

ネットワークパケット転送時間変動の事例調査

藤岡 与周*・苫米地 宣裕**

Research for Variation Pattern of Network Packet Transfer Time Delay

Yoshichika FUJIOKA* and Nobuhiro TOMABECHI**

Abstract

In this paper, we report some kinds of variation patterns of packet transfer delay on the Internet. We selected the round-trip paths of packet transfer from Hachinohe to Hokkaido, Hirosaki, Aomori, Akita, Iwate, Sendai, Tokyo, Kyoto, Kyusyu and Okinawa. The round-trip time (RTT) of packets are measured by using ping command executed every 30 minutes during one year of 2003. From the measurement results, we can see minimum RTT proper to each network path. Moreover, the RTT variation patterns depend on the network utilized ratio. The RTT is not so changed from midnight to early morning. On the other hand, the RTT is vastly changed from daytime to midnight on weekday. Therefore, for network application such as bilateral robot control via the Internet, we must consider the minimum RTT and the variation of RTT for each network path.

Key words: round-trip time, packet transfer delay, Internet, networked robots, feedback control

1. ま え が き

インターネットの普及に伴い、ネットワークを利用したマルチメディア応用に加えて、近い将来ネットワークを利用したロボットシステムが多く利用されるようになると思われる。この場合、パケット転送時間の不規則性が大きな問題になることが多い。本稿では、ネットワークを利用したロボット制御システム事例におけるパケット転送時間問題の具体例を示すとともに、実際のネットワーク上でのパケット転送遅延がどのような傾向にあるか調査した結果を報告している。

2. ネットワーク遠隔操作ロボットシステムの構成

ネットワークを利用したロボットシステム応用の一種である遠隔操作ロボットシステムの構成にはいくつかの種類が存在するが、そのなかで作業対象にかかる力情報を操作側で感じながら作業が可能な、双方向力フィードバックを有するバイラテラル遠隔制御システムの基本構成を図1に示す。本システムでは、操作側マニピュレータの関節変位が作業側マニピュレータの関節変位指令 X_m として送られ、作業側マニピュレータではローカルに関節変位フィードバック制御がなされている。また、作業側マニピュレータで得られた力情報が操作側マニピュレータの力指令 F_s として送られ、操作側マニピュレ

ータでローカルに力フィードバック制御がなされている。従って、作業側、操作側それぞれのローカルなフィードバックに加えて、図1からもわかるように、操作側からの関節変位指令が与えられてから作業側の力情報が操作側に戻ってくるという、ネットワークを介した大きなフィードバックループが存在している。

一般に、フィードバック制御システムでは、フィードバックループ内の遅延時間が大きいほどシステムの状態が不安定になることが知られている。バイラテラル遠隔制御システムでは、特にネットワークを介した大きなフィードバックループの遅延時間減少が、システムの安定性確保に重要となる。

バイラテラル遠隔制御システムの応用例として、原子力設備など人間が容易に近づけない場所での安全な作業などが挙げられる。このような場合、操作側マニピュレータと作業側マニピュレータとの間のネットワークは専用線で接続されており、またその距離も短い場合が多い。従って、ネットワーク遅延も一定かつ余り大きくないため、システムの安定性を確保することが比較的容易と考

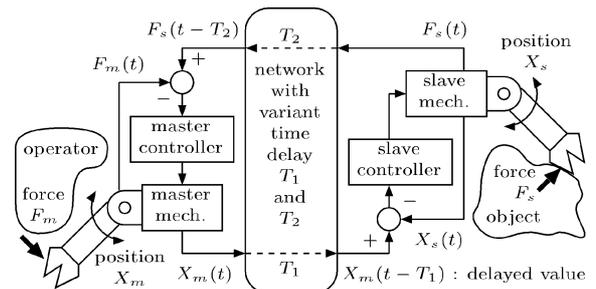


図1 バイラテラル遠隔制御システム

平成17年1月7日受理

* 八戸工業大学・助教授

** 八戸工業大学・教授

えられる。

一方、近年のインターネットの普及に伴い、インターネットを介したバイラテラル遠隔制御システムを構築する場合には、ネットワーク上で転送されるパケットの転送時間が数十 ms 程度でありかつ不規則に変化するとともに、場合によってはパケット自体が途中で失われたり、到着順序が入れ変わったりする場合もある。また、このようなパケット転送時間の発生確率を統計的に定式化することは難しい。従って、システムの安定性を確保することが、特にマニピュレータを高速に動作させる場合には困難になるという問題がある。

このように変動するパケット転送時間の条件下にてバイラテラル遠隔制御システムの安定性を確保する手法として、従来は、十分に大きなネットワーク遅延時間を設定し、遅延時間が一定の条件でスミス法などにより制御を行う方法や、パケット転送時間の変動が余り大きくない前提にてその変動分を考慮した制御法などが提案されている。しかしいずれも、ある程度のパケット転送時間がフィードバックループ内の遅延として存在するため、高速にマニピュレータを動作させることが難しいと考えられる。

そこでわれわれは、パケット転送時間分の未来情報を、マニピュレータ物理モデルに基づくシミュレーションで予測し、それを転送することにより、パケット転送時間を隠蔽し高速なマニピュレータ動作を可能とする概念を提案している。本システムの構成を図2に示す。図1の基本構成に加えて、図2ではモデルに基づくシミュレーションを各サンプリング時間毎に高速に実行する処理と、過去に受信した未来情報を蓄積しその中からもっとも信頼性の高い情報を制御指令に送る処理などが追加されている。このため、原理的にはネットワーク遅延がゼロの状態での処理が可能となる。あるいは、さらに予見制御も可能になると考えられる。

このような新しい概念が実際のネットワーク環境で実用的かどうかを調査するためには、システムシミュレ

ーションを行うことが有用である。しかし、パケット転送時間については具体的にどのようになるか不明であるため、実際のネットワークにおけるパケット転送時間について調査する必要がある。

3. ネットワークパケット転送時間計測システムの構成

図1や図2に示すように、ネットワークを経由した操作側から作業側へのパケット転送時間 T_1 や逆に作業側から操作側へのパケット転送時間 T_2 を直接計測するためには、操作側と作業側に正確な時計を用意して、送信時刻と受信時刻からその差を求めればよい。しかし、通常のコンピュータに内蔵されている時計は少なくとも ms オーダの誤差を含むことが多く、複数台の PC 間の時計が正確に同期がとれていることは保証されないため、正確に T_1 や T_2 を求めることは難しい。そこで、RTT (Round Trip Time) と呼ばれるパケット往復時間 $T_1 + T_2$ を求めることができる ping コマンドを利用する。パケットを送信してから送り返されるまでの時間を計測することにより、コンピュータ間の時計の同期がとれていなくても比較的高精度に RTT を求めることができる。仮定として、往路と復路の遅延時間が同一であるとすれば、 T_1 や T_2 を求めることも可能である。

Ping コマンドを実行するコンピュータとして、八戸工業大学工学部システム情報工学科内の FreeBSD マシン (学内 LAN 経由) と、八戸市是川団地内の FreeBSD マシン (ISDN 経由) を用意した。また、ping コマンドの宛先として、弘前大学、青森大学、岩手大学、北海道大学、東北大学、東京大学、京都大学、九州大学、琉球大学のそれぞれの Web サーバを選んだ。また、Ping コマンドを 24 時間 30 分毎に 10 パケットずつ各宛先に送信し、各パケットの RTT の最大値、最小値、平均値、分散を記録するシステムを構築した。さらに、2003 年 1 月から 12 月まで基本的に毎日調査することとした。

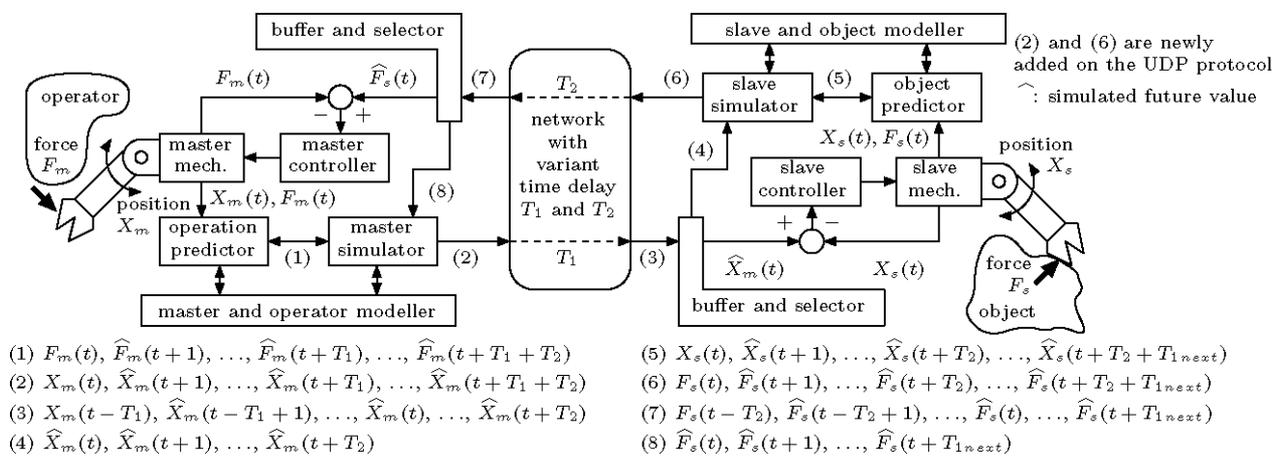


図2 ネットワーク遅延隠蔽型バイラテラル遠隔操作システム

4. 実験結果

年間の RTT 計測結果について、八戸工業大学と各大学 Web サーバ間の RTT 最大最小値を図3から図7に、八戸市内からプロバイダを経由して各大学 Web サーバまでの RTT 最大最小値を図8から図12にそれぞれ示す。

八戸工業大学は基本的に弘前大学を経由して SINET に接続されている。図3(b)に示すように、他大学と比較して RTT 最小値が2003年1月は約24ms、2月以降は約7ms程度と最も小さいのは、ネットワーク的に弘前大学が最も近いためである。また、1月と2月以降とでこのように RTT 最小値が変化した理由は、八戸工業大学と弘前大学間のネットワークが2003年1月までは512 kbps NTT 専用回線であったのに対し、2月以降は100 Mbps 広域イーサネット(東北インテリジェント通信)に変更されたためと考えられる。このように、単にネットワーク配線距離のみならず、通信帯域などによりパケッ

ト転送時間が変化することが明らかとなった。ここで、図3において8月下旬から9月上旬および9月下旬から11月上旬までのデータが欠落しているのは、ネットワークメンテナンスに伴う測定中止後、測定システム立ち上げ時不具合があったためである。図3より考えられることは、

- (1) ネットワーク接続トポロジが変化しない場合、ネットワーク帯域を向上させることにより、使用するネットワーク機器の性能向上などもあいまって、RTT 最小値を減少させることができる場合がある。
- (2) ネットワーク帯域と比較してトラフィック量が十分少なければ、パケット転送時間の変動は十分小さい。
- (3) 高速ネットワークを備えていると、時間の経過とともにネットワーク利用者がより広帯域を必要とするアプリケーションを利用する頻度が多くなるため、それに応じて RTT の変動も大きくなる。

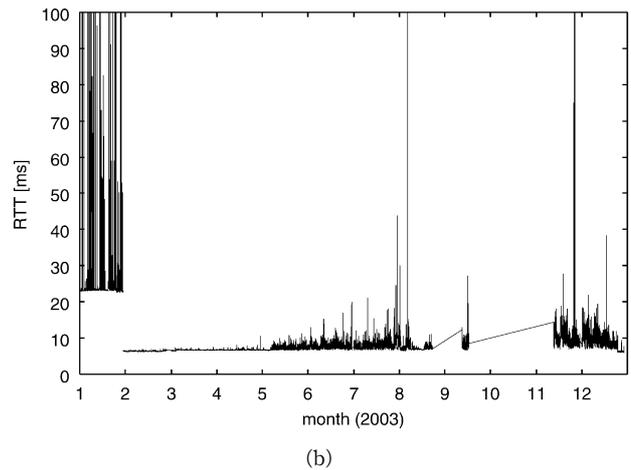
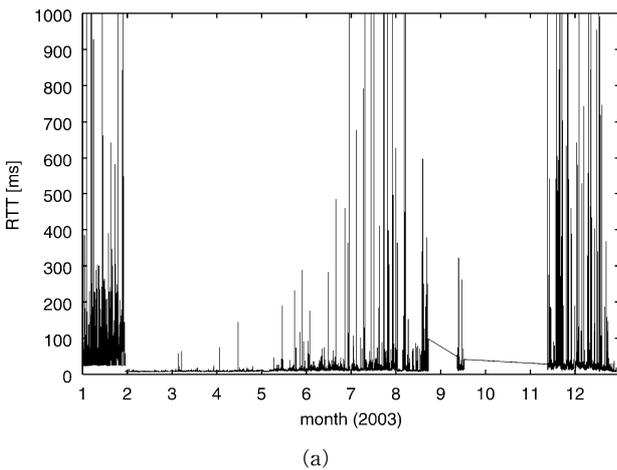


図3 八戸工業大学と弘前大学間の RTT 計測結果
(a) 最大値 (b) 最小値

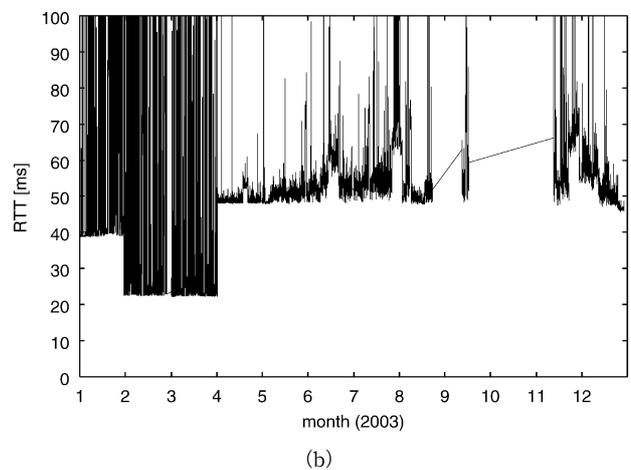
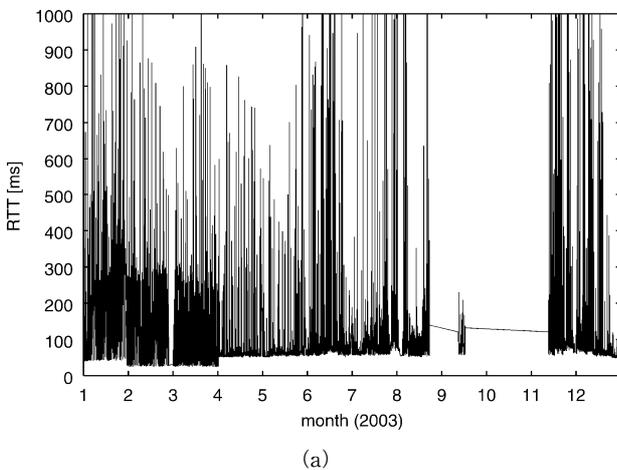
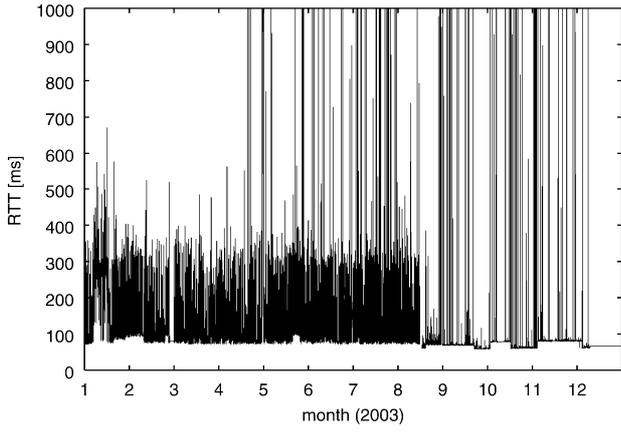
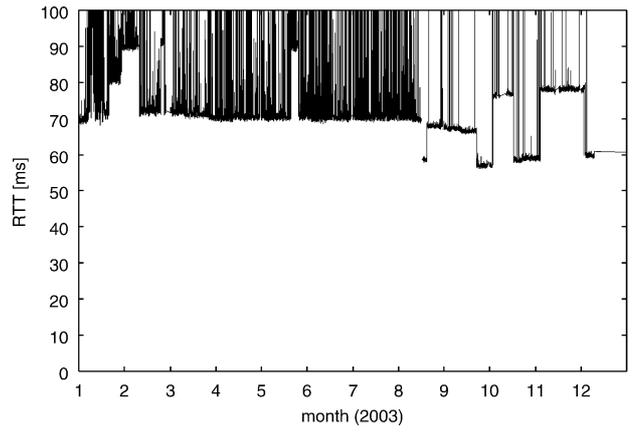


図4 八戸工業大学と秋田大学間の RTT 計測結果
(a) 最大値 (b) 最小値

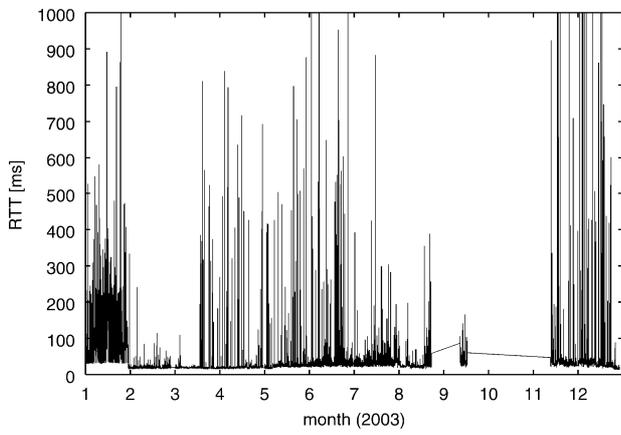


(a)

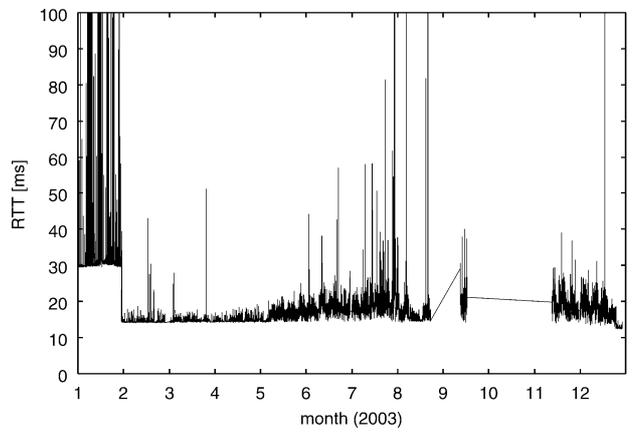


(b)

図5 八戸工業大学と岩手大学間の RTT 計測結果
(a) 最大値 (b) 最小値

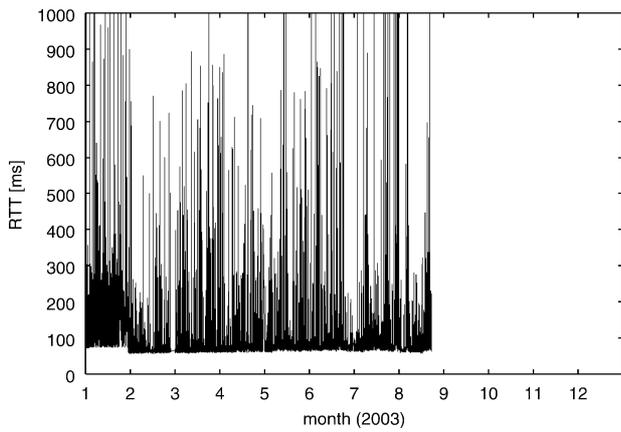


(a)

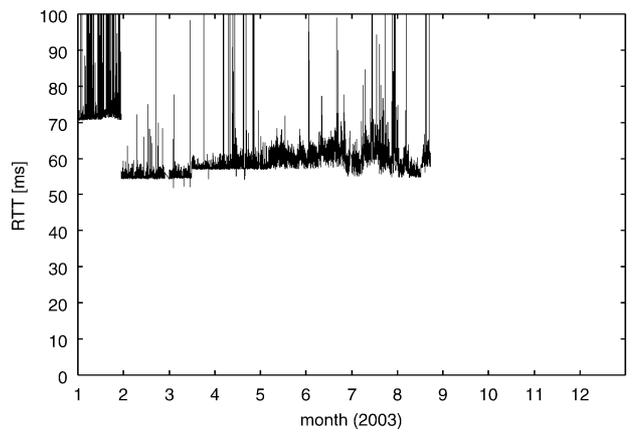


(b)

図6 八戸工業大学と東北大学間の RTT 計測結果
(a) 最大値 (b) 最小値



(a)



(b)

図7 八戸工業大学と琉球大学間の RTT 計測結果
(a) 最大値 (b) 最小値

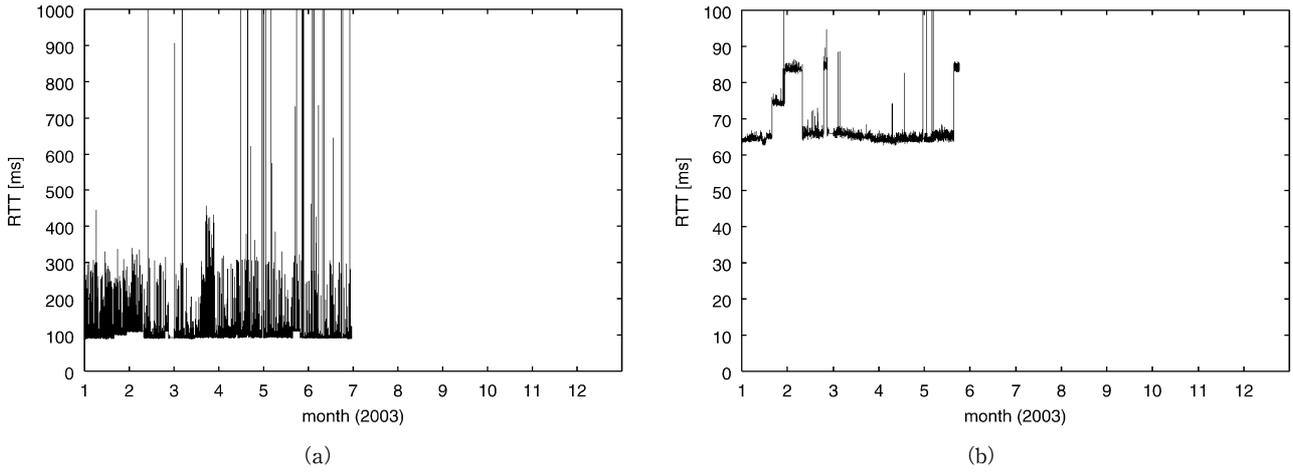


図8 八戸市内と弘前大学間の RTT 計測結果 (ISDN 経由)
(a) 最大値 (b) 最小値

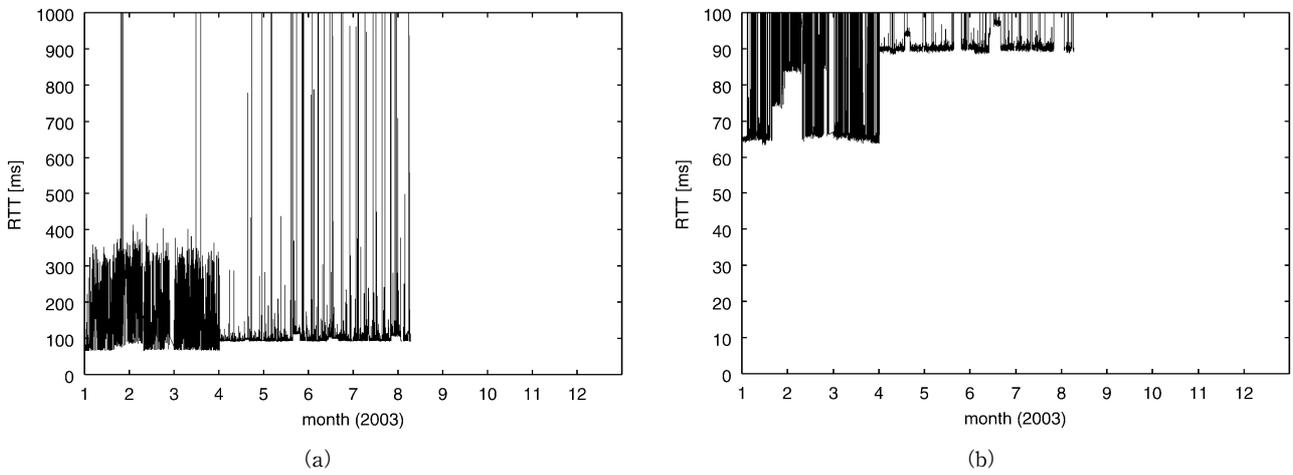


図9 八戸市内と秋田大学間の RTT 計測結果 (ISDN 経由)
(a) 最大値 (b) 最小値

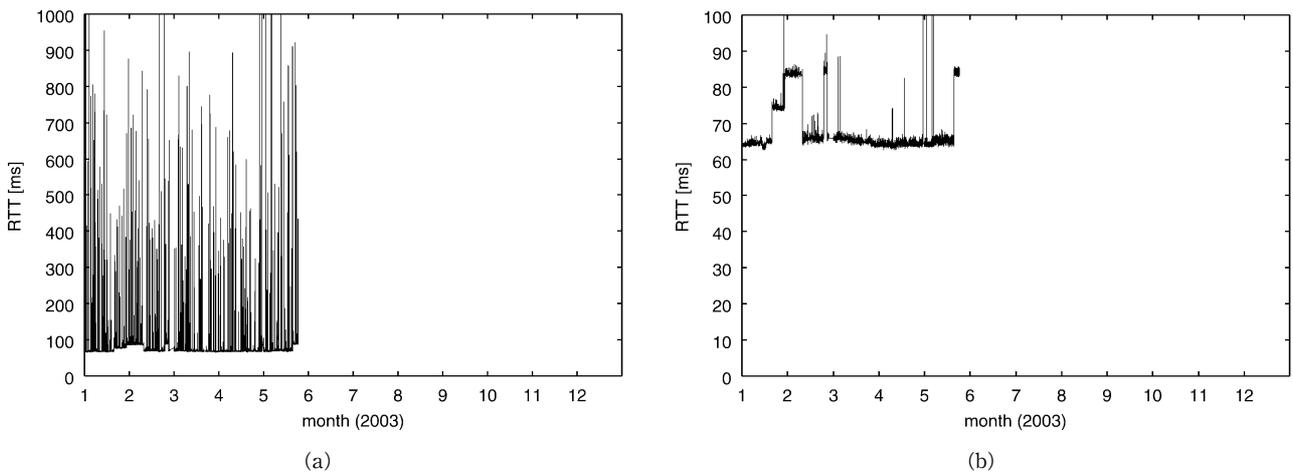


図10 八戸市内と岩手大学間の RTT 計測結果 (ISDN 経由)
(a) 最大値 (b) 最小値

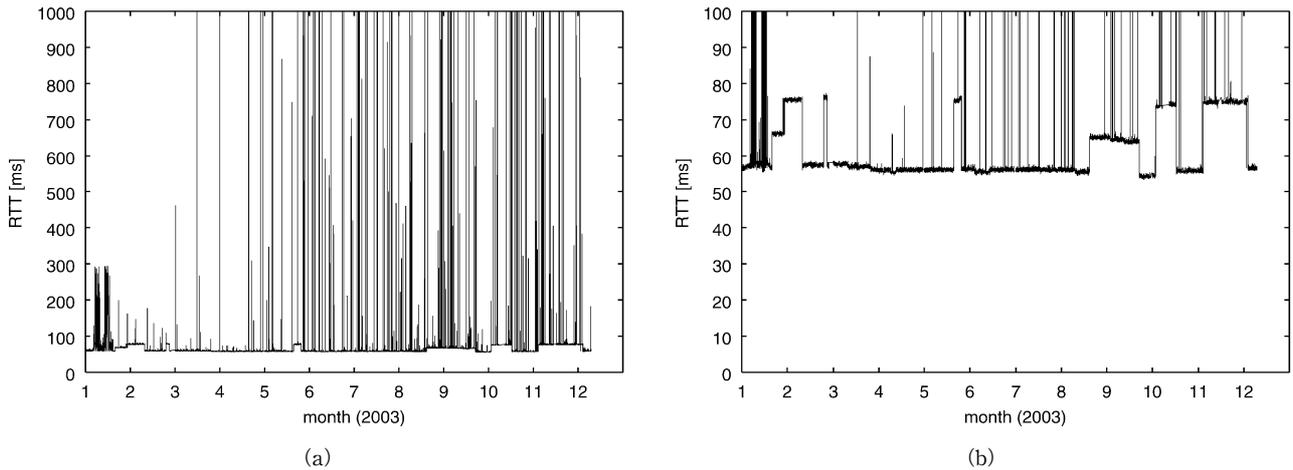


図11 八戸市内と東北大学間のRTT計測結果 (ISDN経由)
(a) 最大値 (b) 最小値

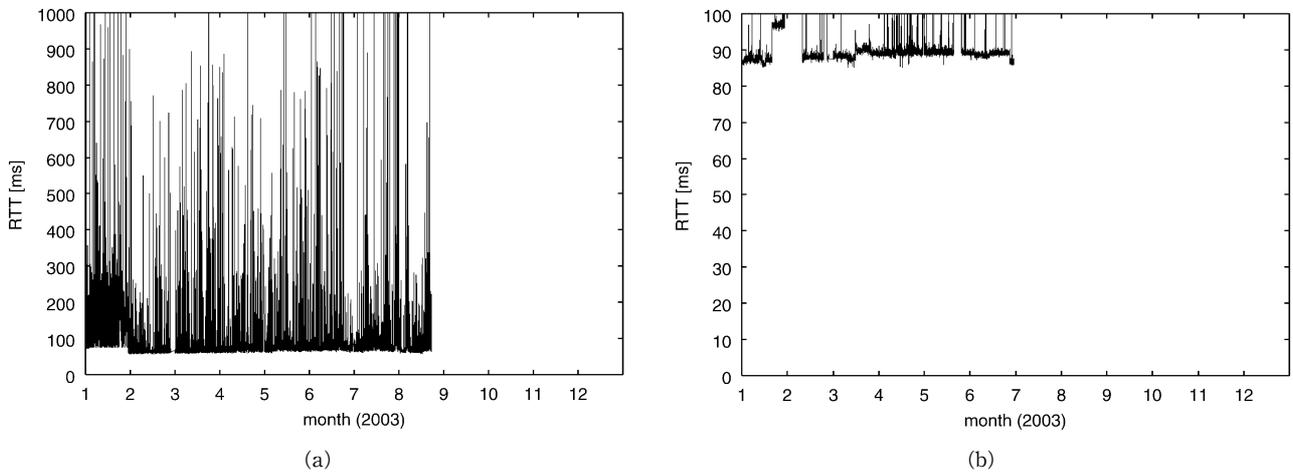


図12 八戸市内と琉球大学間のRTT計測結果 (ISDN経由)
(a) 最大値 (b) 最小値

(4) パケット転送時間は、時不変の確率変数で表現することはできず、そのパターンはおそらく社会情勢や季節など様々な要因で大幅に変化する。

ことである。

図4は八戸工業大学と秋田大学間のRTT測定結果を示している。弘前大学までのRTTと同様に、2月前後に加えて4月前後でRTT最大値パターンとRTT最小値が大幅に変化している。これはおそらく、秋田大学において4月より高速なネットワーク環境に移行したためと考えられる。ここで、RTT最小値がむしろ増大しているのは、秋田大学からのネットワークが接続されるアクセスポイントも変更になり、通過ルータ数やネットワーク経路長が長くなったためと考えられる。

図5は八戸工業大学と岩手大学間のRTT測定結果を示している。青森大学までのRTTと同様に、最大値最小値ともに大幅なRTTの変動が見られる。おそらく、ネットワーク利用率が常に高い状況にあるためと考えられる。なお、図4(b)において1月までと2月以降でRTT最小

値が変化するのは、八戸工業大学におけるネットワーク環境の変化に起因するものと思われる。それとは別に、8月下旬から更にRTT最小値が減少し、またRTT最大値も8月までと12月頃ではその発生パターンが異なるのは、おそらく岩手大学またはその周辺でネットワーク機器や回線速度などが変更されたためと考えられる。

図6と図7はそれぞれ東北大学までのRTTと琉球大学までのRTTを示している。図3の弘前大学までのRTTと比較すると、遠方になるに従いRTTの最小値と変動が増大しているが、ほぼ同じ傾向にあるといえる。北海道大学、東京大学、京都大学、九州大学それぞれまでのRTTでも同様の傾向が見られた。表1に、八戸工業大学から各大学までの2月以降のRTT最小値とRTT最大値を示す。この結果、八戸工業大学からまず弘前大学までの遅延が最も小さく、ついで東北大学、青森大学、岩手大学、東京大学、京都大学、九州大学、北海道大学、琉球大学の順にRTT最小値が大きいくことがわかった。八戸から近い青森大学や岩手大学に比べて、弘前大学や東

表1 八戸工業大学と各大学間の RTT 最小値 (2 月以降) と RTT 最大値

Ping 対象 Web サーバ	RTT 最小値 (ms)	RTT 最大値 (ms)
北海道大学	37	18,902
弘前大学	7	10,481
青森大学	18	18,704
秋田大学 (※1)	23 → 49	17,946
岩手大学 (※2)	29 → 18	16,703
東北大学	15	3,925
東京大学	21	16,558
京都大学	32	19,179
九州大学	37	14,910
琉球大学	56	13,507

※1: RTT 最小値 4 月以降
 ※2: RTT 最小値 8 月以降

表2 八戸市内から各大学までの RTT 最小値 (1 月頃) と RTT 最大値 (ISDN 経由)

Ping 対象 Web サーバ	RTT 最小値 (ms)	RTT 最大値 (ms)
北海道大学	67	2,094
弘前大学	64	2,501
青森大学	78	19,658
秋田大学	66	5,453
岩手大学	69	9,425
東北大学	56	10,729
東京大学	51	9,605
京都大学	63	4,230
九州大学	68	5,122
琉球大学	87	5,491

北大学の方が RTT 最小値が小さいのは、ネットワーク的に八戸工業大学がまず弘前大学に接続されていること、弘前大学と東北大学の間は SINET など高速に接続されていることなどが考えられる。

図8から図12までは、八戸市内から ISDN 経由による各大学までの RTT 最大最小値の年間変動パターンを示している。ここで、図8、図9、図12において6月(8月)以降のデータが無いのは、RTT 計測に使用していた PC が停電で故障し、その際にハードディスク内に保存されていた計測データの一部が失われたためである。図3から図7までと、図8から図12までのそれぞれ対応する RTT を比較すると、八戸工業大学における1月末のネットワーク環境変更の影響は当然のことながら八戸市内からの RTT には反映されていないことがわかる。逆に、図10(b)にあるように、RTT 最小値は数日単位で大幅に変化していることがわかる。八戸市内から ISDN 回線を通じてプロバイダ接続しているため、プロバイダ側の都合は知ることが出来ないが、例えばネットワーク機

器やパケット転送経路などが時々変化しているのではないかと考えられる。

表2に、八戸市内から各大学までの1月頃の RTT 最小値を示す。表1とは異なり、東京大学までの RTT 最小値が最も小さく、東京から離れるに従って RTT 最小値が増加する傾向にある。これは、ISDN 経由でおそらく東京付近にあるプロバイダまでパケットが転送された後、各大学にパケットが転送されているためと考えられる。この事は、RTT 最大値の変動パターンが、東京に近い東北大学では余り大きくなく、弘前大学、岩手大学、琉球大学の順に変動パターンが大きくなることから推測できる。また、表1に比べて表2の RTT 最小値がいずれも大きい値を示しているのは、ISDN が 64 kbps と 100 Mbps に比べると数桁遅い回線であるためと考えられる。逆に、表2の RTT 最大値が表1の最大値に比べて全般的に低い値を示している。

八戸工業大学と岩手大学間の、週間での RTT 最大値変動パターンについて、変動が大きい7月27日(日)から8月2日(土)までと、変動が比較的少ない11月30日(日)から12月6日(土)までの計測結果を図13に示す。

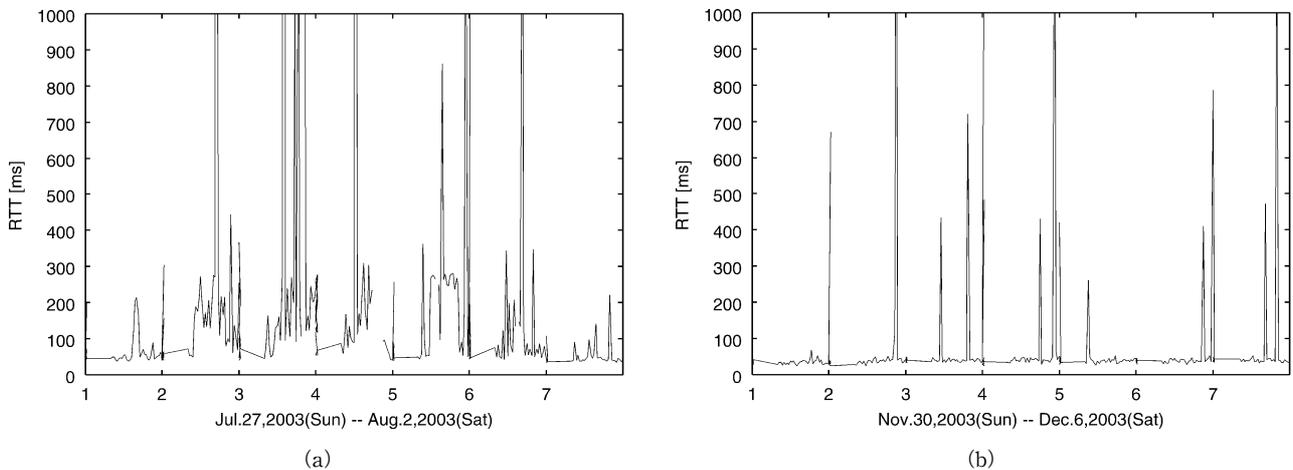


図13 八戸工業大学と岩手大学間の RTT 計測結果 (週間)
 (a) 変動が大きい例 (b) 変動が小さい例

この結果、深夜12時頃から朝まではRTTは小さく、平日午前中から深夜にかけてRTT最大値は大幅に変動していることがわかる。また、土日と同様の傾向にあるものの、RTT最大値は平日ほど大きくはない。これは、ネットワーク負荷が平日の日中から深夜にかけて多いことを示しているものと考えられる。また、図13(b)では(a)ほど頻繁にRTT最大値が変動せず、一時的に増大している。これは、ネットワーク回線速度やネットワーク機器が高性能なものになり、ネットワーク負荷に対して処理能力の余裕が増大したためと考えられる。

5. む す び

具体的なインターネット上のパケット転送遅延を複数の経路にて調査した結果、ネットワーク利用率と時間帯により大幅にRTT変動パターンが異なることが明らかとなった。このため、ネットワークを利用したロボットシステム応用では、RTT最小値が数msから数十msの条件に加え、RTTの変動がほとんどない場合から20秒程度まで大幅に変化する条件それぞれにおいて安定性な

どの確保が可能かどうか評価する必要があることがわかった。

モデルシミュレーションに基づくパケット転送時間隠蔽の概念は、高速な演算性能が要求されるものの基本的にはどのようなRTT条件下でも適用できると考えられる。今後の課題として、実際のネットワーク上のパケット転送遅延パターンを再現するネットワークシミュレータを開発し、モデルシミュレーションに基づくパケット転送時間隠蔽システムのシミュレーション評価による検討が重要と考えられる。

参考文献

- 1) 汐月哲夫: “インターネットを介した双方向遠隔制御における伝達遅延問題, 計測と制御, Vol. 41, No. 7, pp. 507-512 (2002).
- 2) Y. Fujioka, N. Tomabechei and M. Kameyama: “Design of a Parallel VLSI Processor for Tele-Robot Systems Based on Dynamic Reconfiguration of Power Supply Voltages”, Proc. of SICE 2003 Annual Conference, pp. 2638-2643 (2003).