

インターネットにおける遅延時間特性の解析とモデル化

富山県立大学 *中澤 透 Nakazawa Toru
 富山県立大学 小林 香 Kobayashi Kaori
 富山県立大学 片山 勤 Katayama Tsuyoshi

01104363

1. はじめに

近年、インターネットを利用した音声や動画などを含んだ通信が盛んに行われている。このような通信には、遅延時間の短縮やパケットロス率の低下といった通信品質の向上が要求される。

本研究ではインターネットにおいて遅延時間特性を測定し、その解析と待ち行列によるモデル化を行なう。

2. 遅延時間の構成

パケット長が M である試験パケットのエンド-エンド転送時間 $D(M)$ は、次式でモデル化される [2]。

$$D(M) = \frac{M}{R} + L + X \quad (1)$$

ただし、

- 固定分
 - R : エンド-エンドを1リンクとみなした場合のリンク速度
 - L : 伝播時間と処理時間の総和
- 変動分
 - X : パケットの各ルータにおける待ち時間の総和

である。ここで、それぞれの内訳は、

$$\frac{1}{R} = \sum_{j=1}^k \frac{1}{R_j}, \quad L = \sum_{j=1}^k Y_j + \sum_{j=1}^{k-1} Z_j, \quad X = \sum_{j=1}^{k-1} X_j \quad (2)$$

ただし、

- R_j : リンク j の回線速度
- Y_j : リンク j の伝播時間
- Z_j : ルータ j の処理時間
- X_j : ルータ j の待ち時間
- k : リンク総数

である。この関係を図1に示す。また遅延時間を、上に述べたように固定分と変動分に分離したものを図2に示す。固定分はパケットが往復するために最低限必要な時間なので、遅延時間の測定値中の最小値がこれに当たる。また、変動分はインターネットを待ち行列モデルと捉えた場合の、待ち時間の変動とみなすことができる。

3. インターネットの遅延時間測定

一般的にインターネットの遅延時間としては、ICMP Echo プロトコルを用いた ping コマンドで測定した ICMP パケットの往復時間 RTT(Round Trip Time) が用いられる。しかし、RTT だけでは往路と復路のいずれかが混んでいるかを判断することができないため、今回は ICMP Timestamp プロトコルを用いた手法を用いる [3]。図3に今回の遅延時間測定の概念図を示す。今回は送信元に富山県立大学と富山県内にあるプロバイダ1社を、送信先に国内と国外の WWW サーバ

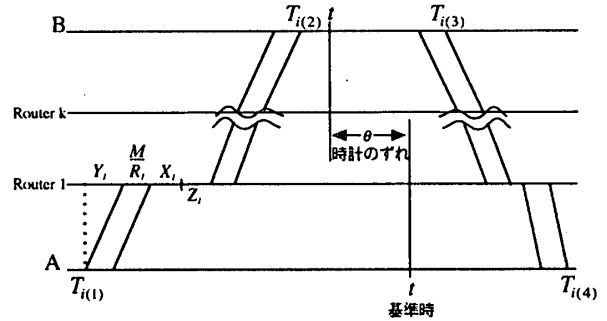


図1: パケット転送時間構成

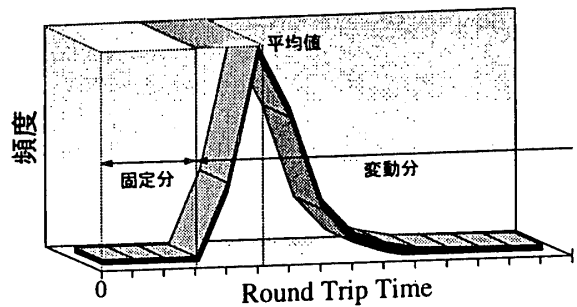


図2: 遅延時間の固定分と変動分

を選び、パケット長を 88byte、送信間隔を 1sec として、1 回の測定に対して 10000 回のパケット送信を行った。

ここでホスト A とホスト B の時計のずれが ICMP Timestamp プロトコルの最小時間単位である 1msec を上回ると、遅延時間の算出に影響して正確な片道の遅延時間が得られないという問題が生じる。このため、片道の遅延時間を測定するためにはこの時計のずれを見積もる必要がある。まず i 番目のパケットの往路、復路の遅延時間をそれぞれ $a_i = T_{i(2)} - T_{i(1)}$, $b_i = T_{i(4)} - T_{i(3)}$, RTT を $\delta_i = a_i + b_i$ とすると、パケット i の時計のずれ θ_i は、

$$\theta_i = \frac{a_i - b_i}{2} \quad (3)$$

となり、時計のずれの真値 θ は以下の不等式を満足する [4]。

$$\theta_i - \frac{\delta_i}{2} \leq \theta \leq \theta_i + \frac{\delta_i}{2} \quad (4)$$

本研究では測定データの機械的な取扱いを可能とするために、 θ として式 (4) の中間値を採用する。

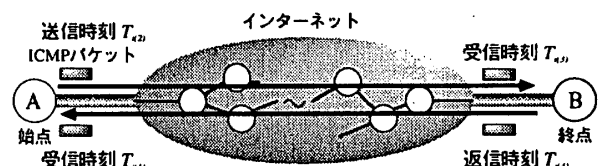


図3: インターネットモデル

また、最小値は測定している計算機の時計の変動などにより時間的に変動する。最小値は固定分なので本来変動しないため、遅延時間の最小値は比較的早く収束することが分かっていることから、短い間隔で最小値を求めて変動が起らないように補正を行う。

補正を行った遅延時間の平均 m と変動係数 C を表 1 に示す。また、頻度分布を正規化したものを図 4 に示す。

表 1: 計測された遅延時間の平均 m と変動係数 C

対象 サイト	RTT		往路		復路	
	m	C	m	C	m	C
国内 1	50.34	0.15	25.91	0.28	24.43	0.09
国内 2	87.61	0.18	44.21	0.24	43.39	0.26
国外 1	159.4	0.05	80.91	0.10	78.51	0.02
国内 1	58.06	0.31	28.81	0.42	29.25	0.37
国外 1	184.08	0.12	92.83	0.18	91.25	0.12

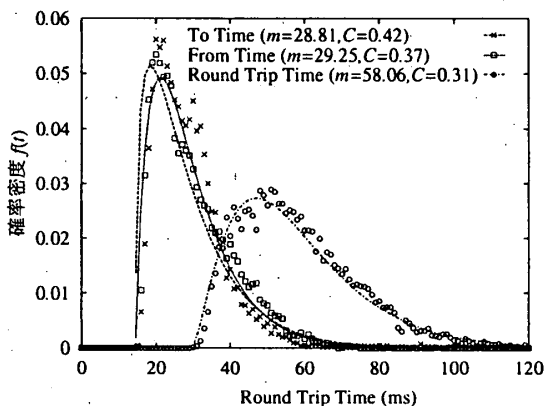


図 4: 遅延時間特性

4. 遅延時間変動分の解析

2 節で述べたように、遅延時間は固定分と変動分で構成される。このうち、固定分は通信相手先の回線速度や物理的距離より一意に決まるが、変動分はインターネット内での待ち時間なので、相手先の選び方とは関係なく、インターネット内の混雑状況によって分布関数が決まると考えられる。よって遅延時間の変動分を解析するため、測定で得られた遅延時間の頻度分布を正規化したものを確率密度分布とみなして、ガンマ分布による当てはめを行った。ここでガンマ分布を用いたのは、左端が切れている分布であることと、分布の自由度が高いことからである。

ガンマ分布の確率密度関数は次式で与えられる。

$$f(x) = \frac{\beta^\gamma}{\Gamma(\gamma)} e^{-\beta(x-\alpha)} (x-\alpha)^{\gamma-1} \quad (5)$$

ここで、 α は分布の左端を表すことから測定遅延時間の最小値 (= 固定分) を与える。また $\alpha = 0$ としたときの 1 次積率と 2 次積率から、 β と γ について解くと、

$$\beta = \frac{E[X]}{E[X^2] - E[X]^2} = \frac{\mu}{\sigma^2} \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{E[X]^2}{E[X^2] - E[X]^2} = \left(\frac{\mu}{\sigma}\right)^2 \quad (7)$$

が得られることから、測定遅延時間の平均、分散を用いて β と γ の推定を行う。この手法を用いて当てはめた結果を図 4 に点線で示す。

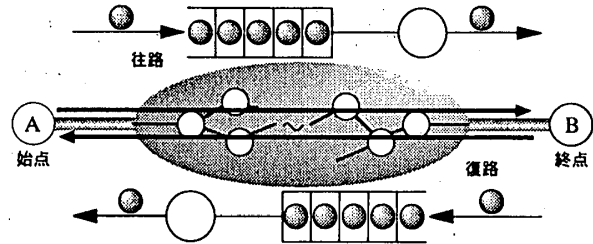


図 5: 遅延解析モデルの概念図

この結果より、この手法で得られたパラメータによるガンマ分布の当てはめは、片道遅延時間、往復遅延時間共によく適合している。つまり、 α (= 固定分) には依存していないことがわかる。

5. 遅延解析モデル

インターネットの遅延解析モデルとしてタンデム型待ち行列モデルを考える。これは、実際のインターネットは多数のルータが多段に接続されたネットワークであることから、タンデム型がもっとも適切と考えられるからである。図 5 に概念図を示す。2 段の待ち行列のそれぞれを往路と復路と考え、インターネットが大規模ネットワークであることから到着過程をマルコフ過程とし、系内時間分布がガンマ分布で表されることからサービス時間分布をアーラン分布と仮定する。系内時間の変動係数などを手がかりに利用率や生起率の推定を行う。

6. まとめ

ICMP Timestamp プロトコルによるインターネットの片道、往復遅延時間の測定手法を提案した。測定した遅延時間から固定分と変動分を分離し、変動分をガンマ分布で当てはめたときのパラメータの推定を行った。また、インターネットの遅延解析モデルとしてタンデム型待ち行列モデルの適用を検討した。

今回提案した測定手法は特別な装置が必要でなく、また相手側の協力も必要でないことから特定の管理者がいないインターネットというネットワークに適合している。

今後の課題として、経路の変化による影響の解析や、ガンマ分布以外の確率密度関数の検討、優先処理を含めた遅延解析モデルの詳細な検討などが挙げられる。

参考文献

- [1] 中澤 透, 小林 香, 片山 勁: インターネットの遅延解析モデルの提案と 2 クラス優先処理特性の評価, 平成 10 年信学北陸支部大会, C-5.
- [2] 木村 卓巳: IP ネットワークのエンド-エンド性能モデル, 平成 10 年信学総大, B7-82.
- [3] 谷口 浩久, 木村 卓巳: インターネット片道遅延時間測定に基づくパス特性の評価法, 平成 10 年信学通信ソサイエティ大会, B-11-13.
- [4] Mills, D.L.: Internet Time Synchronization: the Network Time Protocol, IEEE Trans. Communications COM-39, 10, pp. 1482-1493, 1991.