

テクニカルノート

インターネットを介した遠隔制御のための基礎実験

亀井 陽一郎^{†1} 平 沼 賢 次^{†2} 田 伏 正 佳^{†3}
高 橋 伸 弥^{†4} 河 野 通 夫^{†4}

本研究では、インターネットを利用した遠隔制御を行うための基礎実験として、2日間にわたり宮崎大学と東京海洋大学（当時は東京商船大学）のネットワーク間において、アプリケーション層における通信遅延特性を調べた。従来の研究では、たかだか2程度のルータを経由した場合についての報告がなされているが、ここではより長大な場合として、12ルータを経由した場合について調査を行っている。その結果、従来とは異なる知見が得られた。

A Fundamental Experiment for Remote Control System via Internet

YOICHIRO KAMEI,^{†1} KENJI HIRANUMA,^{†2} MASAYOSHI TABUSE,^{†3}
NOBUYA TAKAHASHI^{*†4} and MICHIO KONO^{†4}

We examined the property of the delay time in the wide area network for designing remote control systems. In comparison with the case dealt until now in which the number of the router is little, a different knowledge is obtained.

1. 緒 言

近年、インターネットの普及とともにネットワークを介した遠隔制御技術が大きな注目を集めている。この制御において、コントローラとプラントはパケット通信による計測・制御信号の送受を行うために様々な問題が発生する。これらの問題に対して制御理論的な手法に基づいた研究が活発に行われている。パケット伝達時間の不確定な遅延問題に関して、文献 1) は遅延時間のゆらぎをパラメータ変動と見なしてロバスト制御の手法を適用した。この場合、変動の上界をいかに見積もるかは重要な問題となる。文献 1), 2) は 2ルータを経由したネットワーク特性の計測実験を行った。しかしながら、実用的な結果を得るためにはこの経路長では不十分である。本研究では、より実用的なネットワーク特性を得るために、宮崎大学と東京海洋

大学（実験当時は東京商船大学）との間での計測実験を行った。このネットワーク経路においてパケットは 12ルータを経由して送られる。実験の結果から、遅延時間の分布に関して文献 1) とは異なる知見が得られたので報告する。

2. 遅延特性の計測

評価するネットワークに接続されたコンピュータ間に連続的にパケットを流す ping-pong 実験により、アプリケーション層で観測できる通信遅延を計測しネットワークの特徴付けを行う。インターネット上で標準的に用いられているプロトコルである TCP/IP におけるパケットの往復時間 (RTT: Round Trip Time) の計測方法については、トランスポート層において TCP または UDP を使う方法や、インターネット層において ICMP を利用するといった方法が考えられる。よく用いられるアプリケーションである ping プログラムは ICMP を利用したものであるが、今回は、アプリケーション層で観測できる遅延の特徴を知るために、TCP を使用する。クライアントはサーバに向けて 10 秒ごとに一定の文字列を送信し、サーバは受け取ったデータをそのままクライアントに向けてエコーバックする。実験の詳細は表 1 のとおりである。サー

†1 シード株式会社
Seed Inc.

†2 東京海洋大学
Tokyo University of Marine Science and Technology

†3 京都府立大学
Kyoto Prefectural University

†4 宮崎大学
University of Miyazaki

表 1 実験環境
Table 1 Experiment environment.

期間	(1 日目) 2001/11/19 15:00 ~ (2 日目) 2001/11/20 15:00 ~
サーバ	東京商船大学 (現東京海洋大学)
クライアント	宮崎大学
経路	SINET 内の 12 ルータ
送信データ	タイムスタンプ (8 byte)

表 2 統計値
Table 2 Statistic result [msec].

平均	108.6498
最大値	4,967
最小値	57
分散	7,182.783
標準偏差	84.7513
メジアン (中央値)	98
モード (最頻値)	58

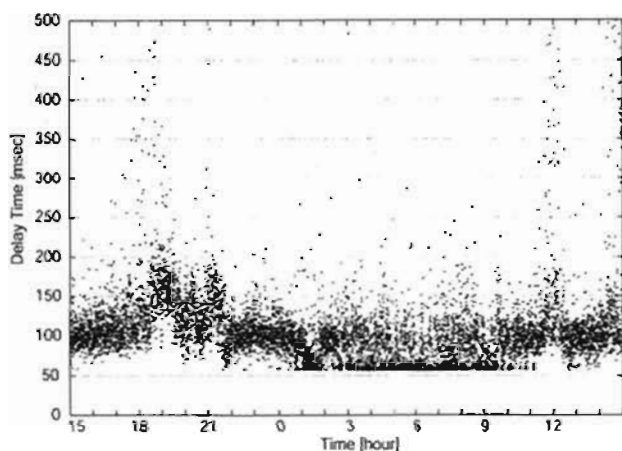


図 1 1 日目
Fig. 1 First day.

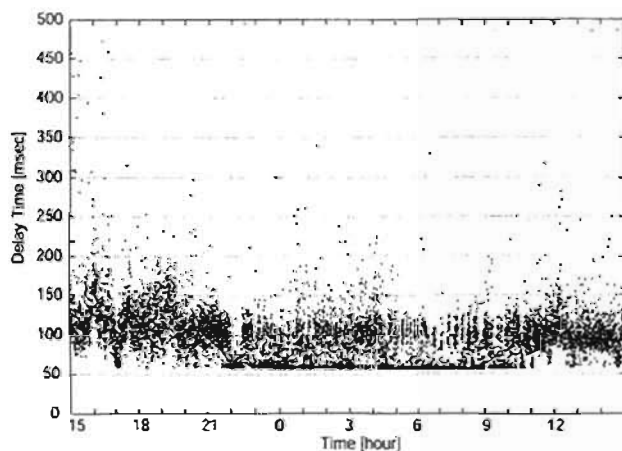


図 2 2 日目
Fig. 2 Second day.

バからクライアントへの通信パケットは SINET に配置された 12 ルータを経由して送られる。サーバは東京商船大学の学内 LAN に接続され、440BX チップセットと Pentium III 550 MHz で構成した AT 互換機を使用しており、OS には Debian GNU/Linux 2.2 を搭載している。クライアントは MYUNET (宮崎大学 LAN) の工学部情報工学棟に設置されており、機種は Sun Microsystems 社製 Ultra 60, OS には Solaris 8 を搭載している。なお、実験は両日とも 15:00 より 24 時間の連続した期間に行っており、1 日目は月曜日、2 日目は火曜日とともに平日であった。

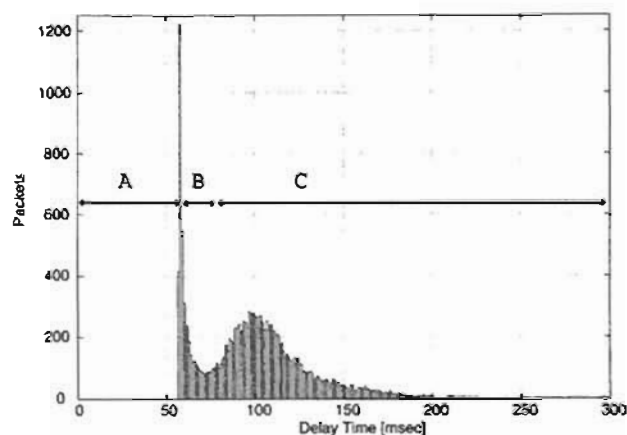


図 3 全体の遅延特性
Fig. 3 Histogram.

3. 実験結果

2 日間にわたる実験の測定結果を図 1, 図 2 に、また、それらの統計値とヒストグラムを表 2, 図 3 にそれぞれ示す。

4. 考察

まず 2 日間を通して、全体の約 97% のパケットが遅延 57~200 [msec] に集中していることが分かった。また、遅延 200 [msec] 以上のものもときどき見られ、ごく稀ではあるが約 5,000 [msec] 程度の遅延も存在する。また図 3 から分かるように、パケットの遅延特性は、2 つの山型になっている。

これは遅延の性質について、大きく 2 つに分類できるといえるだろう。まず、遅延分布の最頻値 (モード) は 58 [msec] であり、この付近の分布を B とすると、ここに属するパケットは全体の約 23% であり、これはほとんど最速で到達したパケット群であるといえる。一方、C の領域に属するのは、全体の 72.7% のパケットであり、全体の平均値である 108 [msec] を中心とした正規分布に近い分布であることが分かる。

次に、ネットワークの状態を (1) 日中における通常のネットワーク負荷の状態と、(2) 夜 21:00 から翌日午前 11:00 にかけての低負荷な状態とに分類し、負荷の違いによる遅延時間の変化について調べる。

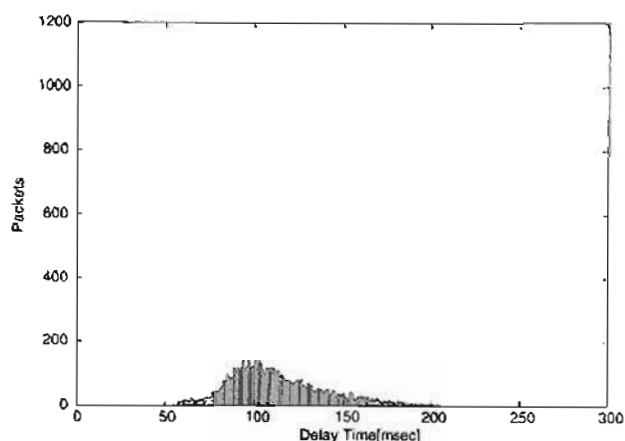


図4 通常負荷時の遅延特性 (1)
Fig. 4 Histogram (1).

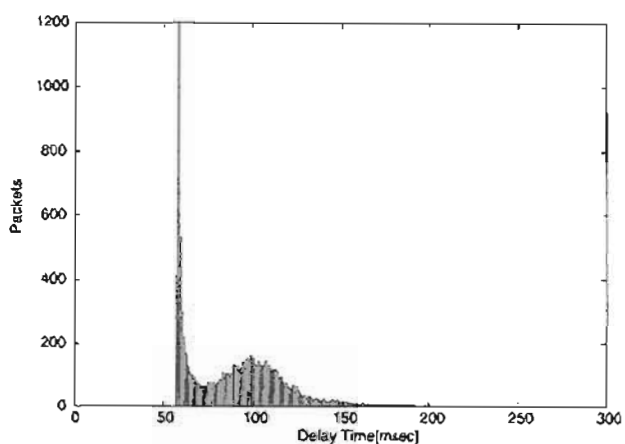


図5 低負荷時の遅延特性 (2)
Fig. 5 Histogram (2).

(1), (2)の遅延時間に関するヒストグラムをそれぞれ図4, 図5に示す。(1)の状態においては, 通信遅延は正規分布的な特性を有することが分かる。また, (2)の状態においては, 正規分布と指数分布が重なり合ったような特性が得られた。図3のBで示した最速で到達するパケット群は, ほとんどがこの時間帯に発生しており, これらは指数分布的な遅延特性を有している。そして, それ以外のパケット群は(1)と同様に正規分布的な遅延特性を有していることが分かった。以上の事実は, 文献1)で報告された, 全体的に指数分布に近いという結果とは異なり, 指数分布的な特性と, 正規分布的な特性が重なり合ったものと見なすことができる。したがって, これら2種類の特性をそれぞれ別に考慮したうえで制御系の設計を行うことで, 保守的でない良好な特性の制御系が得られることが期待できる。

最後に, 遅延時間が大きい方から5%のパケットを無視した場合について付言しておく。この場合の遅延時間の平均値は96.330, 最大値は171となる。

5. 結 言

インターネットにおいて伝達遅延特性の測定実験を行った。その結果, ごく稀に切断状態ともいえるような大きな遅延が発生することが分かった。そして, このような大きな遅延のパケットを無視できれば, 全測定時間を通じてみると, 指数分布と正規分布を加え合わせた分布と見なすことができる。今後の課題としては, 今回明らかになった遅延特性に対してロバストな制御系を設計するための手法の研究および実装が考えられる。また, インターネットは日々刻々と変化をとげているため, 同様の計測実験を引き続き行うことには意義があると考えられる。

謝辞 本稿の内容についてご討論いただいた佐藤治先生および横道政裕先生に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 汐月哲夫: インターネットの遅延特性と双方向遠隔通信制御, システム/制御/情報, Vol.45, No.12, pp.695-702 (2001).
- 2) 藤本英雄, 佐野明人, 岡本啓史: インターネットを介した力帰還型バイラテラル遠隔操作, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.5, pp.713-720 (2000).
- 3) Niemeyer, G. and Slotine, J-JE.: Stable Adaptive Teleoperation, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.16, No.1, pp.152-162 (1991).
- 4) Yokokohji, Y., Imaida, T. and Yoshikawa, T.: Bilateral Control with Energy Balance Monitoring Under Time-Varying Communication Delay, *Proc. 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, pp.2684-2689 (2000).
- 5) Hristu, D.: Stabilization of LTI Systems with Communication Constraints, *Proc. 2000 American Control Conference*, pp.2342-2346 (2000).
- 6) 竹下隆史, 松山公保, 荒井 透, 菊田幸雄: マスタリング TCP/IP 入門編第2版, オーム社 (1998).
- 7) スティーブンス, W.R.: UNIX ネットワークプログラミング第2版 Vol.1 ネットワーク API: ソケットと XTI, ピアソン・エデュケーション (1999).
- 8) Harold, E.R.: Java ネットワークプログラミング第2版, オライリージャパン (2001).
- 9) 小高知宏: 基礎からわかる TCP/IP Java ネットワークプログラミング, オーム社 (1999).

(平成14年5月10日受付)

(平成15年12月2日採録)



亀井陽一郎

2002年宮崎大学工学部情報システム工学科卒業。現在株式会社シーード勤務。



平沼 賢次

1986年東京商船大学大学院修士課程修了。同年東京商船大学船用制御工学科助手、その後講師を経て、1990年より同大学交通電子制御工学講座助教授。数値解析手法に基づく制御系設計法の研究に従事。計測自動制御学会、日本船用機関学会等の会員。



田伏 正佳 (正会員)

1988年神戸大学大学院自然科学研究科博士課程修了。1992年宮崎大学工学部助手、1999年同助教授、2003年京都府立大学人間環境学部助教授。マルチエージェントシステム、知能ロボットの研究に従事。日本物理学会、電子情報通信学会の会員。



高橋 伸弥

1994年宮崎大学工学部情報工学科卒業。1996年宮崎大学工学研究科情報工学専攻修了。同年同大学教務職員、1999年同大学助手、制御理論の研究に従事。計測自動制御学会の会員。



河野 通夫 (正会員)

1974年名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。同年同大学助手、1979年東京商船大学助教授、1992年宮崎大学教授。制御理論の研究に従事。システム制御情報学会、計測自動制御学会、日本機械学会の会員。