# システム同定を用いたインターネットの パケット伝送遅延時間のモデル化に関する検討

森田 光茂† 大崎 博之‡ 村田 正幸‡

† 大阪大学 大学院基礎工学研究科
〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
Phone: 06-6850-6616, Fax: 06-6850-6589
E-mail: m-morita@ics.es.osaka-u.ac.jp

‡ 大阪大学 サイバーメディアセンター
〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-30
Phone: 06-6879-8793, Fax: 06-6879-8794
E-mail: {oosaki,murata}@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし インターネットにおける、エンド–エンド間のパケット伝送遅延時間の特性を知ることは、アプリケーションの QoS (サービス品質) を向上し、効率的な輻輳制御を実現するために重要である。我々はこれまで、インターネットのパケット伝送遅延時間を測定し、システム同定を用いてその動的な特性をモデル化する手法を提案した。そこでは、システム同定に用いる入出力データとして、送信側ホストからのパケット送信間隔、およびパケットごとのラウンドトリップ時間の差分を用いていた。本稿では、システム同定に用いる入出力データとして、一定のサンプリング周期ごとに測定した、送信側ホストからのパケット送信レート、およびラウンドトリップ時間の平均値を用いることにより、モデル精度の向上を図っている。さらに、LAN 環境および WAN 環境で実際に測定した入出力データを用いてモデル化を行い、ラウンドトリップ時間の変動がどの程度正確にモデル化できるかを明らかにしている。結果として、LAN 環境では、ほぼ正確にラウンドトリップ時間の変動をモデルできることを示している。また、WAN 環境では、ボトルネックリンクが少数のユーザで共有されている場合、ラウンドトリップ時間の変動をうまくモデル化できることを示している。
和文キーワード パケット伝送遅延時間、システム同定、ARX (Auto-Regressive eXogenous) モデル

# On Modeling Packet Delay Dynamics of the Internet using System Identification

Mitsushige Morita† Hiroyuki Ohsaki‡ Masayuki Murata‡

†Graduate School of Engineering Science, Osaka University
1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, Japan
Phone: +81-6-6850-6616, Fax: +81-6-6850-6589
E-mail: m-morita@ics.es.osaka-u.ac.jp

‡Cybermedia Center, Osaka University
1-30 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, Japan
Phone: +81-6-6879-8793, Fax: +81-6-6879-8794
E-mail: {oosaki, murata}@cmc.osaka-u.ac.jp

**Abstract** Understanding the end-to-end packet delay dynamics of the Internet is of crucial importance since it directly affects the QoS (Quality of Services) of applications, and it enables us to design an efficient congestion control mechanism. In our previous work, we have measured round-trip packet delays of the Internet, and have modeled the packet delay dynamics using system identification. As the input and output data for system identification, we have used the packet inter-departure time from a source host and the corresponding round-trip time measured by the source host. On the contrary, in this paper, we use the packet transmission rate from the source host, and the average round-trip time measured by the source host for improving an accuracy of the model. Using input and output data measured in LAN and WAN environments, we model the round-trip packet delay dynamics with the ARX (Auto-Regressive eXogenous) model. Through numerical examples, we show that the round-trip time dynamics in LAN environment can be accurately modeled by the ARX model. We also show that the round-trip time dynamics in WAN environment can be accurately modeled when the bottleneck link is shared by a small number of users.
**key words** Packet Delay, System Identification, ARX (Auto-Regressive eXogenous) Model

## 1 はじめに

インターネットにおける、エンド–エンド間のパケット伝送遅延時間の特性を知ることは、アプリケーションの QoS (サービス品質) を向上し、効率的な輻輳制御を実現するために重要である。我々はこれまで、文献 [1, 2] において、制御工学の分野で広く用いられているシステム同定 [3] を用いることにより、パケット伝送遅延時間の特性をモデル化する方法を提案した。文献 [2] では、送信側ホストから見たネットワークを 1 入力 1 出力の動的システムと考え、パケット伝送遅延時間の特性を、ARX (Auto-Regressive eXogenous) モデルによってモデル化した。システムへの入力として、送信側ホストからのパケット送信間隔を用い、システムからの出力として、送信側ホストで測定したラウンドトリップ時間の差分を用いた。また、有線 LAN および無線 LAN 上で実際に測定した入出力データを用いてモデル化を行った結果、ネットワークの負荷が高く、バックグラウンドトラヒックが少ないネットワークでは、ラウンドトリップ時間の変動をある程度モデル化できることがわかった。

本稿と文献 [2] との違いは、(1) システム同定に用いる入出力の定義、(2) 入出力データを測定するネットワーク環境、(3) モデルの妥当性の検証方法、の 3 点である。(1) に関しては、本稿では、送信側ホストからのパケット送信間隔ではなく、一定のサンプリング周期ごとに測定した、送信側ホストからのパケット送信レートを用いる。さらに出力データとして、パケットごとのラウンドトリップ時間の差分ではなく、一定のサンプリング周期ごとに測定した、平均ラウンドトリップ時間を用いる。その結果、入出力データのサンプリング周期が一定になるため、モデル精度の向上が期待できる。(2) は、ネットワーク環境によって、モデルの精度がどのように変化するかを明らかにするのが目的である。このため本稿では、LAN 環境だけでなく、WAN 環境においても入出力データを測定し、測定した入出力データを用いてモデル化を行う。(3) では、時間領域だけでなく、周波数領域においてもモデルの妥当性検証を行う。文献 [2] では、シミュレーションによって得られたモデルの出力を、実際に測定した出力データと比較することにより、妥当性の検証を行った。本稿では、ボード線図を用いることにより、周波数領域でモデルの妥当性を検証する。

## 2 パケット伝送遅延時間のモデル化

本稿では、システム同定を用いて、ネットワークにおけるラウンドトリップ時間の変動をモデル化する。一般に、送信側ホストからのパケット送信レートが大きくなると、受信側ホストに到達するまでに通過するルータにおいて、パケット遅延時間が増加するという傾向がある。つまり、送信レートが変化すると、それにあわせてパケット伝送遅延時間は変化する。もちろん、ルータにおけるパケット遅延時間は、そのルータを通過する他のトラヒックにも影響を受けるが、どの程度影響を受けるかは、送信側ホストからは分からない。そこで本稿では、送信側ホストから見たネットワークを、パケット送信レートを入力とし、ラウンドトリップ時間を出力とするブラックボックスと考える (図 1)。本稿の目的は、システム同定を用いることにより、測定した入力データ (パケット送信レート) および出力データ (ラウンドトリップ時間) から、ラウンドトリップ時間の変動をあらわす、数学的なモデルを作成することである。

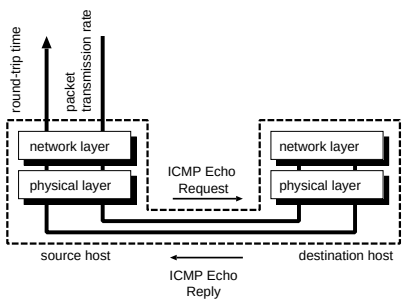



図 1: パケット伝送遅延時間のブラックボックスモデル

本稿では、ARX (Auto-Regressive eXogenous) モデル [3] を用いて、ラウンドトリップ時間の変動をモデル化する。ARX モデルは、システム同定で広く用いられている、線形時不変のパラメトリックモデルである。ここで、一定のサンプリング周期ごとに測定した、$k$ 番目の入力データおよび出力データを、それぞれ $u(k)$ および $y(k)$ とする。この時、ARX モデルは以下のように定義される。

$$A(q)\,y(k) \;=\; B(q)\,u(k-n_d) + e(k) \qquad (1)$$

ここで、$A(q)$ および $B(q)$ は、

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1 q^{-1} + \ldots + a_{n_a} q^{-n_a} \\ B(q) &= b_1 + b_2 q^{-1} + \ldots + b_{n_b} q^{-n_b+1} \end{aligned}$$

のように定義さる。$q^{-1}$ は $q^{-1}u(k) \equiv u(k-1)$ のように定義されるシフトオペレータである。$n_a$ と $n_b$ は ARX モデルの次数であり、$n_d$ は入力と出力の間の遅れを意味する。また、$e(k)$ は白色雑音であり、出力データに含まれる測定不可能な雑音を意味する。式 (1) における $a_n$ および $b_n$ は、すべて ARX モデルのパラメータである。表記の簡単化のため、これらのパラメータをベクトル $\theta$ によって記述する。

$$\theta \;=\; [a_1, \ldots, a_{n_a}, b_1, \ldots b_{n_b}]^T \qquad (2)$$

システム同定は、測定した入出力データから、このパラメータベクトル $\theta$ を推定するというモデル化手法である。システム同定の詳細については、文献 [2] を参照されたい。

本稿では、入力 $u(k)$ および出力 $y(k)$ を、それぞれ一定のサンプリング周期ごとに測定した、送信側ホストからのパケット送信レート、および送信側ホストで観測したラウンドトリップ時間とする。また、他のトラヒックがラウンドトリップ時間に与える影響や、出力データに含まれる測定誤差を、雑音 $e(k)$ によってモデル化する。文献 [2] では、入力を送信側ホストからのパケット送信間隔、出力をラウンドトリップ時間の差分と定義していたが、システム同定によって得られたモデルの精度はそれほど良くなかった。通常、システム同定では、入出力データを測定するサンプリング周期は一定であることが前提とされている。しかし、文献 [2] では、パケッ

ト送信もしくは受信ごとに入出力データを測定していたため、サンプリング周期が一定ではなかった。そこで本稿では、入出力データとして、一定のサンプリング周期ごとに測定した、送信側ホストからのパケット送信レート、および送信側ホストで観測したラウンドトリップ時間を用いる。具体的には、入力 $u(k)$ および出力 $y(k)$ を以下のように定義する。送信側ホストで測定した、$i$ 番目のパケットの送信時刻を $t_s(i)$、送信側ホストで受信した $i$ 番目のパケットに対応する ACK パケットの受信時刻を $t_r(i)$、パケット長を $l(i)$ とする。サンプリング周期を $T$ とすれば、$u(k)$ および $y(k)$ は以下の式で与えられる。

$$u(k) = \frac{\sum_{i\in\phi_s(k)} l(i)}{T}$$

$$y(k) = \frac{\sum_{i\in\phi_r(k)} (t_r(i) - t_s(i))}{|\phi_r(k)|}$$

ただし、$\phi_s(k)$ および $\phi_r(k)$ は、$k$ 番目のサンプリング周期に送信 / 受信された、パケット番号の集合である。

## 3 ICMP パケットによる入出力データの測定

### 3.1 パケット送信 / 受信時刻の測定方法

本稿では、実際にネットワーク中へパケットを送信し、その時のラウンドトリップ時間を測定する。入出力データの測定には、ネットワークの障害通知などに用いられる ICMP (Internet Control Message Protocol) を利用する。数種類の ICMP メッセージのうち、ICMP Echo メッセージを用いる。ICMP Echo Request パケットを受信したホストは、送信側ホストに ICMP Echo Reply パケットを返送する。これを利用して、送信側ホストにおいてラウンドトリップ時間を測定する。現在、多くのネットワーク機器が、ICMP Echo Request パケットに返答するため、ほとんどの受信側ホストに対して、ラウンドトリップ時間を測定することができる。ただし、一部のネットワーク機器では、ICMP パケットに対するレート制限を設けていることもあり、その場合には本稿の手法は適用できない。本稿では、送信側ホストにおいて、ICMP Echo Request パケットの送信時刻、ICMP Echo Request パケットのサイズ、および ICMP Echo Reply パケットの受信時刻を記録する。

本稿では、送信レートが変化した時の、ラウンドトリップ時間の変動を測定することにより、ラウンドトリップ時間の変化をモデル化したい。そのため、入力 (パケット送信レート) をさまざまに変化させ、その時の出力 (平均ラウンドトリップ時間) を測定する。システム同定に用いる入力には、さまざまな周波数成分が含まれていることが望ましい [3]。本稿では、各パケットの送信間隔を指数分布によって変更する。具体的には、`ping` プログラムを一部変更して、ICMP Echo Request パケットの送信間隔を、パケット毎に変化させた。

送信側ホストでパケット送信 / 受信時刻の測定を行うのではなく、送信側ホストとは別にホスト (測定用ホスト) を用意する。これは、送信側ホストにおいてデータ測定を行うと、パケット送信レートが高くなった時に、送信側ホストにかかる負荷が高くなり、正確なデータ測定が行えない可能性があるためである。

### 3.2 測定したネットワーク環境

送信側 / 受信側間で、パケットが経由するルータの数が増えるにつれ、出力データに含まれる雑音 (他のトラヒックの影響や、出力データに含まれる測定誤差) の影響が大きくなる。また、ラウンドトリップ時間は、ボトルネックリンクにおける遅延時間によって大きく変動する。そのため、ボトルネックリンクに着目して、入出力データを測定するネットワーク環境を選択する必要がある。そこで本稿では、ネットワーク構成が単純な LAN 環境と、ネットワーク構成が複雑な WAN 環境において入出力データを測定する。

本稿では、以下のような、異なる 3 種類のネットワーク環境において、システム同定に用いる入出力データを測定した。

**N1** : **LAN**(ネットワーク構成が単純な場合)

N1 は、ネットワーク構成が単純な LAN 環境である。送信側ホストと受信側ホストとの間には、2 個のスイッチングハブ (SW1、SW2) が存在する。すべてのホストとスイッチングハブは、すべて 100 Mbps の Ethernet で接続されている。送信側ホストから送信される測定用パケットの他に、バックグラウンドトラヒックとして、SW1–SW2 間には TCP パケットを転送した。具体的には、SW1 に接続された FTP サーバから、SW2 に接続された FTP クライアントにファイル転送を行った。バルクデータ転送を想定し、入出力データ測定中にファイル転送が終了しないよう、十分大きなファイルを用意した。

**N2** : **WAN**(ネットワーク構成が複雑、アクセス回線がボトルネックの場合)

N2 は、ネットワーク構成が複雑な WAN 環境であり、アクセス回線がボトルネックとなっている。送信側ホストは、100 Mbps の LAN を経由して、インターネットに接続されている。一方、受信側ホストは、56 Kbps のダイアルアップ回線を経由して、インターネットに接続されている。送信側ホストと受信側ホストの間のホップ数は 16 であり、平均ラウンドトリップ時間は 319.7 ms であった。

**N3** : **WAN**(ネットワーク構成が複雑、アクセス回線以外がボトルネックの場合)

N3 は、ネットワーク構成が複雑な WAN 環境であり、アクセス回線以外がボトルネックとなっている。送信側ホストは、100 Mbps の LAN を経由して、インターネットに接続されている。受信側ホストとして、`www.so-net.ne.jp` を選択した。受信側ホストまでのホップ数は 16 であり、平均ラウンドトリップ時間は 36.89 ms であった。

以上のような、3 種類のネットワーク環境において、パケット送信 / 受信時刻を測定した。ICMP Echo Request パケットを 20,000 個送信し、その時の ICMP Echo Request/Reply パケットの送信 / 受信時刻、サイズを測定した。測定は、2001 年 10 月 18 日午後 10 時から 19 日午前 2 時まで行った。2 章で説明したように、システム同定に用いる入出力データは、測定したパケット送信 / 受信時刻から計算して求める。経験的に、サンプリング周期中に、平均 5 個程度のパケットが含まれるように、サンプリング周期 $T$ を決定した。本稿では、パケット

送信間隔を指数分布に従うように変更させているため、あるサンプリング周期中に、まったくパケットを送信しない (もしくは受信しない) ことがある。このような場合、過去の入力データ (もしくは出力データ) の最小値によって補完した。

## 4 入出力データによるモデル化

### 4.1 同定および検証方針の決定

本稿では、すべてのネットワーク環境 (N1、N2、N3) において、ARX モデルの次数を $n_a = 5$ および $n_b = 5$ と設定した。これは、どの程度ラウンドトリップ時間の変動がモデル化できるかを、各ネットワーク環境ごとに比較するためである。また、ARX モデルの入力–出力間の遅れ $n_d$ を、平均ラウンドトリップ時間から決定した。これは、ある時刻における入力 (パケット送信レート) は、ラウンドトリップ時間後の出力 (平均ラウンドトリップ時間) に影響を与えると考えられるからである。具体的には、入出力データ数を $N$ として、$n_d$ を次式によって決定した。

$$n_d = \left\lfloor \frac{\sum_{k=1}^{N} y(k)}{NT} \right\rfloor$$

本稿では、システム同定によって得られたモデルの妥当性を検証するために、(1) シミュレーションによる検証、および (2) 周波数領域での検証、という 2 種類の検証方法を用いる。(1) は、雑音が無い (つまり、$e(k) = 0$) と仮定したシミュレーションによって得られたモデルの出力と、実際に測定された出力を比較するという方法である [3]。この検証方法では、シミュレーションによるモデルの出力が、測定した出力データと一致していれば、モデル化が正確に行えていると判断する。

(2) は、システム同定によって得られた ARX モデルの周波数特性と、スペクトル解析法 [3] によって得られる周波数特性を比較するものである。周波数特性の比較には、ボード線図を用いる。ボード線図とは、各周波数における、システムのゲインと位相の特性 (周波数特性) を表わしたものである。ARX モデルの周波数特性は、システム同定によって得られたモデルから計算される。一方、スペクトル解析法では、測定された入出力データから、周波数特性を直接推定する。ARX モデルの周波数特性と、スペクトル解析法による周波数特性が一致していれば、システム同定によって得られた ARX モデルが、対象とするシステムの周波数特性を正確に表現していると判断できる。

3 章で得られた入出力データから、モデル作成のための「システム同定用データセット」とモデルの妥当性検証のための「モデル検証用データセット」を作成する。システム同定用データセットとして、2,001 スロットから 2,150 スロットまでの入出力データを用いた。一方、モデル検証用データセットとして、2,201 スロットから 2,350 スロットまでの入出力データを用いた。

### 4.2 同定結果および考察

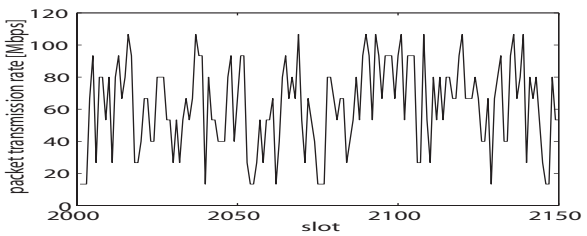
**ネットワーク N1**

図 2 に、ネットワーク N1 において測定した入出力データ、およびシステム同定の結果を示す。左上から順に、(a) 送信側ホストからのパケット送信レート、(b) ラウンドトリップ時間、(c) シミュレーションによる ARX モデルの出力と実際の出力の比較、(d) ARX モデルの周波数特性とスペクトル解析法による周波数特性を示している。(a) および (b) は、システム同定用データセットを示している。この時の平均送信レートは 66.6 Mbps、平均ラウンドトリップ時間は 0.42 ms であった。なお、FTP の平均スループットは 5.2 Mbps であった。サンプリング周期 $T = 0.9$ ms とし、式 (3) より ARX モデルの遅れ $n_d = 0$ とした。

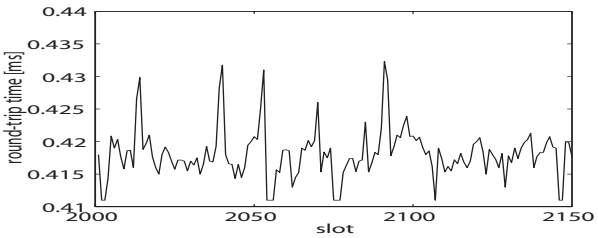
図 2(c) から、シミュレーションによるモデルの出力と実際に測定した出力が非常に良く一致していることがわかる。図 2(d) においても、ARX モデルとスペクトル解析法の周波数特性が一致している。周波数が高い時の周波数特性は一致していないが、これは、スペクトル解析法によって推定した周波数特性が、高域になるほど精度が劣化する [3] ためと考えられる。以上の結果から、ネットワーク N1 では、ラウンドトリップ時間の変動がほぼ正確にモデル化できているといえる。これは、ネットワーク N1 では、送信側ホストからのパケット送信レートの変化によってネットワーク中での遅延時間が変化しているためと考えられる。ここでは、送信側ホストからの平均パケット送信レートが、66.6 Mbps と比較的高い場合の結果を示した。ただし、結果は省略するが、送信側ホストからの平均パケット送信レートが 20 Mbps とネットワークの回線速度に比べて低い場合には、ラウンドトリップ時間の変動が正しくモデル化できなかった。これは、送信側ホストからのパケット送信レートが低い場合には、ネットワーク中で遅延が発生しないためと考えられる。

**ネットワーク N2**

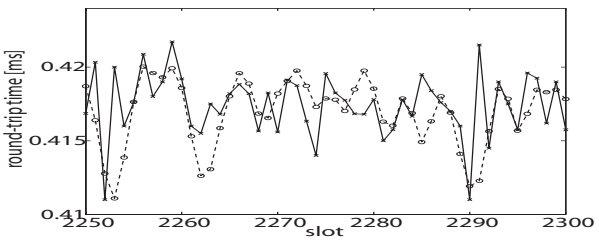
図 3 に、ネットワーク N2 において測定した入出力データ、およびシステム同定の結果を示す。この時の平均送信レートは 31.8 Kbps、平均ラウンドトリップ時間は 319.7 ms であった。また、サンプリング周期 $T = 125$ ms、ARX モデルの遅れ $n_d = 2$ とした。ネットワーク N2 は、送信側ホストおよび受信側ホストの間に 16 個のルータが存在する WAN 環境である。このため、他のトラヒックの影響や出力データに含まれる測定誤差により、ネットワーク N1 よりもラウンドトリップ時間の変動のモデル化が困難であると考えられる。しかし、図 3(c) から、シミュレーションによる ARX モデルの出力と実際に測定した出力がほぼ一致していることがわかる。さらに、図 3(d) においても、ARX モデルとスペクトル解析法の周波数特性が一致している。つまり、ネットワーク N2 においても、ラウンドトリップ時間の変動が良くモデル化できているといえる。これは、ネットワーク N2 ではアクセス回線がボトルネックであるためと考えられる。つまり、送信側ホストからのパケット送信レートの変化により、ボトルネックリンクであるアクセス回線において遅延が発生し、これによってラウンドトリップ時間が大きく変動していると考えられる。特に、アクセス回線がボトルネックであるため、ラウンドトリップ時間の変動は他のトラヒックの影響をほとんど受けない。このため、ネットワーク N2 では、ARX モデルによってアクセス回線の遅延特性を正確にモデル化できていると考えられる。以上の考察から、ネットワー



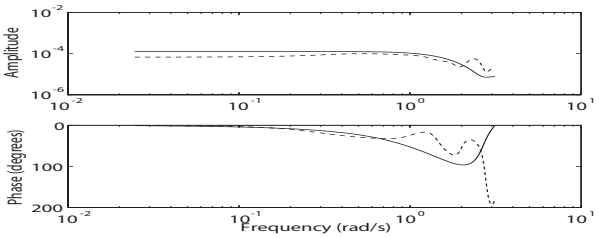

(a) 入力データ (パケット送信レート)




(b) 出力データ (ラウンドトリップ時間)




(c) シミュレーションによる比較 (実線: 実際の出力、 点線: モデルの出力 )




(d) 周波数領域での比較 (実線: ARX モデル、点線: スペクトル解析)

図 2: ネットワーク N1 の結果

ク構成が複雑な WAN 環境であっても、送信レートの変化によりラウンドトリップ時間が大きく変動する場合には、ラウンドトリップ時間のモデル化が可能であると考えられる。

ネットワーク **N3**

図 4 に、ネットワーク N3 において測定した入出力データ、およびシステム同定の結果を示す。この時の平均送信レートは 9.55 Mbps、平均ラウンドトリップ時間は 36.89 ms であった。また、サンプリング周期 $T = 6$ ms、ARX モデルの遅れ $n_d = 6$ とした。図 4(c) より、シミュレーションによる ARX モデルの出力と、実際に測定した出力がまったく一致していないことがわかる。また、図 4(d) においても、ARX モデルとスペクトル解析法の周波数特性がまったく一致していない。このことから、ネットワーク N3 においては、ラウンドトリップ時間の変動をほとんどモデル化できないと判断できる。これは、ネットワーク構成が複雑で、さらにボトルネックリンクを多数のユーザで共有しているような WAN 環境では、送信側ホストからのパケット送信レートが、ラウンドトリップ時間にほとんど影響を与えないためと考えられる。なお、WAN 上の他のいくつかの受信側ホストに対しても測定を行い、システム同定によりモデル化を行ったが、やはりラウンドトリップ時間の変動をモデル化できなかった。以上の考察から、ネットワーク構成が複雑で、なおかつ送信レートが、ラウンドトリップ時間にほとんど影響を与えない環境では、システム同定によるモデル化は困難であると考えられる。

## 5 まとめと今後の課題

本稿では、送信側ホストから見たネットワークをブラックボックスと考え、ラウンドトリップ時間の変動を、システム同定を用いて ARX モデルによってモデル化した。その結果、ネットワーク構成が単純である LAN 環境では、ラウンドトリップ時間の変動を正確にモデル化できることがわかった。また、ネットワーク構成が複雑な WAN 環境では、送信レートがラウンドトリップ時間に影響を与えるかどうかで、モデルの精度が大きく変化することがわかった。

今後の課題としては、ARMAX (Auto-Regressive Moving Average eXogenous) など、より複雑なモデルを用いたモデルの精度の向上が挙げられる。また、システム同定によって得られた、ラウンドトリップ時間の変動モデルを用いて、さまざまなネットワーク環境に対応できる、輻輳制御機構を設計する予定である。

## 謝辞

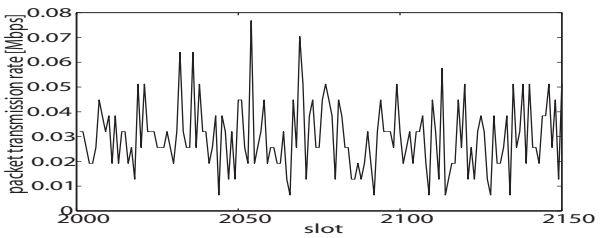
本研究の一部は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業における研究プロジェクト「高度マルチメディア応用システム構築のための先進的ネットワークアーキテクチャの研究」(JSPS-RFTF97R16301) によっている。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

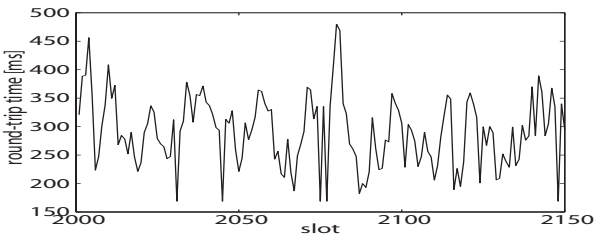
[1] H. Ohsaki, M. Murata, and H. Miyahara, "Modeling end-to-end packet delay dynamics of the Internet using system identification," to be presented at *International Teletraffic Congress 17*, Dec. 2001.

[2] 森田 光茂 , 大崎 博之, 村田 正幸, "インターネットにおけるパケット伝送遅延時間の測定およびシステム同定によるモデル化に関する検討," 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会, March 2001.

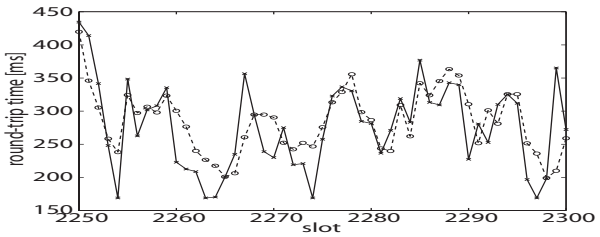
[3] L. Ljung, *System identification — theory for the user*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1987.



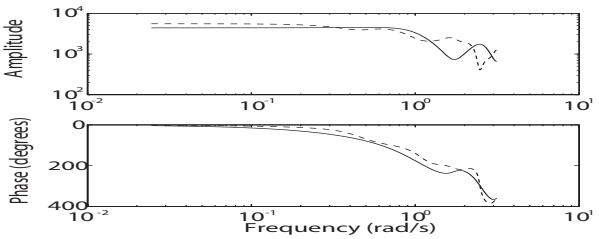

(a) 入力データ (パケット送信レート)




(b) 出力データ (ラウンドトリップ時間)

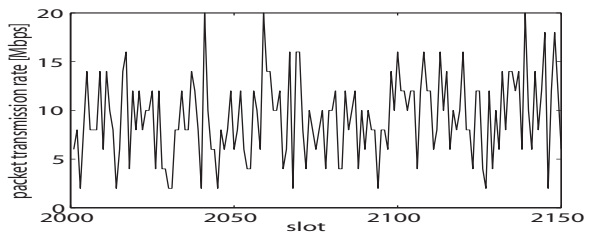



(c) シミュレーションによる比較 (実線: 実際の出力、 点線: モデルの出力 )

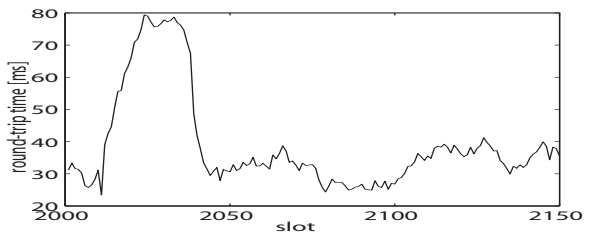



(d) 周波数領域での比較 (実線: ARX モデル、点線: スペクトル解析)

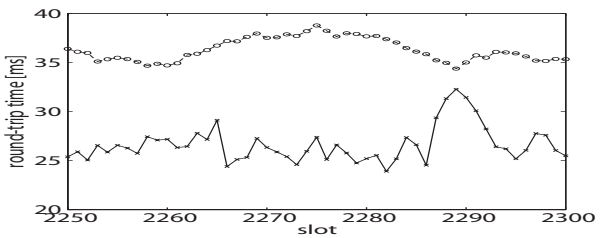
図 3: ネットワーク N2 の結果



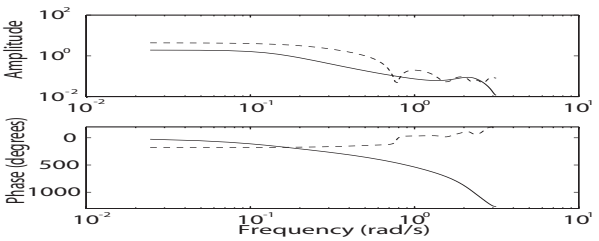

(a) 入力データ (パケット送信レート)




(b) 出力データ (ラウンドトリップ時間)




(c) シミュレーションによる比較 (実線: 実際の出力、 点線: モデルの出力 )




(d) 周波数領域での比較 (実線: ARX モデル、点線: スペクトル解析)

図 4: ネットワーク N3 の結果