパケットごとの転送経路が一定せず、それらがエンドホスト間のパケット転送遅延時間に対する予測を困難なものにしている。

しかしながら、インターネットにおけるパケット転送遅延時間は、アプリケーションに対してその通信品質を規定する重要な項目である。例えば、上位トランスポート層の TCP では、ネットワークの輻輳状況を表す指標として、エンドホスト間の往復遅延時間である Round Trip Time (以下、RTT) をウィンドウフロー制御のパラメータとして用いている。例えば、パケットが失われたことを判断するためのタイムアウト時間は RTT をもとに計算されている。また、近年、インターネットにおいて利用が広まりつつある実時間転送アプリケーションでは RTP (Real Time transport Protocol) [2] が用いられており、ここではエンドホスト間遅延時間がその通信品質に対して直接影響を与えるパラメータとなる。また、その制御プロトコルとして用いられる RTCP (Real Time Cotrol Protocol) [2] においては、転送遅延時間は RTT によって求められている。しかし、エンドホスト間遅延時間に関しては、ルート変更などによって往路 / 復路が違う場合も多く発生しており [3]、そのまま、実時間アプリケーションにおけるパケット転送遅延時間に用いることができない可能性もある。また、片方向実時間通信を行うアプリケーション (以下、ストリーム型アプリケーション [1] と呼ぶ) においては、片方向の通信であるがゆえに RTT を直接利用できない場合も存在する。

インターネットにおけるパケット遅延特性については、すでいくつかの研究が行われているが [4, 5]、多くの研究では平均的な特性、あるいは全体の遅延時間分布が求められているのみである。しかし、TCP を用いたデータ転送アプリケーションにおけるタイムアウト

時間を考えると、より重要となるのは分布のすその部分である。例えば、効率よいデータ転送を実現するには、パケット紛失によるタイムアウトを早期に発見する必要がある。しかしながら、タイムアウト時間を短く設定すると無駄なパケット再送を招くことになる。また、RTP/UDP を用いた実時間アプリケーションにおいてはプレイアウト制御が、品質のよい通信のために重要となる。ここで、プレイアウト制御とは、サーバから送信されたパケットがクライアント側でいったんバッファに蓄積し、再生を遅らせることによって、ネットワークにおける遅延変動を吸収する制御である。サーバがパケットを送出してからクライアントが再生を開始するまでの時間をプレイアウト（再生）時間と呼び、この時間が、ストリーム型アプリケーションのデータ再生品質に影響する。すなわち、プレイアウト時間を小さくすると遅延時間の変動を吸収できなくなり、パケットの再生率が劣化する。一方、プレイアウト時間を大きくすると、再生するまでの時間が長くなってパケット再生率は確実に高くなるが、実時間性は損なわれる。特に、プレイアウト遅延を不必要に大きくすると、再生のためのパケットが到着しているにもかかわらず、再生がなかなか開始されないという問題が発生する。

そこで本報告では、上記の点を考慮しながら、インターネットにおけるパケット転送遅延時間特性を明らかにする。まず、RTT をインターネット上で計測し、その収集したデータに基づいて RTT の確率分布関数によるモデル化を行う。さらに、片方向のパケット転送遅延時間もついても計測し、そのモデル化も行っている。次に、得られた遅延分布特性に基づいて、ストリーム型実時間アプリケーションにおけるプレイアウト制御に関する考察を行い、再生率を損なうことなく、プレイアウト遅延を最小化できるような新たなプレイアウト制御を提案する。

以下、まず 2 章ではパケット転送遅延時間特性について説明し、その計測方法について述べる。次に、3 章では計測したパケット転送遅延時間の確率分布関数によるモデル化とその判定方法を説明する。4 章では、パケット転送遅延時間の評価分析する。5 章では、3、4 章の結果にもとづいて、分析結果の応用としてプレイアウト時間の制御方法を提案し、その評価を行う。最後に 6 章で、まとめと今後の課題を述べる。

2 パケット転送遅延時間の測定方法

本報告では、パケット転送遅延時間として、RTT と片方向遅延時間を取り扱う。以下ではその計測方法についてまとめる。

2.1 RTT 測定方法

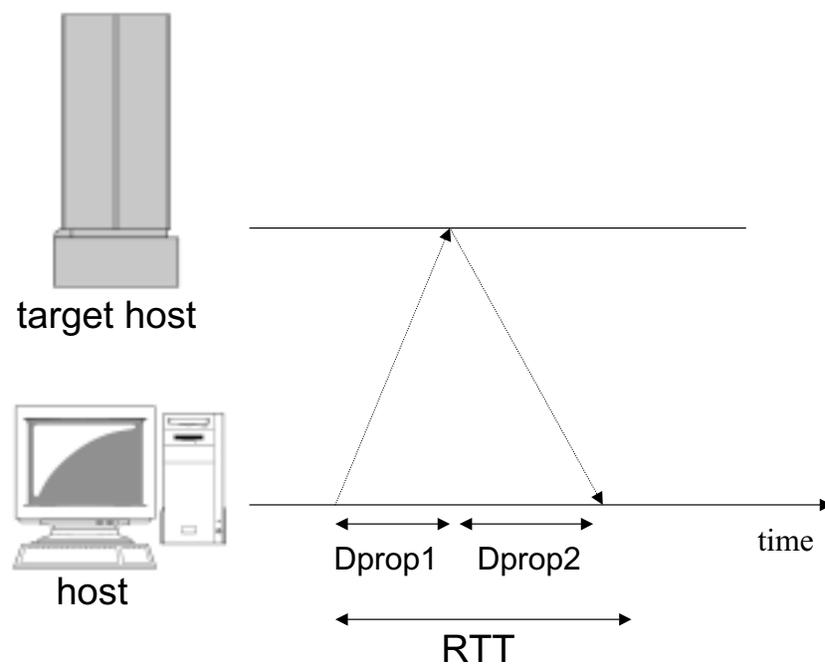


図 1: RTT のモデル

図 1 はパケット転送遅延時間の一つである RTT の計測状況を示している。RTT は、パケットが送信ホストから出発して受信ホストに到着後、再び送信ホストに戻ってくるまでの時間である。インターネットにおいて RTT を測定するツールとして pchar [6]、pathchar [7] などがあり、本報告では pchar によって RTT を用いて測定した。pchar では、ICMP (Internet Control Message Protocol [8]) の Time Exceeded Message を利用することで RTT の計測を行う。すなわち、送信ホストは送信する UDP パケットの TTL (Time to Live) 値を受信

ホストまでのホップ数に設定してパケットを送信する。中間ルータを経由するたびに TTL の値は1ずつ減少されるので、パケットが目的地ルータに到着した時には TTL 値は0となる。従って、目的地ルータでは ICMP エラーとなり、そのエラー報告として送信ホストに ICMP パケットを逆に返信する。目的地ルータでパケットを送信する直前の時間と ICMP エラーパケットが帰ってきた直後に送信ホストで計測しておけば、RTT はこれらの計測した時間の差で求めることができる。目的ホストまでの RTT を求める場合には、TTL 値を目的ホストまでのホップ数に設定しておけばよい。また、RTT 以外に、以下の点も調べることが可能である。

(1) 時間帯の影響

一日の中でも時間帯によってインターネットの利用者数が異なる。例えば、アクセス料金制度等の影響により、時間帯によってインターネット回線が輻輳状態になることが多い。その結果、RTT 値や RTT 値の分布が変化することが考えられる。

(2) ルートの変更

ルートが変更されれば、RTT の分布にも変化が現れる [3]。計測時間が長くなればなるほど、ルートが変更される可能性も多くなる。例えば、10 分間計測して得た分布と 1 時間計測して得た分布が、ルート変更の影響によりどのように変化するかを調べることは重要である。またその結果、同じルート上でどの程度パケット転送されているのかを調べることも可能になる。

本報告では、この中で特に時間帯の影響を調べる。なお、pchar では RTT の他に以下の値も測定可能である。

- RTT を計測した時間 (タイムスタンプ)
- ルート変更の有無
- パケットロス率

測定は以下のように行った。すなわち、送信ホストは、28.8Kbps モデムにより電話回線を通じて ISP (インターネットサービスプロバイダ) に接続されているものとし、目的ホス

トはインターネット上における有名サイトを利用した。

2.2 片方向遅延時間測定方法

本報告では、RTT の他にもう一つのパケット転送遅延時間の指標として片方向遅延時間を測定する。この遅延時間は送信ホストから受信ホストまでのパケット転送時間であり、RTT の往路、復路の違いによる非平衡性などの問題がない。しかしながら、片方向遅延時間を測定する場合、送受信ホストにおける時計の同期の問題が発生する。そこで、本報告では異なるホスト間の同期を NTP (Network Time Protocol [9]) により設定する。まず、同期の誤差を小さくするため NTP サーバに対して、送信ホスト、受信ホストを同じ LAN 内に接続し各ホストで NTP サーバとの同期をとることで送受信ホストの間の同期をとる。同期後に、送受信ホストを異なる ISP に接続し、送信ホストから受信ホストに向けてパケットを送信する。遅延時間は、まず、送信ホストにおいてパケット送信直前の時刻 (タイムスタンプ) をそのパケットのデータに書き込み、受信ホストはそのパケットを受け取った直後の時刻とパケットに書き込まれた時刻との差を片方向遅延時間とする。また、RTT の測定と同様に、タイムスタンプと合わせてパケット番号も合わせて送信パケットに書き込むことによって、時間帯の影響ならびにパケット棄却率を合わせて測定する。

まず、時間帯の影響などを調べるために、パケットの送信間隔を大きな値に設定する。しかしながら、後述の 4 章における評価のため、パケットをストリーミングアプリケーションと同じように一定間隔で連続してパケットを転送する場合の遅延時間も求めている。本報告では、次のようにストリーミングメディアを区別し、それぞれの遅延時間特性を調べる。

- 非連続メディア

例えば、人の会話のように、有音は一定間隔で音声データを送信し、無音区間はデータパケットを送信する必要がないメディアである。

- 連続メディア

例えば、音楽のように、そのメディアが再生される期間は常にデータを送信する必要があるメディアである。

3 パケット転送遅延時間分布のモデル化

本章では、実測により求めた遅延時間分布に対して確率分布関数によるモデル化を行う。ここでは、telnet や ftp のトラヒックを分析した文献 [10] の手法を用いて、対象となる分布を確率分布関数にモデル化することにより分析を行う。この手法は、WWW トラヒック [11] やアプリケーション別 (HTTP, SMTP, NNTP, DNS など) のトラヒック分析 [12] においても利用されているものである。以下では、候補とする確率分布関数とパラメータの推定方法、モデルの判定方法について説明する。

3.1 累積分布関数とパラメータ推定法

候補とした累積分布関数は、正規分布、指数分布、対数正規分布、パレート分布である。正規分布、指数分布の累積分布関数は順に以下のような式で与えられる。

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(y-\zeta)^2}{2\sigma^2}\right] dy. \quad (1)$$

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right), \quad \beta > 0. \quad (2)$$

また、対数正規分布は確率変数の対数が正規分布に従う分布であり、以下の式で与えられる。

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma y} \exp\left[-\frac{(\log y - \zeta)^2}{2\sigma^2}\right] dy. \quad (3)$$

パレート分布は、トラヒックの自己近似性を表わす分布として知られており [13, 14]、以下の式で与えられる。

$$F(x) = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^\alpha, \quad x \geq k. \quad (4)$$

各分布のパラメータ推定は、以下のように行った。すなわち、正規分布、指数分布、対数正規分布は実測データの平均、標準偏差から推定し、パレート分布のパラメータ推定は、最小二乗法を用いる文献 [15] の方法を用いた。

3.2 モデル分布の判定方法

次にモデル化した各確率分布関数の判定を行う。判定は、3段階の判定で最適な確率分布関数を求めることによって行う。まず、最初に、文献 [16] と同様に χ^2 検定によって検定指

指標 $\hat{\lambda}_2$ を用いた判定を行なう。各モデルのパラメータ $\hat{\lambda}^2$ は以下のように求めることができる。まず、 n 個の確率変数で構成されるサンプルデータに対し、確率変数の発生区間を N 個に分割する。この時、第 i 番目の区間に含まれるサンプルデータの個数、そのモデルの確率をそれぞれ、 Y_i 、 p_i とすると $\hat{\lambda}^2$ は次式で与えられる。

$$\hat{\lambda}^2 = \frac{X^2 - K - N + 1}{n - 1}$$

ここで、

$$X^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(Y_i - np_i)^2}{np_i}$$

$$K = \sum_{i=1}^N \frac{Y_i - np_i}{np_i}$$

である。

χ^2 検定では、指標 $\hat{\lambda}^2$ が小さい程モデル分布の適合度が高いことを意味し、従って最初の判定として、モデル化した確率分布関数のうち、 $\hat{\lambda}^2$ が値が小さい3つの分布を候補とする。しかしながら、 χ^2 検定は分布全体の適合性を算出しており、その適合度が高い場合でも、本報告で興味の対象とする分布のすその部分については、その適合度が低い可能性はじゅうぶん考えられる。そこで、2番目以降の判定として、すその部分の適合度の判定を行う。まず、モデル分布のすその部分に対しての目標値 X を指定し、その目標値と実測データとの違いを求める。すなわち、すその部分の目標値 X を累積分布 $F(X)$ における99%値 ($F(X) = 0.99$ なる X) になる値に設定し、モデル分布の99%値と実測データの $n \times 0.99$ 番目の遅延時間の違いを比較し、その差が小さい2つの分布を選択する。最後に、その目標値 X の近傍を考慮に入れる。すなわち、実測遅延時間の累積分布関数を $G(X)$ とした場合に、 X 近傍の傾きを $X \pm \delta$ 値間の傾き、すなわち、 $(G(X + \delta) - G(X - \delta))/2\delta$ とし、モデル分布の累積分布関数 $F(X)$ の傾き $F'(X)$ の値を求め、その差が最小の値を示す確率分布関数を最適な分布関数として判定する。

以上、まとめると、

- (1) χ^2 検定でモデル分布関数の候補を3つに絞る
- (2) 次に、目標値 X により、候補を2つに絞る

(3) 最後に、目標値 X における累積分布の傾きにより最適とする分布関数を判定する

ここで、目標値 X は、例えばストリーミングアプリケーションにおけるパケットロス率を $Y\%$ に押さえる場合に必要なプレイアウト遅延時間とするような値などであり、アプリケーションの遅延時間に対する品質目標値を基準に定められるものである。

4 分析結果

本章では、2、3章の計測結果を用いて確率分布関数によるモデル化の適合性の評価を行う。

4.1 RTT の分析結果

4.1.1 基本特性

まず、基本的な RTT 特性を調べる。実測データは、2000年1月17日午後9時から翌日午前4時間半の間に pchar を実行して測定した。この場合の測定データ数は、29,977である。その時のサンプルデータとそのデータを基にしてパラメータ推定した確率分布関数を図2に示す。図2には、測定結果 (図中 log data) とともに正規分布 (図中 normal)、指数分布 (図中 exponential)、対数正規分布 (図中 lognormal)、パレート分布 (図中 pareto) を示している。図2より、全体の分布を見るとパレート分布とも完全に一致しているわけではないが、少なくとも RTT の分布はすその部分が広がっていることが観察できる。

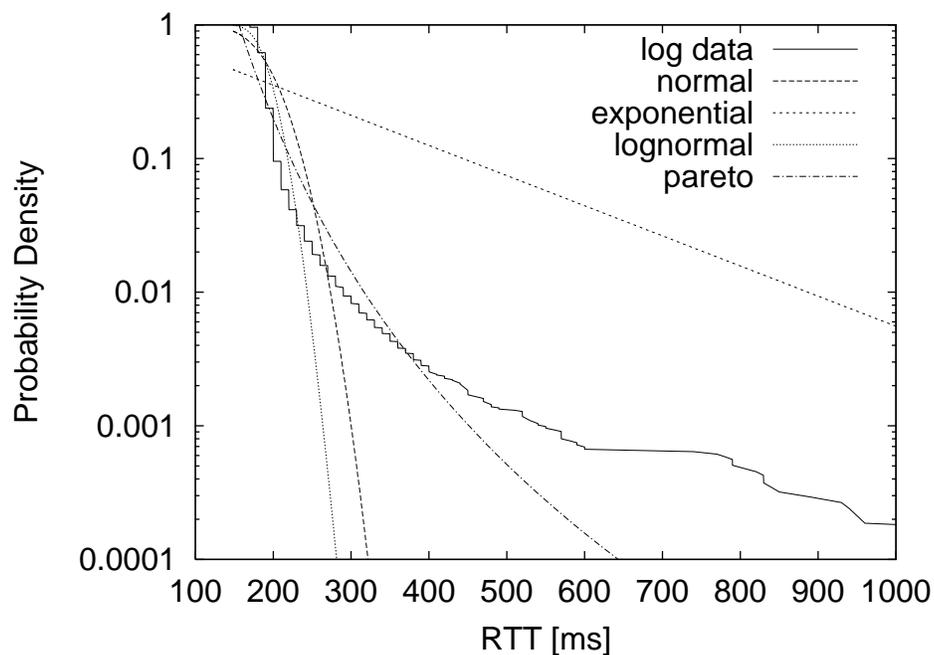


図 2: 計測した RTT の累積分布とモデル分布

また、表 1 にモデル分布関数の判定結果を示した。ここでは目標値 X として 99%遅延時間を考えた。カッコ内は分布の 99%値を示しており、-は検定により最適モデルの候補から外れていることを示している。この表より、モデル分布関数の中では、パレート分布がモデルとして最適であり、実際に図 2 においても、パレート分布が最適であることが分かる。これは、RTT 遅延分布がその部分が広い分布であるため、一番その部分の広い分布特性を示すパレート分布が一番適合度が高くなる。

表 1: モデル分布関数の判定値

	正規分布	指数分布	対数正規分布	パレート分布
χ^2	5.00419	21.636	8.00376	0.776612
99%値誤差	37 (520)	-	60 (487)	2 (555)
傾き	0.0006	-	-	0.000108

4.1.2 時間帯の影響

次に、遅延時間特性をさらに詳しく調べるため、時間帯の違いによる RTT の変化を調べる。まず RTT の 21 時から翌日 3 時までの変化を図 3 に示す。図 3 より、時刻 23 時ごろから、急激に RTT が増加していることが分かる。23 時は電話回線利用料金が通話時間によらない料金サービスが開始される時刻であり、この時間帯ではユーザが一斉に ISP に接続し、そのため、トラフィック量が増加することが原因であると考えられる。そのため、以下では、トラフィック量が比較的大きい 23 時と電話回線利用料金が通常料金であるために、ISP に対するトラフィック量が比較的小さい昼間の時間帯 14 時の 2 つの時間帯を中心に考える。まず 23 時ごろ (22 時 30 分から 0 時 30 分) の RTT 特性を調べる。この時間帯における計測 RTT は、9367 個である。この時の RTT の分布とパラメータ推定したモデル分布関数を図 4(a) に示す。図には実測より得た RTT 値の分布と正規分布、指数分布、対数正規分布、パレート分布にモデル化した結果を示している。また、表 2 にモデル分布関数の判定結果を示した。ここでは目標値 X として 99%遅延時間を考えた。この表より、モデル分布関数の中で

パレート分布がモデルとして最適であり、実際に図 4(a) においてもパレート分布が最適であることが分かる。

次に、時間帯 14 時から 15 時 30 分まで (測定 RTT 数 9370 個) の RTT 分布とパラメータ推定したモデル分布関数を図 4(b) に示す。また、その時のモデル分布関数の判定結果を表 2 に示した。この場合においても、図 4(b) より、RTT はすそのが広い分布を示しているが、目標値である 99% 遅延の値が実測値と一番近いモデル分布関数は対数正規分布であり、またその近傍の傾きについても対数正規分布が一番近い (表 2 参照) ことが分かる。したがって、回線が比較的空いているような状態では対数正規分布が最適なモデルであることが分かる。なお、それぞれの時間帯における実測 RTT の平均値は 14 時台 : 210.293 [ms]、11 時台 : 226.474 [ms] である。

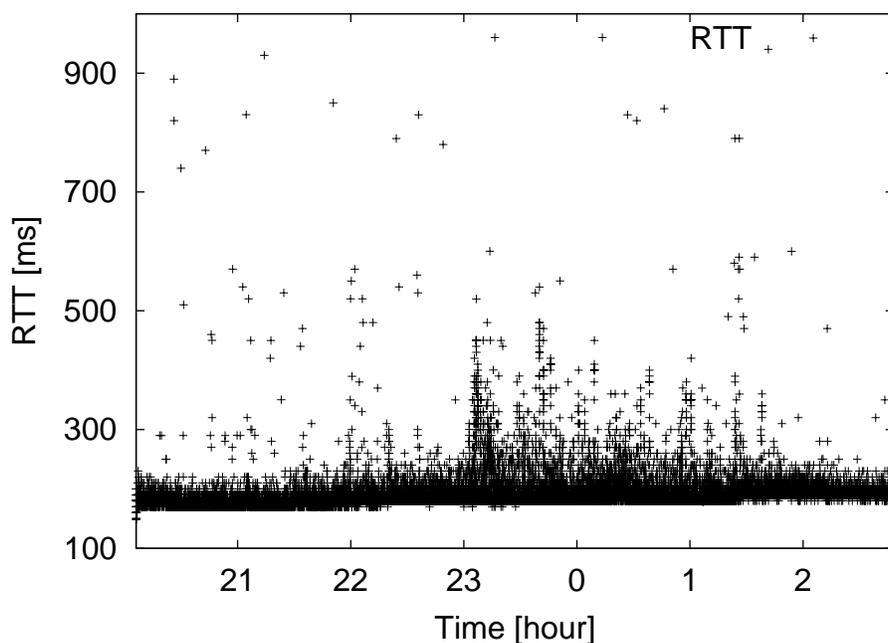
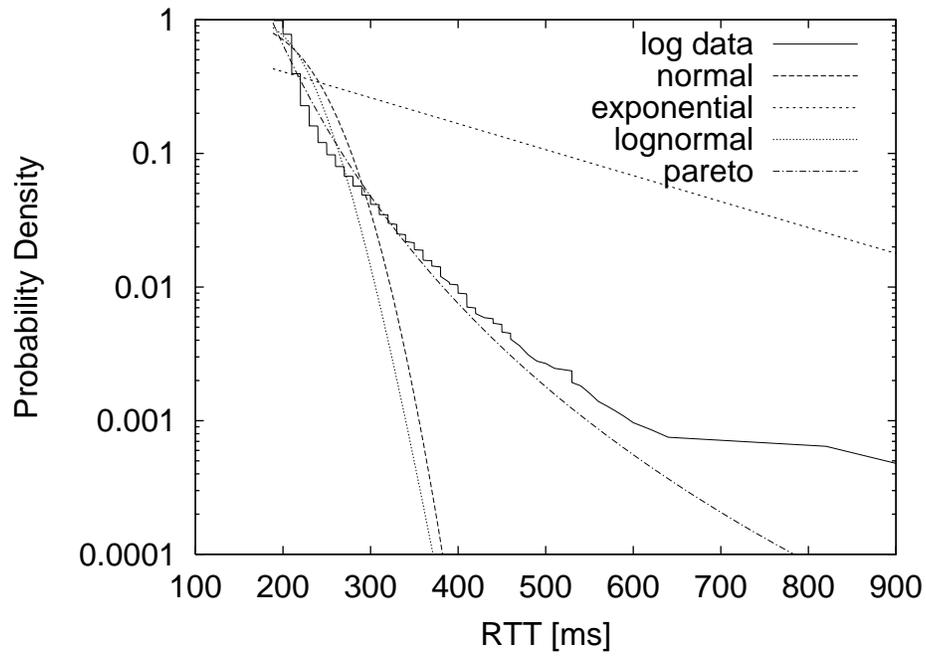
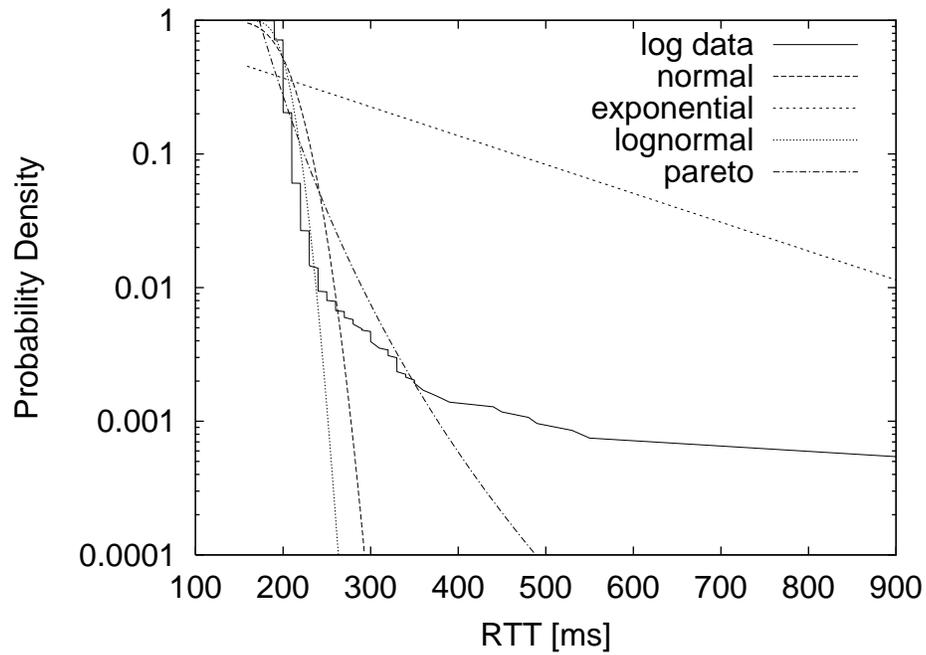


図 3: RTT 値の時間的な変化



(a) ネットワーク輻輳時



(b) ネットワークが空いている時

図 4: 回線状況による RTT 分布とモデル化の結果

表 2: 図 4 におけるモデル分布関数の判定値

		正規分布	指数分布	対数正規分布	パレート分布
輻轉して いる場合 (図 4(a))	χ^2	28.5833	137.807	26.0835	12.0201
	99%値誤差	61.969	-	68.307	23.035
	傾き	2.1e-4	-	-	6.7e-5
空いている 場合 (図 4(b))	χ^2	49.4674	638.23	37.5883	56.2454
	99%値誤差	16.945	-	6.172	37.491
	傾き	0.067	-	0.067	-

4.2 片方向伝搬遅延特性の分析結果

4.2.1 基本特性

実測データは、パケット送信間隔を 200ms にし、午後 11 時から 2 時間半の間にホスト間でパケットを送信することによって得た。このときの片方向遅延時間の変化を図 5 に示す。図 5 より、各時間帯における最小遅延時間が徐々に増加し、その値は時間に比例していることが分かる。これは、送受信ホスト間の時計のずれが関係している。すなわち、送信開始時に NTP により送受信ホストの同期が取れたとしても、長時間経過すると送受信ホストの時計の進み具合の違いによりこのような結果が発生する [17]。この図の場合、受信ホストの時計が送信ホストの時計よりも進んでいることが考えられる。ここでは、送受信ホスト間の時計のずれを比例であると仮定し [17]、この傾きを文献 [7, 6, 18] で帯域推定に用いられている最小 2 乗法により求めた。具体的には、この送受信ホスト間では、1 時間当り、355.734ms の時計のずれが求められた。この時計のずれを補正した片方向遅延時間の時間変化を図 6 に示す。以下用いている片方向遅延時間のサンプルデータは、同じ送受信ホスト間で計測したため、同じずれの傾きを用いて修正した。

次に、21 時から 4 時間半測定した遅延時間分布とその測定データを基にしてパラメータ推定した確率分布関数を図 7 に示す。図 7 より、片方向遅延時間の分布も RTT 同様にすそ

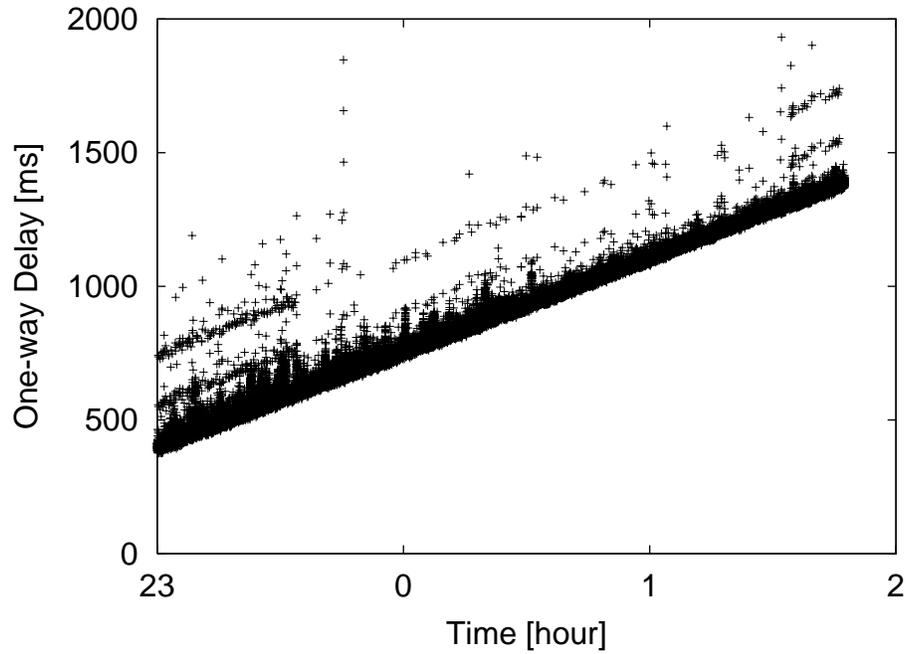


図 5: 送受信ホストの時計のずれ

の部分が広い分布になることが分かる。また、表 3 にモデル分布関数の判定結果を示した。ここで目標値 X として 99% 遅延時間を考えた。この表より、モデル分布関数の中で、RTT と同様に片方向遅延時間についてもパレート分布がモデルとして最適であると考えられ、実際に図 7 においてもパレート分布が最適であることが観測できる。

表 3: 図 7 におけるモデル分布関数の判定値

	正規分布	指数分布	対数正規分布	パレート分布
χ^2	49.4674	638.23	37.5883	56.2454
99%値	247.445	-	236.672	267.991
傾き	0.053	-	-	0.00026

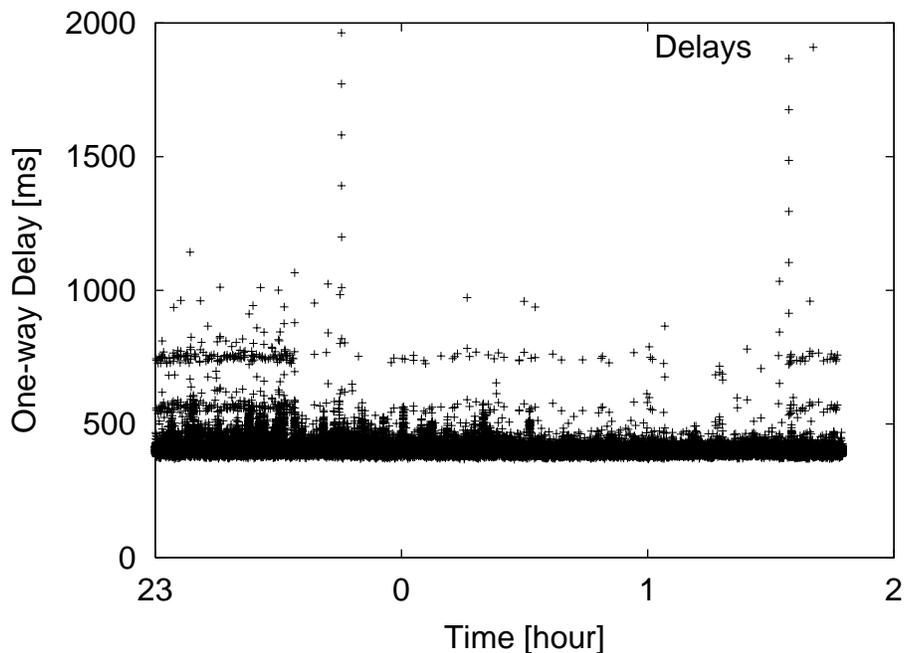


図 6: 時間補正後の片方向遅延時間

4.2.2 時間帯の影響

RTT の場合と同様に、時間帯の違いによる片方向遅延の変化を次に調べる。前節で示した図 5 より、RTT の場合と同様に 23 時付近の遅延時間が増加していることが分かる。この時間帯 (23 時から 33 分間) の片方向遅延特性を調べる。この時間帯における計測データは 10,000 個である。この時の片方向遅延の分布とパラメータ推定したモデル分布関数を図 8(a) に示す。表 4 にモデル分布関数の判定結果を示した。目標値 X は 99%遅延時間とする。また表中の NAN は値が大きすぎて計算出来ないことを示している。この表より、RTT の場合と同様にパレート分布がモデルとして最適であり、実際に図 8(a) においてもパレート分布が最適であることが観察できる。

次に、時間帯 0 時から 33 分間 (測定データ数 10,000 個) の片方向遅延時間分布とパラメータ推定したモデル分布関数を図 8(b) に示す。また、その時のモデル分布関数の判定結果を表 4 に示した。この時間帯では ISP に対するトラフィック量が小さく、図 8(b) より RTT と同

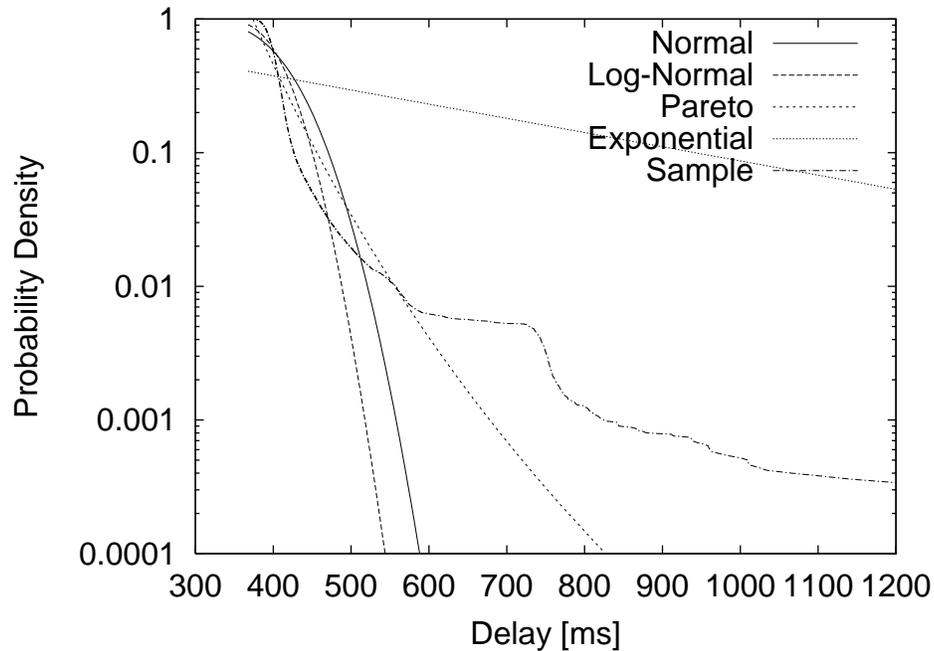
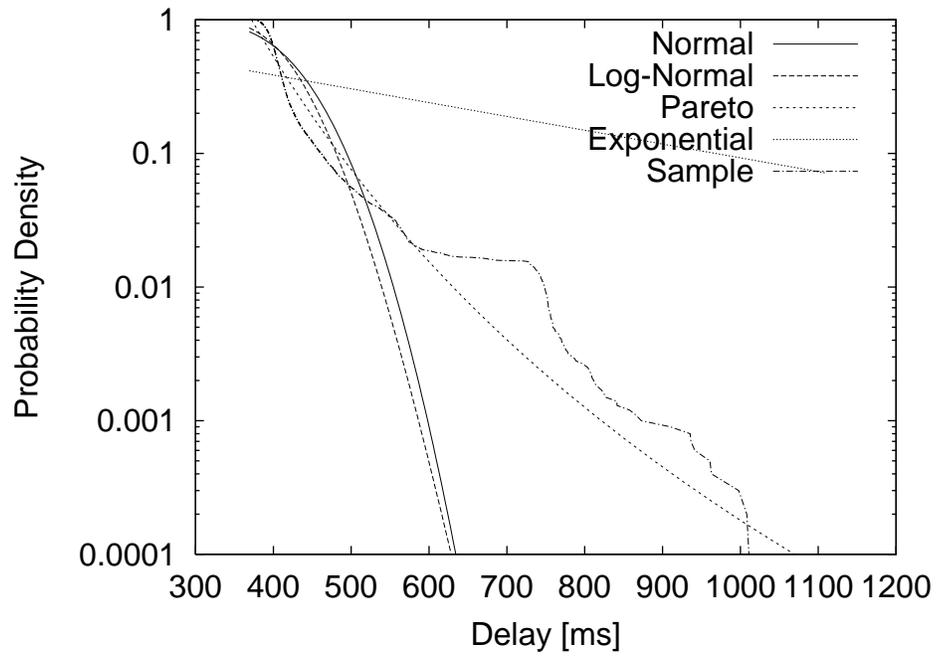


図 7: 片方向遅延分布とモデル分布

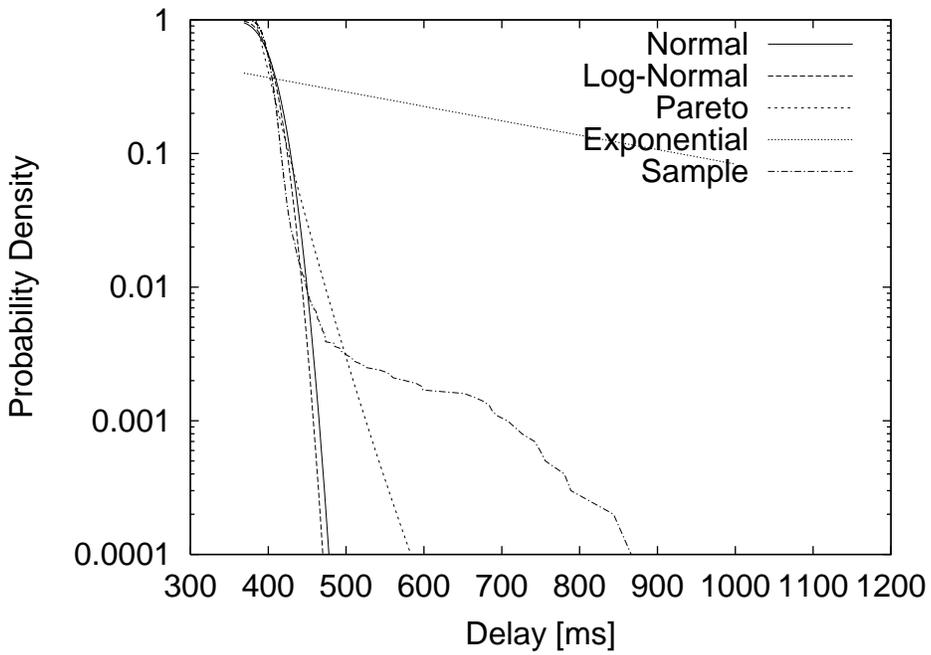
様に片方向遅延時間はすそのが広い分布を示しているが、目標値である 99%遅延の値が実測値と一番近いモデル分布関数は対数正規分布であり、またその近傍の傾きについても対数正規分布が一番近いことが分かる (表 4 参照)。しかしながら、正規分布との差がほとんどないことも分かった。以上のことから、RTT と片方向遅延時間についてその分布特性は、時間帯による影響については同様の傾向を示すことが分かった。

4.2.3 パケット送信間隔、計測時間の影響

前節までは遅延時間に関する一般的な特性を調べるため、パケット送信間隔として 200ms という比較的大きな値を用い、また計測についても 1 時間以上行った。本節では、次章で取り扱うストリーミングアプリケーションへの適用を考慮する。ストリーミングアプリケーションのパケット送信間隔は、小さく (例えば、20ms [1])、また通信時間についても数オーダーの場合も考えられる。そこで、パケット送信間隔を小さくし、また、計測時間を小さく



(a) ネットワーク輻輳時



(b) ネットワークが空いている時

図 8: 時間帯による片方向遅延時間分布とモデル化の結果

表 4: 図 8 におけるモデル分布関数の判定値

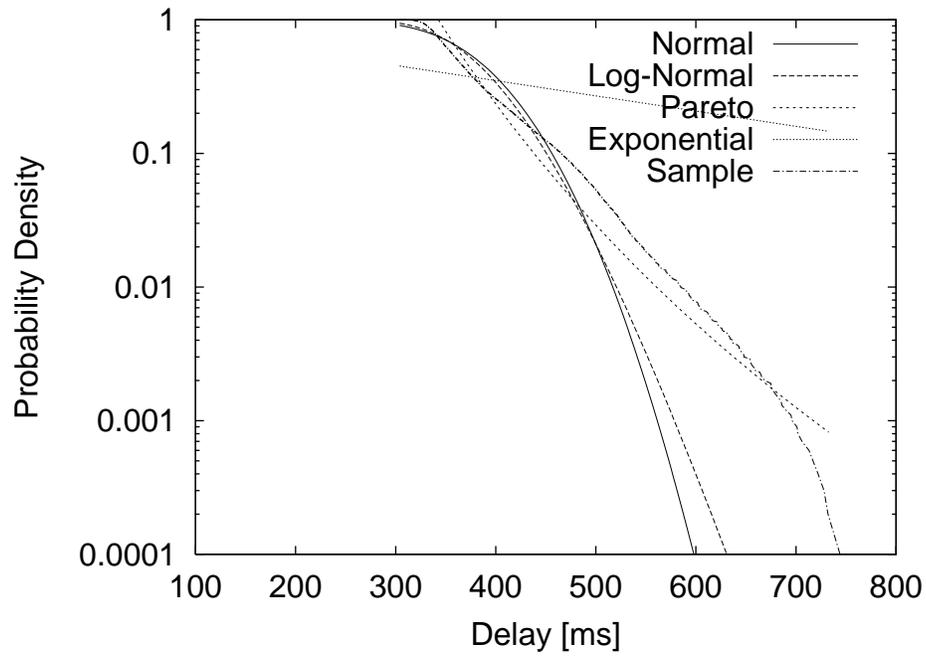
		正規分布	指数分布	対数正規分布	パレート分布
輻轉している 場合 (図 8(a))	χ^2	15.5961	16.6466	20.4766	0.699177
	99%値誤差	254	NAN	-	241
	傾き誤差	5.4e-4	-	-	1.3e-4
空いている 場合 (図 8(b))	χ^2	1.07399	25.7498	1.21156	0.429641
	99%値誤差	3	-	1	25
	傾き	0.0012	-	0.001	-

した場合の分布に与える影響を調べる。

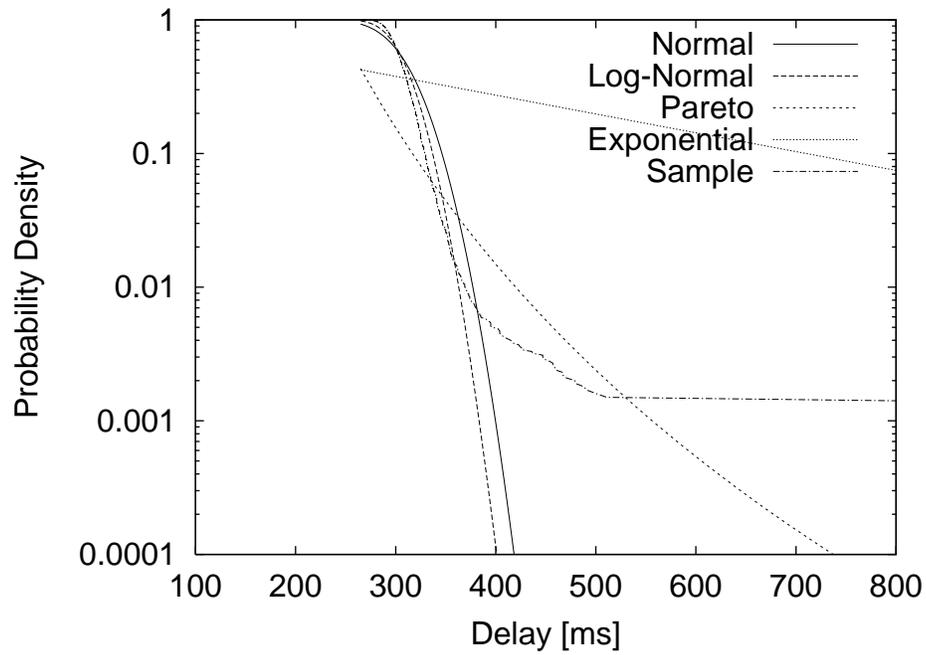
まず、23時に、パケット送信間隔を20msとし、10000パケット(3分20秒)を送信した場合の片方向遅延時間分布とモデル分布を図9(a)に、21時の場合を図9(b)に示す。図9(a)、9(b)より、パケット送信間隔、計測時間を小さくした場合でも、前節同様に、回線輻轉時についてはパレート分布が最適であり、回線が空いている場合は対数正規分布が最適なモデル分布関数であることがわかる。

表 5: 図 9 におけるモデル分布関数の判定値

		正規分布	指数分布	対数正規分布	パレート分布
輻轉している 場合 (図 9(a))	χ^2	22.0044	105.382	17.9717	8.33028
	99%値誤差	69	-	66	26
	傾き	-	-	0.00033	0.000176
空いている 場合 (図 9(b))	χ^2	15.5832	159.093	12.4852	52.8432
	99%値誤差	7	-	6	49
	傾き	0.00115	-	0.00115	-



(a) ネットワーク輻輳時



(b) ネットワークが空いている時

図 9: 送信間隔が小さい場合の片方向遅延時間分布とモデル化の結果

5 プレイアウト制御への適用

前章では、パケット遅延特性としてRTTならびに片方向遅延時間を分析、モデル化を行った。本章では、その応用として、ストリーミングアプリケーションにおけるプレイアウト時間の設定方法を提案し、その評価を行う。まず、ストリーミングアプリケーションにおけるプレイアウト時間の基本的な概念について説明し、その次に、プレイアウト制御を行うストリーミングメディアと実行環境を説明し、プレイアウト制御のアルゴリズムを説明する。最後に提案したプレイアウト制御について評価を行う。

5.1 プレイアウト時間の設定方法

i 番目のパケットのプレイアウト時間は図 10 のように表すことができる。

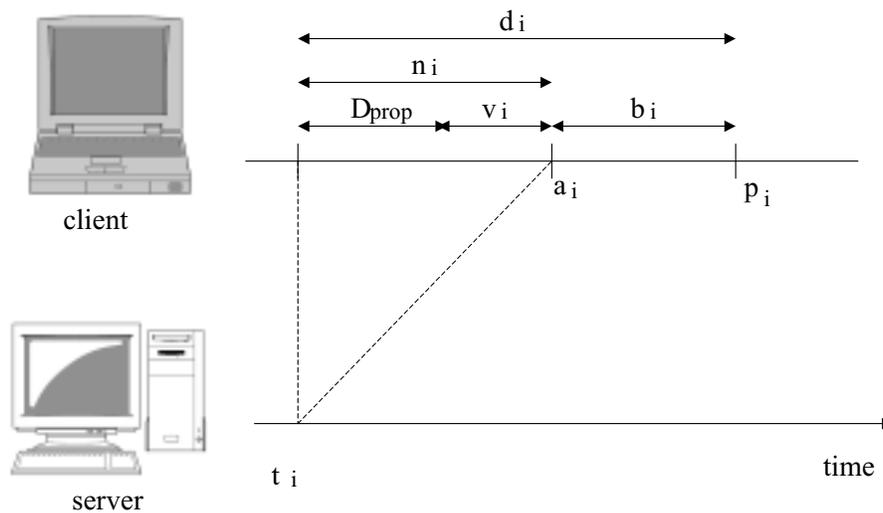


図 10: パケット送受信のタイミング

図 10 における記号の意味は、以下の通りである。

p_i : パケット i のプレイアウト (再生) 時間

t_i : 送信ホスト (サーバ) がパケット i を送信した時刻

D_{prop} : 送信ホストから受信ホスト (クライアント) までの伝搬遅延時間

v_i : パケット i の送信ホストから受信ホストまでのネットワークルータにおけるパケット待ち合わせ遅延の和

b_i : パケット i が受信ホストに到着してから再生されるまでに受信側ホストバッファで待つ時間

d_i : 送信ホストでパケット i を送信してから受信ホストでパケット i を再生できるまでに必要な時間 (プレイアウト遅延)

n_i : パケット i の片方向遅延時間

従って、プレイアウト遅延 p_i は、次の式のような関係式で表すことができる。

$$p_i = t_i + D_{prop} + v_i + b_i \quad (5)$$

受信ホストに到着したパケットはそのプレイアウト遅延 p_i が設定されたプレイアウト時間より小さければ再生され、逆に大きければ棄却される。

5.2 プレイアウト時間の制御方法

プレイアウト時間の制御方法を以下に述べる。プレイアウト時間の制御方法については、本報告では文献 [1] におけるプレイアウト時間の制御方法と提案方法の 2 つを説明する。

5.2.1 近似式を利用した方法 (文献 [1])

まず、文献 [1] におけるプレイアウト制御について紹介する。プレイアウト遅延 p_i を以下の式のように、遅延時間の平均 \hat{d}_i と遅延時間の偏差 \hat{v}_i を用いて設定する。

$$p_i = t_i + \hat{d}_i + 4 * \hat{v}_i$$

文献 [1] では、偏差 \hat{v}_i を 4 倍するのは、プレイアウト遅延を十分大きな値にするためとしている。

以下、遅延時間の平均 \hat{d}_i ならびに 偏差 \hat{v}_i を求めるアルゴリズム 4 つのうち 2 つをここで取り扱う。

- アルゴリズム 1

まず、アルゴリズム 1 では、遅延時間の平均 \hat{d}_i と偏差 \hat{v}_i を以下の式で求めている。

$$\hat{d}_i = \alpha * \hat{d}_{i-1} + (1 - \alpha) * n_i \quad (6)$$

$$\hat{v}_i = \alpha * \hat{v}_{i-1} + (1 - \alpha) * |\hat{d}_{i-1} - n_i| \quad (7)$$

平均の導出は文献 [19] の手法に従うものであり、分散の導出は文献 [20] の TCP 再送タイマーにおける RTT の推定方法の手法を用いている。重み α は経験値として 0.998002 が良いとされている。このアルゴリズムの場合、平均、分散はパケットが到着の度に逐次的に求められるので、計算に必要なデータ量が少なく、また平均、分散の計算も簡単である。

- アルゴリズム 2

アルゴリズム 1 と基本的に同じである。ただし、もし、到着したパケットの遅延時間 d_i がそれ以前の平均値 \hat{d}_{i-1} より大きい場合、最近の遅延時間データについて α をアルゴリズム 1 よりも小さな値にする点がアルゴリズム 1 と異なる。その結果、最新の遅延時間データ d_i の重み付けが増加しているので通信途中に遅延時間が大きくなった場合にプレイアウト遅延も大きくすることができ、その結果パケット再生率が高くなることが期待される。

5.2.2 提案手法

本節では、4 章で求めたモデル分布関数からプレイアウト遅延時間 p_i を求める手法を提案する。

- アルゴリズム 3

アルゴリズム 3 では、プレイアウト遅延時間 p_i は、到着したパケットから過去 x 個 (もしくは、過去 x 時間) のすべてのパケット転送遅延時間よりパラメータ推定を行い分布関数にモデル化を行う。ただし、4 章で示したように、ネットワークの状況によって最適モデル分布関数は異なっているため、ネットワークが空いている状況では対数正規分布でモデル化を行い、混んでいる状況ではパレート分布でモデル化を行う。モデル分布関数を求めた後、パケット再生率の目標値を定める。以下のシミュレーション評価では、この値を $r=99, 99.5, 99.9\%$ とする。この場合、モデル分布関数の累積分布関数 $F(p) = r$ になる p をプレイアウト遅延時間として定める。なお、ネットワークの利用状況を示す指標としてはさまざまなものが考えられるが、ここでは時刻で判断するものとする。

- アルゴリズム 4

アルゴリズム 3 では、プレイアウト時間を設定する時に分布関数のモデル化を行う。ただし、パラメータ推定のため、その時点より過去 x 個 (もしくは過去 x 時間) のデータが必要となるため、多くの遅延時間データを保存する必要があり、また、分布関数のモデル化ならびに目標値の計算のオーバーヘッドも無視できない。

そこで、アルゴリズム 4 では、アルゴリズム 1 と同じく、近似式によって平均ならびに偏差をパケット到着毎に逐次的に求め (すなわち、式 (6)(7) を適用する)、さらにパレート分布のパラメータをこの平均、偏差を利用して近似的に求め、逐次的に求めたパレート分布の累積分布関数 $F(p)$ がパケット再生率の目標値と一致するような p をプレイアウト遅延時間として定める。パレート分布の平均、偏差はそのパラメータより以下の式で定められる。

$$\hat{d}_i = \frac{ak}{a-1}, \quad a > 1 \quad (8)$$

$$\hat{v}_i = \frac{ak^2}{(a-1)^2(a-2)}, \quad a > 2 \quad (9)$$

すなわち、パレート分布のパラメータを以下の式で定める。

$$a = 1 + \sqrt{1 + \frac{\hat{d}_i^2}{\hat{v}_i}}, \quad a > 1 \quad (10)$$

$$k = \frac{\sqrt{1 + \frac{\hat{d}_i^2}{v_i}}}{1 + \sqrt{1 + \frac{\hat{d}_i^2}{v_i}}}, \quad a > 2 \quad (11)$$

上の近似パラメータを用いてパレート分布の累積分布関数を求める。本アルゴリズムで必要なのは逐次的に計算される平均、分散だけなので、データ量、計算時間ともに少なく、ストリーミングアプリケーションに適していると考えられる。

なお、対数正規分布は累積分布関数が複雑であり、計算時間がかかると考えられるため、本報告では対数正規分布を利用せず、パレート分布の制御を考える。

5.3 適用結果とその評価

5.3.1 シミュレーション環境

2章では片方向のストリーミングアプリケーションとして2つのメディアについて述べたが、ここではそのうち連続メディアを考える

以下、測定したトレースデータの実行環境を説明する。

- ストリーミング方式 (連続メディア)
 - パケットサイズは 70byte。
 - パケットは 20msec 毎に送信される。
 - パケットには送信時にタイムスタンプが押され、受信ホストでそのパケットの片方向遅延時間が計算される。

プレイアウト遅延時間の設定方法としてはパケットが到着する毎にプレイアウト時間を設定し、各プレイアウト時間はその次に到着するパケットのみに有効とする。

5.3.2 評価結果

本節ではシミュレーションを行った結果より各プレイアウト制御の評価を行う。本報告ではプレイアウト時間とパケット再生率を評価の対象とする。すなわち、プレイアウト時間は

アプリケーションの実時間性向上のため、短い方がよい。一方、パケット再生率は再生品質の向上になるためその確率が高いことを評価の主眼とする。

まず、回線輻輳時 (23 時) のトレースデータ (図 11(a)) を用いた場合の各アルゴリズムのパケット再生棄却率ならびにプレイアウト遅延時間を表 6 に示す。表 6 より、平均パケット再生棄却率が一番低いのはアルゴリズム 2 であるが、逆に平均プレイアウト時間は最大の値を示している。また、平均パケット再生棄却率が最大を示すのはアルゴリズム 4 ($r=99\%$) であるがその場合の平均プレイアウト時間は最小の値を示している。従って、プレイアウト時間とパケット再生棄却率のトレードオフの関係にあることがこの結果からもわかる。しかしながら、アルゴリズム 1、2 は、パケット再生棄却率を目的の値に正しく設定ができないことが考えられる。一方、アルゴリズム 3 では、例えば、目標値 r を 99% に設定するとパケット再生棄却率が 1.16615 と目標の値である $1-r$ に近い値が達成可能であり、また他の目標値の場合も同様の結果が得られている。ただし、アルゴリズム 3 は前節で述べた通り、計算時間やデータ量が多くなり、実際のストリーミングアプリケーションへの適用には不向きであると考えられる。その点で、逐次処理でプレイアウト制御ができ、実際のストリーミングアプリケーションにも適用可能であると考えられるアルゴリズム 4 の場合、アルゴリズム 3 に比べると目標値 $1-r$ との誤差は大きいですが、目標値を大きく見積もることによって、パケット再生率を上げることは可能であり、アルゴリズム 1、2 よりも目標品質に設定することが容易であることにはかわりはない。

次に、回線が空いている時 (16 時) のトレースデータを用いた場合の各アルゴリズムのパケット再生棄却率ならびにプレイアウト遅延時間を表 7 に示す。この場合、アルゴリズム 3 は対数正規分布により 99% 遅延時間を求めている。回線が混んでいる場合と違い、アルゴリズム 4 の 99% よりもアルゴリズム 3 の場合のほうが、パケット再生棄却率と目標値 1% との誤差が大きい結果になった。これは、たとえ 99% 付近のモデル化において対数正規分布がパレート分布よりも適合性が高い場合でも、片方向遅延時間の分布のすその部分が大きいためにアルゴリズム 3 ではパケット再生率が高くなったと考えられる。一方、アルゴリズム 4 では目標値 r を大きくすれば、目標値との誤差が小さくなることが分かる。これは、分布のすその部分が大きいので、目標値を大きくすればパレート分布との適合がより適正に行われ

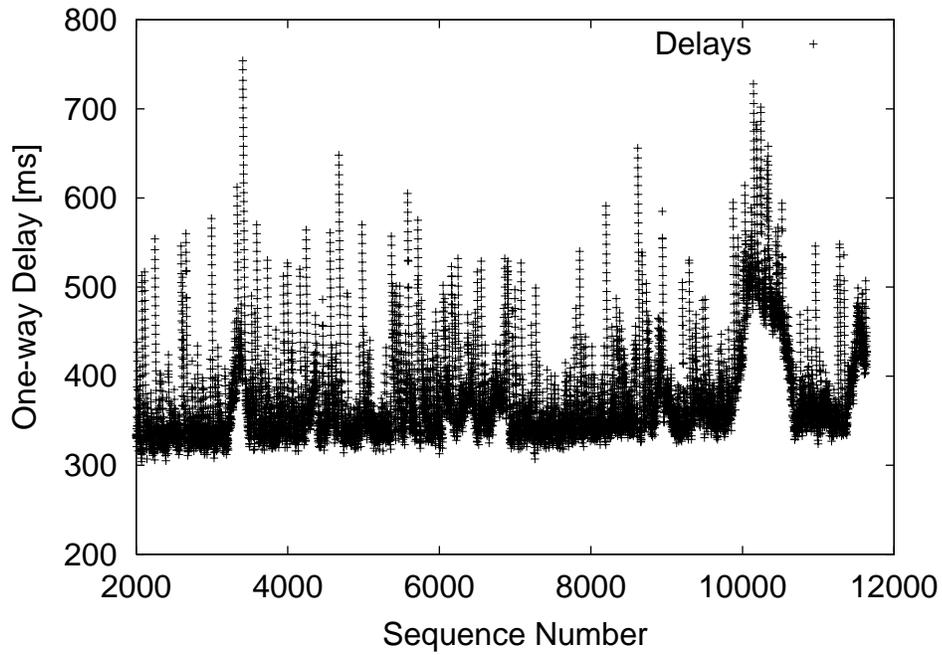
るためである。したがって、アルゴリズム 3 においても目標値に近づけるためには、目標値
 付近の適合をパレート分布によりモデル化する必要がある。

表 6: シミュレーション結果 (ネットワーク輻輳時)

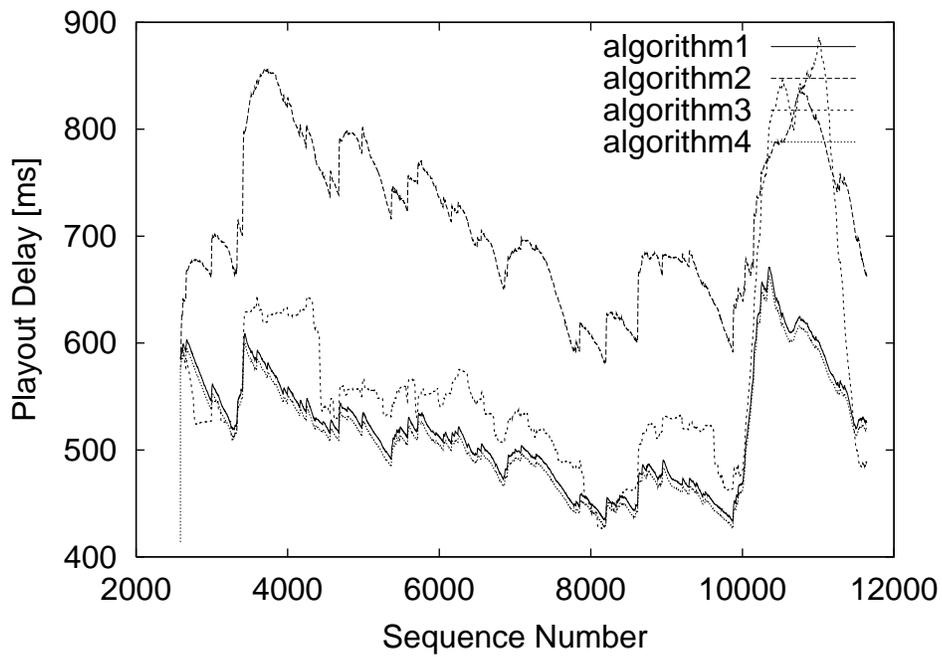
アルゴリズム	再生棄却率 [%]	平均プレイアウト時間 [ms]
1	1.88805	520.935
2	0.0333185	754.007
(99%値)	1.16615	570.588
3 (99.5%値)	0.555185	625.692
(99.9%値)	0.088829	777.313
(99%値)	2.17681	513.54
4 (99.5%値)	1.14368	549.839
(99.9%値)	0.266489	644.748

表 7: シミュレーション結果 (ネットワークが空いている時)

アルゴリズム	再生棄却率 [%]	平均プレイアウト時間 [ms]
1	1.07125	752.125
2	0.298954	808.298
3 (99%値)	2.3418	744.258
(99%値)	1.49477	747.95
4 (99.5%値)	0.896861	756.46
(99.9%値)	0.498256	776.597



(a) トレースデータ



(b) 各アルゴリズムのプレイアウト制御の様子

図 11: 遅延時間とプレイアウト時間の変化

6 おわりに

本報告では、パケット転送遅延の計測を行い、確率分布関数によるモデル化を行った。その結果、全体の遅延時間分布についてはパレート分布が最も適合することを明らかにした。さらに、ネットワークの混雑状況を考慮して時間帯ごとの特性を調べ、分布のすその部分については、ネットワークが混雑している時にはパレート分布がもっとも適していることが分かった。一方、ネットワークが空いている時には分布のすその部分が小さい対数正規分布が適合していることが分かった。さらに、モデル化の応用例として、実時間アプリケーションにおけるプレイアウト制御に適用した。モデル化によって得られた分布をもとにしたプレイアウト制御を新たに提案し、提案方式では、パケット再生率を目的の値に近づけ、かつその場合のプレイアウト遅延を最小化できることが分かった。

本報告では、全体のサンプルデータによりモデル分布のパラメータ推定を行った。しかしながら、パケット転送遅延時間の特性としては、回線状況によらず分布のすその部分は大きい分布特性を示していた。そこで、今後の研究課題としては、パレート分布のパラメータ推定を行う際に分布のすその部分のみでパラメータ推定を行い、より分布への適合性の高いモデル分布を求めることが考えられる。また、今回モデル候補に挙げていない第2種パレート分布（ロマックス分布）、第3種パレート分布等のよりすその部分が大きい分布をモデル候補として調べる必要もある。さらに、ストリーミングアプリケーションの評価において、片方向遅延時間の測定は、送受信ホスト間の時計の同期は第3のホストであるNTPサーバとの同期により同期をとることで求めたが、実際には、送受信ホスト間で同期をとる必要がある。また、今後は、実際のメディアの転送のトレースデータを用いた評価が必要である。

謝辞

本報告を終えるにあたり、村田正幸教授より御指導、御教授頂いたことに心より感謝致します。また、本報告において長谷川剛助手には日頃から熱心な御指導を授かり心からお礼を申し上げます。本報告を行うにあたって、大阪大学大学院基礎工学研究科の宮原秀夫教授、大阪府立看護大学医療技術短期大学部の菅野正嗣助教授、大阪大学大型計算機センターの馬場健一助教授、大阪大学大学院基礎工学研究科の若宮直紀講師、大阪大学情報処理教育センターの大崎博之助手からも御指導及び御助言を頂き深く感謝の意を申し上げます。さらに本報告を行うにあたって御助言及び御協力頂いた大阪大学基礎工学部情報科学科宮原研究室の阿多信吾氏、渡辺啓氏に深く感謝致します。

最後になりましたが、御協力頂いた大阪大学基礎工学部情報科学科村田研究室の皆様にも心より感謝致します。

参考文献

- [1] R. Ramjee, J. Kurose, D. Towsley, and H. Schulzrinne, “Adaptive playout mechanisms for packetized audio applications in wide-area networks,” *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pp. 680–688, 1994.
- [2] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson, “RTP: A transport protocol for real-time applications,” *Internet RFC 1889*, January 1996.
- [3] S. Savage, A. Collins, and E. Hoffman, “The end-to-end effects of Internet path selection,” *Proceedings of ACM SIGCOMM*, pp. 289–299, September 1999.
- [4] J.-C. Bolot, “Characterizing end-to-end packet delay and loss in the Internet,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, (San Fransisco), pp. 289–298, September 1997.
- [5] V. Paxson, “End-to-end internet packet dynamics,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, (Cannes), pp. 139–152, September 1997.
- [6] B. A. Mah, “pchar: A tool for measuring Internet pathcharacteristics,” <http://www.ca.sandia.gov/~bmah/Software/pchar>.
- [7] A. B. Downey, “Using pathchar to estimate Internet link characteristics,” *Proceedings of ACM SIGCOMM*, pp. 241–250, August 1999.
- [8] J. Postel, “Internet Control Message Protocol darpa internet program protocol specification,” *Internet RFC 792*, September 1981.
- [9] D. L. Mills, “Network Time Protocol (version 3) specification, implementation and analysis,” *Internet RFC 1305*, March 1992.
- [10] V. Paxson and S. Floyd, “The failure of Poisson modeling,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM '94*, pp. 257–268, 1994.

- [11] 名部正彦, 馬場健一, 村田正幸, 宮原秀夫, “インターネット・アクセスネットワーク設計のための WWW トラフィックの分析とモデル化,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J80-B-I, no. 6, pp. 428–437, 1997.
- [12] S. Ata, M. Murata, and H. Miyahara, “Analysis of network traffic and its application to design of high-speed routers,” to appear in *IEICE Transactions on Information and Systems (D-I)*, May 2000.
- [13] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. Wilson, “On the self-similar nature of ethernet traffic,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM '93*, pp. 183–193, 1993.
- [14] M. E. Crovella and A. Bestavros, “Self-similarity in World Wide Web; traffic evidence and possible causes,” in *Proceedings of ACM SIGMETRICS '96*, pp. 160–169, 1996.
- [15] V. Paxson, “Empirically-derived analytic models of wide-area TCP connections,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 2, pp. 316–336, August 1994.
- [16] S. Pederson and M. Johnson, “Estimating model discrepancy,” *Technometrics*, pp. 305–314, 1990.
- [17] Vern Paxson, *Measurements and Analysis of End-to-End Internet Dynamics*. PhD thesis, University of California at Berkeley, April 1997.
- [18] K. Matoba, S. Ata, and M. Murata, “Improving bandwidth estimation of Internet links by statistical methods,” submitted to *INET 2000*, January 2000.
- [19] J. Postel, “Transmission control protocol specification,” *Internet RFC 793*, September 1981.
- [20] V. Jacobson, “Congestion avoidance and control,” *Proceedings of ACM SIGCOMM*, pp. 314–329, August 1988.