

# 実時間アプリケーションのためのパケット転送遅延の分析と プレイアウト制御への適用

Playout Control for Streaming Applications by Statistical Delay Analysis

藤本 康平 †  
Kohei Fujimoto

阿多 信吾 ‡  
Shingo ATA

村田 正幸 †  
Masayuki MURATA

† 大阪大学 大学院基礎工学研究科

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

‡ 大阪市立大学 工学部

Faculty of Engineering, Osaka City University

## 1 はじめに

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としてパケット転送遅延が挙げられる。実際に、TCP やストリーミングアプリケーションにおいて通信品質を考慮した転送を行なうには、パケット転送遅延時間の予測が必要であり、特にパケットロスを検知するためには、遅延分布のすその部分の特性を明らかにすることが重要となる。本稿では、まず測定ツールを用いてパケット転送遅延を測定し確率分布関数による分布のモデル化を行う。統計分析では、特に分布のすその部分に着目し、時間帯による遅延特性の変化や確率分布のパラメータ推定のモデル化における精度も明らかにする。その結果、パレート分布が遅延分布のモデルとして最適であることを示す。さらに、統計分析の結果をストリーミングアプリケーションに適用し、ユーザの要求する通信品質を実現できるプレイアウト制御アルゴリズムを提案する。また、数値結果により提案アルゴリズムの有効性を示す。

## 2 パケット転送遅延時間の測定方法

本章では、本稿で用いたパケット転送遅延時間の測定方法について説明する。以下では、まず RTT、片方向遅延時間の測定手法を示し、次に実際の測定環境について述べる。

### 2.1 RTT の測定方法

本稿では、pchar [1] を利用して RTT を測定する。また pchar を用いることで、測定中のルーティング変更の有無やパケットロス率を調べることもできる。

### 2.2 片方向遅延時間の測定方法

片方向遅延時間を測定するために、本稿ではサーバクライアント型のツールを作成した。まず送信ホストはパケットを送信する直前にパケットに現在の時刻を書き込む。受信ホストにパケットが到着した時、受信ホストはパケットを受信した時刻とパケットに記録された時刻の差より片方向遅延時間を求める。また測定中は、GPS を用いて送受信ホストを同期させる。

### 2.3 測定環境

本稿では、測定ホストを 28.8Kbps モデムにより電話回線を通じて ISP に接続し、日本の有名な WWW サーバを目的ホストとして RTT の計測を行った。次に、受信ホストを 28.8Kbps モデムで ISP に接続し、送信ホストを大阪大学の LAN に接続して片方向遅延時間を測定した。測定は RTT を 2000 年 1 月に、片方向伝搬遅延を 2000 年 7 月に行った。また、次に挙げる二つの遅延時間特性がモデル化に及ぼす影響について調査した。

- 時間帯による影響: インターネットにおけるトラフィックのパターンは毎日繰り返される [2] ことから、一日の時間帯が異なる場合のモデル化の結果の影響について調査する。
- タイムスケールの影響: 短いタイムスケールでパラメータ推定を行うと、推定に誤差が生じ遅延分布とモデル化された確率分布の適合性が低下してしまう可能性が考えられる。よって推定誤差が少ないパラメータ推定区間を調べる必要がある。

表 1: モデル分布の判定結果

Measurement Type	Hour	Result of $\chi^2$ -test			
		Nor.	Exp.	Lognor.	Pareto
RTT	11 PM	122.2	471.5	103.5	<b>74.3</b>
RTT	1 AM	157.2	2189.3	139.4	<b>49.8</b>
RTT	7 AM	292.3	3598.5	240.5	<b>124.0</b>
RTT	2 PM	147.0	599.3	250.5	<b>56.2</b>
One-way	11 PM	53.8	470.9	49.6	<b>30.1</b>
One-way	1 AM	55.0	426.4	49.9	<b>24.0</b>
One-way	9 AM	107.7	754.0	98.7	<b>45.3</b>
One-way	3 PM	109.0	336.4	85.4	<b>21.2</b>

## 3 パケット転送遅延時間分布のモデル化

本章では、実測により得られた遅延分布に対して確率分布関数によるモデル化を行う手法を示す。ここでは、telnet や ftp のトラフィックを分析した文献 [3] の統計的手法を用いて、対象となる分布を確率分布関数にモデル化する。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 候補とする確率分布関数とパラメータ推定

本稿では、遅延時間分布を表すための確率分布関数として正規分布、指数分布、対数正規分布、パレート分布 をモデル関数の候補とする。

パケットの遅延分布からパケットロスを検知するためには、分布のすその部分の変動を詳しく知る必要がある。そこで、モデル候補の確率分布を遅延分布のすその部分と正確に適合させるために、得られた遅延分布のうちすその部分 (例えば確率密度が 90–99.9% の区間) のみに含まれるサンプルデータを用いてパラメータ推定を行う。また各分布関数のパラメータは最尤法を用いて推定する。

### 3.2 モデル分布の判定方法

本稿では、遅延分布の最適モデルを  $\chi^2$  検定 [4] によって候補の確率分布から選定する。これまで述べてきたように、アプリケーションへの適用を考慮に入れると、重要となるのは遅延分布のすその部分である。従って、遅延分布の確率密度が 95–99.9% の区間における遅延分布とモデル分布の適合性が特に重要であり、 $\chi^2$  検定でこの区間の適合性を調べる。

$\chi^2$  検定では指標  $\hat{\lambda}^2$  の値が小さいほど、遅延分布とモデル候補の分布との差が少ないことを示す。すなわち、 $\hat{\lambda}^2$  の値が最も小さい確率分布がモデルとして最適であると判定される。

## 4 分析結果

本章では、前章で述べた統計手法を用いて、遅延分布の確率分布関数によるモデル化結果を示す。

### 4.1 遅延分布のモデル化結果と時間帯による影響

表 1 に測定データに対する  $\chi^2$  検定の結果を示す。この表では、1 列目に遅延の種類、2 列目に測定を行った時間帯を示し、3–6 列目にモデル候補となる各確率分布における  $\hat{\lambda}^2$  の値を示している。またネットワークが混雑している時間帯におけるモデル化結果の例として、パラメータ推定を行って得られたモデル候補の分布と遅延分布を図 1 に示す。図 1 は表 1 の 1 行目で示されている結果と同じデータ

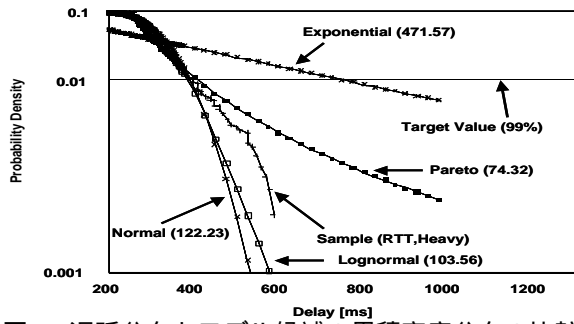


図 1: 遅延分布とモデル候補の累積密度分布の比較

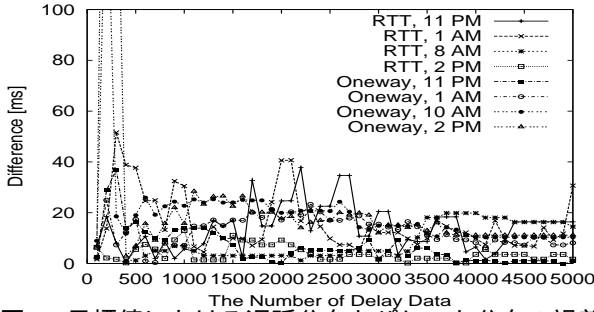


図 2: 目標値における遅延分布とパレート分布の誤差

を用いており、分布のすその部分のみを表示している (具体的には累積密度が 0.1–0.01 にあたる区間のみを表示している)。なお、表 1、図 1 では再生品質の目標値を 99% に設定した。

表 1 より全ての検定結果においてパレート分布の検定指標  $\hat{\lambda}^2$  がモデル候補の確率分布のなかで最小値である。この結果より、ネットワークが混雑している時間帯、空いている時間帯に関わらず、パレート分布が遅延分布のモデルとして最適であることが分かる。

#### 4.2 パラメータ推定区間のモデル化に及ぼす影響

次に、パラメータ推定に用いる遅延分布におけるサンプルデータ数を変更した場合のモデル化に及ぼす影響について調べる。図 2 は、RTT と片方向遅延のサンプルデータ数に対するパレート分布と遅延分布の目標値における差である。ここでは目標値を 99% に設定した。図よりサンプルデータ数が 500 未満の場合は遅延分布とパレート分布の差が極端に大きくなる場合があることが分かる。プレイアウト制御における実時間パラメータ推定を行う場合、パラメータ推定の処理を軽減するためには、サンプル数を可能な限り少なくすることが望まれるため、パラメータには 500 個のサンプルデータ数を用いる。

### 5 プレイアウト制御アルゴリズムへの適用

本章では、前章の統計分析で得られた結果を基にして、プレイアウト時間の設定を行う制御アルゴリズムを提案する。さらに、提案したアルゴリズムをトレースデータによるシミュレーションによって評価する。

#### 5.1 提案アルゴリズム

提案するアルゴリズムでは、過去一定期間の  $n$  個のパケットの片方向遅延の値を記録ながら、パケットの到着ごとにパレート分布の累積密度関数  $F(x)$  のパラメータを過去  $n$  個のデータより推定し、プレイアウト時間  $p_i$  を算出する。パケット  $i$  のプレイアウト時間  $p_i$  は、要求されるパケットロス率を累積密度で表した値を  $X$  とすると、 $F(p_i) = X$  となる値に設定される。本稿では、パケット再生率を 95, 99, 99.9% と設定する。

#### 5.2 アルゴリズムの性能評価

プレイアウト制御アルゴリズムの性能評価では、文献 [5] で提案されている 2 つのアルゴリズムと比較を行い、提案アルゴリズムの効果を示す。以降では本稿で提案したア

表 2: パケットロス率 (PLR) の比較

Algorithm	Target	PLR[%]	Mean Playout[ms]
1	95%	5.12	245.96
	99%	1.36	311.19
	99.9%	0.13	897.89
2	-	2.46	261.14
3	-	0.23	455.45

ルゴリズムをアルゴリズム 1、文献 [5] で提案されている 2 つのアルゴリズムをアルゴリズム 2, 3 とする。文献 [5] のプレイアウト制御アルゴリズムの一つであるアルゴリズム 2 はプレイアウト遅延  $p_i$  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。

$$p_i = t_i + \hat{d}_i + 4 * \hat{v}_i. \quad (1)$$

アルゴリズム 3 はアルゴリズム 2 に修正を加えたアルゴリズムであり、遅延の値がこれまでの平均遅延より大きい場合はアルゴリズム 2 よりプレイアウト時間を大きく設定する。

次に、パケットの片方向遅延測定で収集したデータを用いたトレース駆動型シミュレーションの手法について説明する。インターネットで接続された送受信ホスト間においてパケット長を 160 Bytes、送信間隔を 80 msec としてパケットを実際に送信し、受信側で片方向遅延を測定した。シミュレーションでは、パケットが設定したプレイアウト時間以内に到着したかどうかを調べ、もし到着していなければパケットロスとみなす。

表 2 はネットワークが混雑している時間帯における各アルゴリズムの平均パケットロス率 (PLR) を示している。アルゴリズム 1 では目標とするパケット再生率として 95, 99, 99.9 % を設定した場合についてそれぞれのパケットロス率を求めている。この表よりパケットロス率とプレイアウト遅延はトレードオフの関係にあることが明らかである。表より提案したアルゴリズム 1 は期待するパケットロス率をほぼ達成できていることが分かる。

### 6 まとめと今後の課題

本稿では、パケット遅延時間を測定し、モデル化を行うことで、遅延時間特性、特に遅延時間のすその部分の特性を明らかにした。分析の結果、パレート分布が RTT、片方向遅延の両方において最適なモデルであることが分かった。さらに、モデル化の適用例として、モデル化によって得られた分布にもとづくプレイアウト制御の提案を行った。数値結果より、提案方式では目標とする再生品質を達成できるプレイアウト制御が行えることが分かった。

本報告では、提案アルゴリズムの実時間性についてはプレイアウト時間を算出するのに必要な処理数を考察しているのみである。そこで実際に、実時間アプリケーションに提案アルゴリズムを実装してその性能評価を行う必要がある。

### 参考文献

- [1] B. A. Mah, “pchar: A tool for measuring Internet path characteristics,” <http://www.ca.sandia.gov/~bmah/Software/pchar/>.
- [2] K. Thompson, G. J. Miller, and R. Wilder, “Wide-area Internet traffic patterns and characteristics,” *IEEE Network*, pp. 10–23, November 1997.
- [3] V. Paxson and S. Floyd, “Wide-area traffic: The failure of Poisson modeling,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM '94*, pp. 257–268, August 1994.
- [4] S. Pederson and M. Johnson, “Estimating model discrepancy,” *Technometrics*, vol. 32, pp. 305–314, August 1990.
- [5] R. Ramjee, J. Kurose, D. Towsley, and H. Schulzrinne, “Adaptive playout mechanisms for packetized audio applications in wide-area networks,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM '94*, pp. 680–688, April 1994.