

パケット自己消滅手法によるネットワーク時刻同期精度の向上

北口 善明^{†1} 町澤 朗彦^{†2} 鶴 正人^{†3}
尾家 祐二^{†3} 箱崎 勝也^{†4}

インターネットが重要なインフラとなるにつれ、ネットワークの品質管理の必要性が増してきている。そのため、現在のトラフィック量や回線のエラー発生率などを正確に把握することが運用上重要となる。このネットワークの状態を正確に計測するためには、計測するネットワーク両端の機器の時刻精度が大きく影響し、精度良く同期している必要がある。本稿では、ネットワークを介した時刻同期の精度向上を目的とし、その解決手法としてネットワークからの支援を用いた「パケット自己消滅手法」を提案する。ネットワーク支援に最小機能アクティブネットワークの仕組みを用いてパケットの制御を行い、最大キュー長制限方式（MTQ方式）と全キュー長制限方式（QTL方式）の2方式による制御を可能とする。本稿では、本提案手法の有効性についてシミュレーションと実証実験により有効性を明らかにした。

The Advanced Network Time Synchronous System by Self-discarding Packet Technique

YOSHIAKI KITAGUCHI,^{†1} AKIHIKO MACHIZAWA,^{†2} MASATO TSURU,^{†3}
YUJI OIE^{†3} and KATSUYA HAKOZAKI^{†4}

As the Internet have become an important infrastructure in everyday life in recent years, the need to increase the degree of quality control has also arisen. Because it is necessary to accurately understand the state of the network for quality control, time information on measurement equipment has become important. Consequently, we have aimed at improving the precision of time synchronization through the network and propose highly precise time synchronization techniques that utilize network support. Two approaches are MTQ (Maximum Transmission Queue) and QTL (Queue To Live) both employing the suggested “self-discarding packet technique”, which is a means of determining transfer by comparing the queue length of the transiting router with a specified queue value on the probing packet. In this paper, we clarify the influence a router has on the precision of time synchronization and report these two approaches and their adaptability.

1. はじめに

近年、ネットワークが生活の重要なインフラとなるにつれ、その品質管理の必要性が増している。このネットワーク品質には、現在のトラフィック量や回線のエラー発生率などがあげられ、これらを正確に把握することがネットワークの運用上重要となる。この要求

に応えるためには、機器単体の時刻精度と同様に、機器間の時間が精度良く同期していることが必要となる。この時刻同期のために、一般的にネットワークで用いられているものに Network Time Protocol (NTP)¹⁾がある。NTPでは時刻源を有する上位サーバに対し、ネットワーク経由で時刻同期リクエストを送ることにより自身の時刻を修正する。この際、時刻の計測にパケット往復の通信遅延時間が含まれてしまうが、この通信時間を行きと帰り等で等しいものとして処理を行うことで時刻同期を可能にしている。このとき、ネットワークの品質が悪いと往復の通信遅延時間が等しく扱えなくなり、そのため、時刻同期の精度が劣化してしまうことになる。この通信遅延時間の変動による影響で、ネットワークを介した時刻精度は、数 ms から数十 ms 程度に落ちることが分かっている^{3),4)}。

^{†1} インテック・ウェブ・アンド・ゲノム・インフォマティクス株式会社
INTEC Web and Genome Informatics Corporation

^{†2} 情報通信研究機構
Communications Research Laboratory

^{†3} 九州工業大学
Kyushu Institute of Technology

^{†4} 電気通信大学
University of Electro-Communications

一方、近年のネットワークは非常に高速になっており、その計測のためには高精度な時刻精度が必要となっている。たとえばギガビットイーサネットでは MTU サイズの packets (1,500 バイト) が通過する時間が $12\mu\text{s}$ と非常に小さくなり、そのため、 μs 台の時刻精度が必要となる。現在行われているネットワーク計測の研究では、 μs 台の時刻精度を得るために GPS を用いて時刻同期させる方法が一般的に用いられている。しかし、GPS は広域時刻同期に最適なものであるが、アンテナを屋外に設置しなければならず、そのためアンテナ設置が不可能な場所では利用できない問題がある。また、同一セグメント内における機器間の時刻同期に焦点を当てた手法として IEEE1588²⁾ が策定されているが、この手法ではルータを経由した場合におけるキュー遅延による影響を解消する手法は考慮されておらず、経路するルータすべてを時刻同期させる必要がある。この場合、全ルータで複雑な時刻同期処理を行う必要があり、また精度向上のためには高精度な時計をルータに用意する必要があるので、コスト的に現実的ではない。

そこで本稿では、ネットワークを介した時刻同期の精度向上を目的とし、その解決手法としてネットワークからの支援を用いた方法である「パケット自己消滅手法」を提案する。本方式は、我々が提案する最小機能アクティブネットワークの枠組み⁹⁾ で実現する機能の一例として用いているものであるが、アクティブネットワークの普及を前提にした手法としておらず、ルータへのオーバーヘッドは微弱である。また、時刻同期以外にも用途があるため⁹⁾、将来ルータ機能として実装され普及されうる可能性は十分にあると考えられる。さらに、混雑するルータが対応することにより、経路中の全ルータが対応していなくても十分な効果がある方式である。

以下の章において、本稿にて提案する手法の有効性をシミュレーションと実装実験により評価する。

2. 時刻同期技術とその精度

2.1 NTP

NTP はネットワークを介して時刻同期を行うプロトコルとして広く利用されている。この NTP では、世界協定時間 (UTC: Coordinated Universal Time) を得たサーバ (Stratum 1) を頂点として階層構造を形成し、各 NTP サーバでは自身より 1 階層上のサーバまたは同階層のサーバから時刻情報をネットワーク経由で取得し時刻同期を行っている。時刻同期に用いる時刻情報は NTP タイムスタンプ形式で持っており、

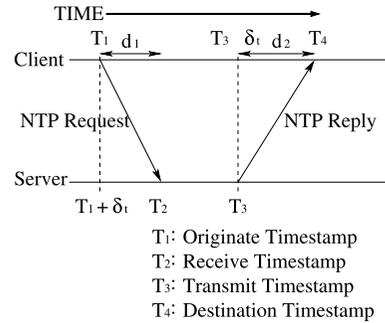


図 1 NTP における時刻同期のながれ
Fig. 1 NTP flow diagrams.

このタイムスタンプは 64 ビットの無符号固定小数点数を用い、1900 年 1 月 1 日 0 時から秒数で表現される。この設計により、最大値 4,294,967,295 秒を約 100 ps の精度で表現することが可能である。また現在は μs 以下の精度は利用されないため、下位ビットは 0 で埋められているが、将来、時刻精度の向上が求められた場合でも十分対応できる設計となっている¹⁾。

時刻のオフセット値 (正しい時刻からのずれ) は上位サーバの参照時刻と自身の内部時刻との差で得られるが、ネットワークを介して時刻同期を行う場合ネットワークの通信遅延時間の影響を受けることになる。NTP では、この通信遅延時間の影響を双方向通信により打ち消すことで、ネットワーク経由の時刻同期を可能にしている。図 1 に NTP での時刻同期パケットの通信手順を示す。クライアントでの送受信時間をそれぞれ T_1, T_4 、サーバでの送受信時間をそれぞれ T_2, T_3 、クライアントとサーバ間の時刻オフセットを δ_t とすると、クライアントの送信パケットの通信遅延時間 d_1 と受信パケットの通信遅延時間 d_2 は次のように定義できる。

$$d_1 = T_2 - (T_1 + \delta_t) \quad (1)$$

$$d_2 = (T_4 + \delta_t) - T_3 \quad (2)$$

この式 (1) と式 (2) から δ_t は次式 (3) のように求める。

$$\delta_t = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3) - (d_1 - d_2)}{2} \quad (3)$$

NTP では往復の通信遅延時間差がない ($d_1 - d_2 = 0$) として計算するため、往復の通信遅延時間の差すなわち通信遅延時間の“ゆらぎ”が大きい場合に、測定される時刻オフセット値に大きく影響を与えることが分かる。

2.2 NTP の精度測定

前述した NTP では、通信遅延時間の影響を回避するために、統計的手法を用いた時刻同期の精度向上を

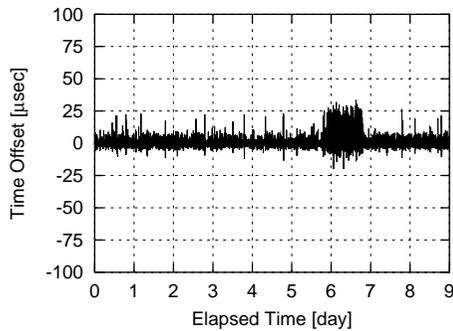


図 2 ルータを経由しない場合の時刻同期精度

Fig. 2 The accuracy of time synchronization (no router).

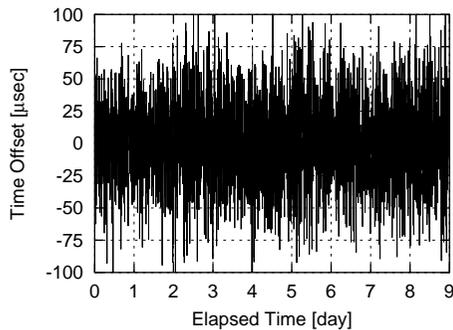


図 3 ルータを経由した場合の時刻同期精度

Fig. 3 The accuracy of time synchronization (via router).

図っているが、完全に通信遅延時間のゆらぎの影響を除去するには至っていない。また、この統計処理のためにプロトコルが複雑なものになっている。

そこで、NTP がネットワークの通信遅延時間のゆらぎから受ける影響を実際に調べることにした。ネットワークでの通信遅延時間のゆらぎの原因には、経由するルータでのキューイングによる遅延時間のゆらぎが大きいと考え、ルータによる影響の測定を実施した。測定方法としてルータを 1 台経由した場合の時刻同期精度と同一セグメント上でルータを経由しない場合の時刻同期精度をそれぞれ計測し比較する方法をとった。純粋にネットワークの影響を比較するために、高精度時刻 PC を Stratum 1 および Stratum 2 にそれぞれ用いている。この高精度時刻 PC は、PC 内部のクロックを外部からの高精度信号に置き換えることを可能にした PC で、数百 ns 精度で時刻を安定して刻むことを実現している^{5),6)}。この計測では、高精度時刻 PC をそれぞれルビジウム基準信号発信器の信号で駆動することで、Stratum 2 での NTP による時刻修正の変動をネットワークの通信遅延時間のゆらぎによるものとする。

図 2、図 3 に Stratum 2 での時刻オフセット値の

変動を示す。前者が同一セグメント上でルータを経由しない場合の時刻同期、後者がルータを 1 台経由した場合の時刻同期のそれぞれ 9 日間の観測結果である。この経由するルータにはクロストラヒックが流れており、そのトラヒックの影響によるキューイング変動が発生し、そのため、通信遅延時間のゆらぎが観測されることになる。この測定結果から分かるように、ルータを経由した場合最大 $100 \mu\text{s}$ 程度の変動を受けており、同一セグメント上での時刻同期精度の約 5 倍程度変動している。この結果を受け、次章ではルータを経由した場合でも同一セグメント上での時刻同期精度に近づけるための手法を提案する。

3. ネットワーク支援による時刻同期

前章で、NTP の精度劣化となるネットワーク遅延時間のゆらぎは、経由するルータでのキューイング変動による影響が大きいことが示された。そこで本章では、ルータによる通信遅延時間のゆらぎを小さく抑えるためのネットワーク支援の仕組みとして、ルータでのキュー長をもとにパケット自身が消滅する「パケット自己消滅手法」を提案する。ここで自己消滅と書いているが、実際は通過するルータにより破棄されることになる。しかし、パケット自身の設定値により破棄が決定される点を強調するために、あえて能動的な表現を用いている。この手法では、時刻同期パケットがルータを通過する際に、あらかじめ指定したキュー長以上となっている場合にその時刻同期パケットは転送されずそのルータ上で破棄される。この処理を行うことで、ルータのキュー遅延時間が大きな場合には時刻同期パケットが破棄されるため、ネットワーク遅延時間のゆらぎを大きく受けた計測パケットを排除することができ、時刻同期の計算を安定させることを可能にする。またこの手法では、ルータにおいてパケットの破棄を実施するだけなので、他のパケットへ影響を与えない利点も有している。

提案する手法には、アプリケーションを意識した経路制御などをルータにて実行可能なネットワークであるアクティブネットワーク⁷⁾の概念を用いており、文献 9) で提案した最小機能アクティブネットワークの枠組みで実現可能な手法として取り上げている。しかし、提案するパケット自己消滅手法は、ルータのキュー長とパケットの情報を比較することにより高遅延が発生するパケットを早期に破棄するものであり、アクティブネットワークの利用を前提に考えているものではない。

本稿では、このパケット自己消滅手法を実装する方

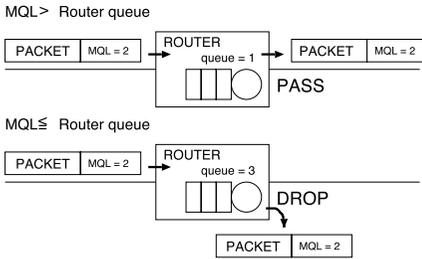


図 4 MTQ 方式の概念図

Fig. 4 The conception diagram of the MTQ approach.

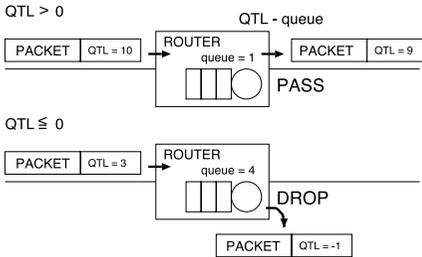


図 5 QTL 方式の概念図

Fig. 5 The conception diagram of the QTL approach.

法として、最大キュー長制御方式と全キュー長制御方式の 2 種類の方式を提案する。以下にそれぞれの方式について解説する。

3.1 最大キュー長制限方式 (MTQ 方式)

最大キュー長制限方式 (以下 MTQ 方式) は、送信するパケットに『経由するルータを通過する際に許可する最大キュー長 (MTQ: Maximum Transmission Queue)』を指定し、その値を超えるキュー長を持ったルータではパケットが破棄される方法である。この方式は、パケットがリンクレイヤにおける最大パケットサイズ (MTU) を超過した場合に破棄される仕組みに似た手法で、その概念図を図 4 に示す。この方法を用いた場合、ルータではキュー長の比較のみを実施するために処理が比較的簡単となる。問題点としては経由するルータの数が増えることにより、各ルータでは小さいキュー遅延であっても合計の通信遅延時間が大きな通信が発生する可能性があり、その場合ゆらぎの抑制につながらないことが考えられる。

3.2 全キュー長制限方式 (QTL 方式)

全キュー長制限方式 (以下 QTL 方式) は、送信するパケットに『経由するルータ群において経験可能な最大総キュー長 (QTL: Queue To Live)』を指定し、経由する各ルータを通過する際に経験するキュー長分を QTL から差し引きし、0 になった場合にパケットを破棄する方法である。概念図を図 5 に示す。これは IP パケットのループ防止のために用いられる TTL

(Time To Live) の仕組みに似た手法で、通過する全ルータでの合計キュー長を指定できることで通信遅延時間のゆらぎの総量をできるだけ小さくすることを可能にしている。この方式では、MTQ 方式の場合よりも広域における場合に遅延変動を小さく抑えることができ、時刻同期精度が良くなると考えられる。また、この手法では各ルータにおいて時刻同期パケット内の QTL を変更する必要があるため、MTQ 方式の場合に比べ各ルータでの処理が大きくなると考えられる。

以上の 2 方式はいずれもパケットの破棄のみを実施し、ICMP などのパケットで破棄があったことを通知することはない。

4. シミュレーションによる評価実験

4.1 提案手法の適応性検証

提案するパケット自己消滅手法の有効性を検証するために、ルータを通過するパケットが経験するルータのキュー長について、シミュレーションによる調査実験を行った。シミュレーションには、VINT プロジェクトによる Network Simulator (ns-2.26)⁸⁾ を用い、ルータを通過する時刻同期パケットが、各ルータにおいて経験するキュー長による遅延時間の確率を求め、この値からルータによる影響を見積もることとした。計測時に各ルータに与えるクロストラヒックとして FTP の通信を用意し、それぞれサーバ・クライアント間で通信を行い、その台数を変化させて影響の比較を行った。また、ルータ間およびエンドノードとルータ間の帯域は 100 Mbps、ルータ内のキューのバッファサイズを 300 パケットとして 1,000 回の試行から対象パケットが経験するキュー長の確率を求めた。

まず、ルータを 1 台経由する場合と 2 台経由する場合でのパケットが経験するキュー長による遅延時間分布を比較する。バックグラウンドトラヒックで FTP セッションを 1,000 としたときの結果を図 6 に示す。ここから、ルータが増えることで累積キュー遅延時間の確率が、 $100 \mu\text{s}$ 以下の部分で大きく上昇することが分かる。これは、MTU サイズのパケットが 100 Mbps の回線を通る時間が $120 \mu\text{s}$ であることから、キューにパケットが 1 つある確率が約 2 倍になっているといえる。

次に、クロストラヒックである FTP のセッション数を変化させ、観測パケットが経験するキュー長による遅延時間が 0 s である確率を求めた。この測定結果を図 7 に示す。この図から、1,000 セッションの FTP トラヒックにより影響を受けたルータを 2 台通過する場合には、パケットがキューにとどまらずに通過可能

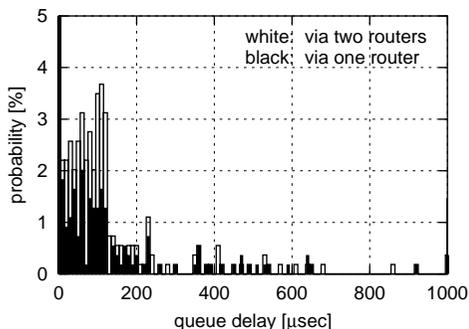


図 6 観測パケットが経験するキュー遅延時間分布
Fig. 6 The distribution of the packet's queuing delay.

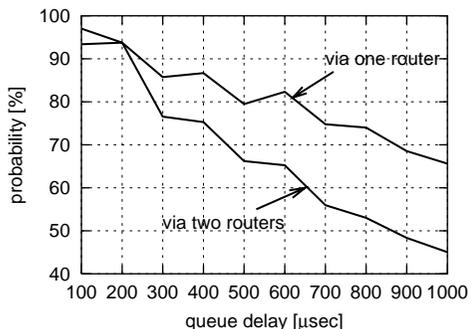


図 7 キュー遅延が 0 である確率
Fig. 7 The probability of the zero queuing delay.

な確率は約 45%にまで下がることになる。

これらの測定結果から、ルータを 1 台経由するだけで最低数百 μ s の影響を受ける可能性があることが分かり、 μ s 精度での時刻同期のためには影響が大きいことから、この影響を排除できる提案手法は有効であるといえる。さらに、通過するルータが少数である場合には、計測パケットがルータ通過時に経験するキュー長が 0 である確率が高いため、提案手法の MTQ 方式にて MTQ = 0 としてルータで影響を受けたパケットをすべて破棄したとしても、十分な計測パケットを確保できており有効であると考えられる。また、ルータが多段になった場合には MTQ = 0 とすると計測パケットの通過確率が非常に低くなってしまいうため、QTL 手法を用いることが必要であると考えられ、精度を上げるためには MTQ 手法との組合せも考える必要がある。

5. パケット自己消滅手法の実証実験

5.1 実装方法

3 章で提案した、ネットワーク支援による時刻同期技術向上手法である「パケット自己消滅手法」の実証

Self-discarding packet technique header format using IPv6 Extension Header (Hop-by-hop option)

Next Heder	Hdr Ext Len	Hbh Opt Type	Hbh Opt Len
Opt Data		Opt Type	Opt Len
MTQ (0-65535) [msec]		QTL (0-65535) [msec]	
Reserved			

図 8 パケット自己消滅手法でのパケットの構成図
Fig. 8 The format for the self-discarding packet technique.

実験のために、パケット自己消滅を行うキュー長監視ルータの実装を行った。今回、ネットワークレイヤでの実装を行うために、IPv6 の拡張ヘッダの 1 つである Hop-by-hop ヘッダを利用した。実装に用いた OS は、IPv6 の拡張ヘッダを扱う API の最新仕様¹⁰⁾ を用いるために、FreeBSD-4.8R に KAME プロジェクト¹¹⁾ による snap-kit を導入したものを利用した。また各インタフェースにおけるキュー長制御には、ALTQ¹²⁾ の仕組みに追加実装を行う方法をとっている。ここで、キュー長による遅延時間はインタフェース帯域値で割算した値として求め、ビット演算により高速化を図っている。この処理により、パケット転送処理において許容範囲のオーバーヘッドに抑えることを可能とした。また、QTL 方式では設定値の書き換えが発生するが、TTL の処理と同程度とできるため、その処理は軽微である。さらに、NTP にも Hop-by-hop ヘッダで QTL および MTQ の各値を指定して時刻同期が可能のように、ntp-4.2.0 をベースとしてパケット自己消滅手法の実装を行い、MTQ/QTL の各パラメータを時刻同期対象ごとに設定可能とした。図 8 にパケット自己消滅手法で用いるパケットの構成図を示す。パケット破棄を決定する各 MTQ/QTL のパラメータは 16 ビットとしており、単位は ms で指定可能としている。

この実装を用い、本稿では MTQ 方式に焦点を当てて、実証実験で得られた効果について考察を行う。

5.2 MTQ 方式の実証実験

パケット自己消滅手法の有効性の検証実験として、実装したキュー長監視ルータ 1 台を経由した場合の NTP を用いた時刻同期実験を行った。前章で NTP の時刻同期精度を計測したときと同様なネットワーク構成を用い、2 台の Stratum 2 を用意し一方は通常の NTP、もう一方に MTQ = 1 と MTQ = 0 を設定したパケットを用いてそれぞれ同じ Stratum 1 に対してポーリング間隔を 64s として時刻同期を行った。図 9 に実証実験時のネットワーク構成を示す。このとき、Stratum 2 から Stratum 1 方向へクロストラヒックを iperf¹³⁾ で発生させ、キュー長の変化が生じるようにしている。このクロストラヒックは TCP コ

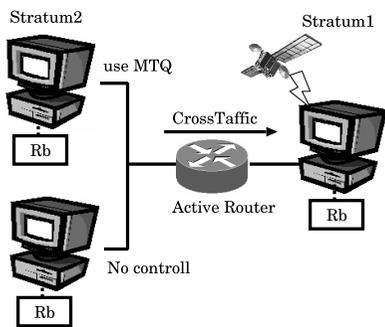


図 9 MTP 方式検証実験の機器構成図

Fig. 9 The composition figure of the MTQ experiment.

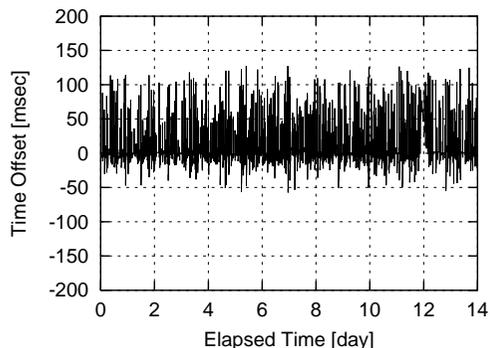


図 10 制御なしの場合の時刻同期精度

Fig. 10 The accuracy of time synchronization (no MTQ).

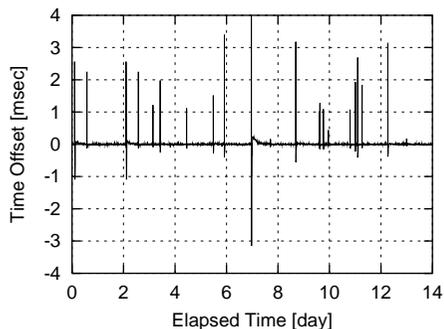


図 11 MTQ = 1 とした場合の時刻同期精度

Fig. 11 The accuracy of time synchronization (MTQ = 1).

ネクシオン 8 本によるもので、30 s 間流し 30 s 間停止することを繰り返すトラフィックとしている。また、よりキュー長の変化を大きくし、観測結果を顕著にするために、Stratum 2 側が 100 Mbps であるのに対して Stratum 1 側のネットワークを 10 Mbps としている。

図 10 に通常の NTP による結果、図 11 と図 12 にそれぞれ MTQ = 1 と MTQ = 0 とした場合の結果を示す。各図の縦軸の値は Stratum 2 で発生した 2 週間の時刻オフセット値の変動を示している。通

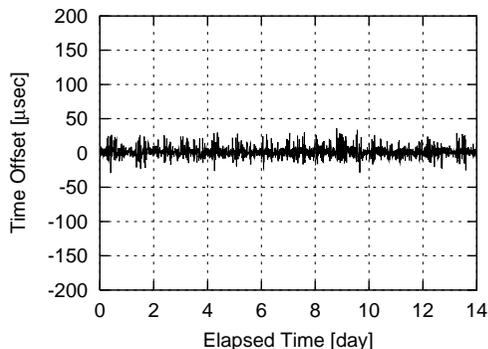


図 12 MTQ=0 とした場合の時刻同期精度

Fig. 12 The accuracy of time synchronization (MTQ = 0).

常の NTP による時刻同期では、クロストラフィックによるキュー長の変化にともなう遅延時間の変化を大きく受け、120 ms 程度の大きな変動が発生していることが分かる。MTQ = 1 とした場合、ときおり大きな変動を観測するが、通常の結果と比較すると時刻オフセット値の変動は小さくなっていることが分かる。MTQ = 0 を指定した場合には、数十 μs 程度の変動しか観測されず、ここから、クロストラフィックによる影響をほとんど受けずに時刻同期ができていることが分かる。

6. 考 察

MTQ = 1 と MTQ = 0 の観測結果の比較から、NTP における時刻修正アルゴリズムにおける統計処理の限界が観測されている。NTP では、周期的なポーリングにより得られた複数の時刻オフセット値を用い、実際に時刻修正を行うオフセット値を統計的に算出して、ネットワーク遅延の変動による影響を小さくしている。具体的には統計的に大きく外れた値が観測された場合には、そのときのデータを使用しないことで影響を受けないようにしているが、その観測値が連続した場合には、そのデータが異常な値かどうか判断が不可能であるため影響を受けてしまう。MTQ = 1 では 1 ms 以下の変動を排除できなかったため、キューイングによる影響が連続して観測された場合に大きな変動として結果に現れたといえる。

これに対し MTQ = 0 とした場合の観測結果では、ルータでのキューイングによる遅延時間のゆらぎを完全に排除できていることから安定した時刻同期精度を得ることができている。この場合、約 50% 程度の時刻同期用パケットが 1 台のキュー長監視ルータ上で破棄されていることが観測されたが、時刻同期を行ううえで十分耐えうる量であり、制御なしでは ms オーダでしか

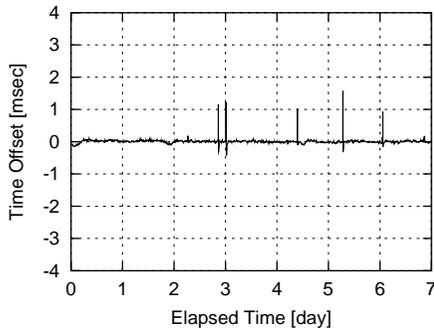


図 13 MTQ = 0 とした場合の時刻同期精度 (一般 PC の場合)
Fig. 13 The accuracy of time synchronization on normal PC (MTQ = 0).

同期できなかったものが μs オーダにまで時刻同期精度を向上させられることが明らかになった。このように MTQ = 0 とすることで、長期間にわたりネットワークによる影響を受けない時刻同期が可能であることを実験から求めることができ、本稿で提案する「パケット自己消滅手法」の有効性が明らかになった。

最後に、破棄されるパケット量が NTP に与える影響について考察する。NTP による時刻同期では、ネットワーク経由時のキュー長変化を排除できれば、周波数一定と考えられる時間内に参照データが 2 つ以上あれば原理的に時刻同期が可能である。すなわち、提案方式で MTQ = 0 とすることでキュー長変化を排除可能であるため、時刻スキュー変動が無視できる範囲内に複数の計測パケットがあれば時刻同期ができるといえる。今回の実証実験ではネットワークの影響を確認するためにルビジウム基準信号発振器を用いており、その時刻安定期間は約 1 週間¹⁴⁾と長く、ポーリング間隔が 64s で十分時刻同期が可能であった。実証実験と同じ条件下で (計測期間は 1 週間), Stratum 2 に利用する PC を水晶発振器利用の PC にした場合の同期精度結果を図 13 に示す。結果は制御なしの場合と比較して精度向上が見られたが、数 ms の変動がいくつか観測されることが分かった。これは、一般的な PC で用いられている水晶発振器では時刻安定期間が約 1 分¹⁴⁾であり、ルビジウムの場合と比較して短期間であるため、ポーリング間隔 64s では十分な計測パケットを得ることができなかつたと考えられる。そのため、本手法を用いた一般的な PC での時刻同期精度向上においては、ポーリング間隔およびキュー遅延の許容値と時刻同期精度のトレードオフに関して今後検討する必要があるといえる。

7. おわりに

本稿では、ネットワークを介した時刻同期精度向上手法であるパケット自己消滅手法を提案した。この手法はパケットにルータを通過可能な最大キュー遅延時間または全キュー遅延時間を指定することで、指定値以上の遅延が発生した場合にパケットが破棄される手法であり、他のトラフィックには影響を与えないという特長を持っている。また、本手法はルータにおける処理がパケット転送処理の許容範囲と軽微であり、キュー変動が大きく発生するルータを対応することで十分な効果を得ることが期待できる。この手法の有効性をシミュレーションおよび実装実験によって示し、通常の NTP ではネットワークトラフィックによる影響で百 ms 台の精度でしかない環境下において、MTQ 方式で MTQ = 0 とした場合に十 μs 台の精度まで向上できることを明らかにした。

今後はより広域な環境に適応させるために、本稿で提案のみ行った QTL 方式の実証実験を進める必要があると考えており、また、本手法を用いた一般的な水晶発振器を用いた PC の精度向上に関して、与えるパラメータと時刻精度の関係を検討する必要がある、今後の課題としている。

謝辞 本研究はギガビットネットワーク研究開発プロジェクトの研究成果によるものである。多くの助言をいただいたプロジェクト関係者各位に深く感謝する。

参考文献

- 1) Mills, D.L.: Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation, RFC 1305 (Mar. 1992).
- 2) IEEE-1588 (2002), Standard for a precision clock synchronization protocol for network measurement and control systems, (Nov. 2002). <http://ieee1588.nist.gov/>
- 3) Internet Multifeed Co.: Experimental NTP Servers (Stratum 2). <http://www.jst.mfeed.ad.jp/>
- 4) Nakashima, T. and Ihara, S.: An Experimental Evaluation of the Total Cost of NTP Topology, *ICOIN15* (Jan. 2001).
- 5) Okazawa, H., Machizawa, A., Nakagawa, S., Kitaguchi, Y., Asami, T. and Ito, A.: Advanced NTP Synchronization Device for Internet Monitoring Tools, *Proc. INET2001* (June 2001). http://www.isoc.org/inet2001/CD_proceedings/T42/inet2001.html
- 6) Kitaguchi, Y., Okazawa, H., Shinomiya, S., Kidawara, Y., Hakozaiki, K. and Nakagawa, S.:

Development of a High-Accurate Time Server for Measurements of the Internet, Lecture Note in Computer Science 2344, pp.351-358, Springer-Verlag (Jan. 2002).

- 7) 山本 幹: アクティブネットワークの技術動向, 信学論 (B), Vol.J-84-B, No.8, pp.1401-1412, (2001).
- 8) VINT project: The Network Simulator-ns2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- 9) Tsuru, M., Kitaguchi, Y., Fukuoka, H. and Oie, Y.: On the practical active network with the minimal functionality, *Proc. 2nd International Workshop on Active Network Technologies and Applications (ANTA 2003)*, pp.45-52 (May 2003).
- 10) Stevens, W., Thomas, M., Nordmark, E. and Jinmei, T.: Advanced Sockets Application Program Interface (API) for IPv6, RFC 3542 (May 2003).
- 11) WIDE KAME Project: Webpage of Kame Project. <http://www.kame.net/>
- 12) Cho, K.: The Design and Implementation of the ALTQ Traffic Management System, dissertation, Keio Univ. (Jan. 2001).
- 13) NLANR/DAST: Iperf: The TCP/UDP Bandwidth Measurement Tool. <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>
- 14) 北口善明, 町澤朗彦, 中川晋一, 西村道明, 日迫彰, 箱崎勝也: PCにおける時刻精度の精密計測とその評価, NS研究会 信学会, pp.67-70 (Nov. 2003).

(平成 16 年 7 月 12 日受付)

(平成 17 年 2 月 1 日採録)



北口 善明 (正会員)

平成 7 年新潟大学理学部物理学科卒業。平成 9 年同大学大学院自然科学研究科修士課程修了。同年 (株) インテック入社。平成 12 年インテック・ウェブ・アンド・ゲノム・インフォマティクス (株) に転籍, 現在に至る。平成 12 年から 16 年にかけて通信・放送機構 (現情報通信研究機構) 研究員。ネットワーク運用と計測技術, IPv6 ネットワークの研究に従事。電子情報通信学会会員。



町澤 朗彦

昭和 59 年上智大学理工学部電気電子工学科卒業。同年郵政省電波研究所 (現情報通信研究機構) 入所。平成 6 年科学技術庁に出向し, IM-net 立上げに参加。平成 8 年から 11 年にかけて Univ. Canterbury 客員研究員。平成 15 年 JGN2 立ち上げに参加。画像の高効率符号化, 視覚情報処理, 計算機ネットワークの研究に従事。電子情報通信学会, 日本認知科学会各会員。



鶴 正人 (正会員)

昭和 60 年京都大学大学院工学研究科修了。沖電気工業 (株), 長崎大学総合情報処理センター助手, 日本テレコムインフォメーションサービス (株), 通信・放送機構研究員を経て平成 15 年より九州工業大学情報工学部助教授。工学博士。インターネットの計測, 制御に関する研究に従事。電子情報通信学会, ソフトウェア科学会各会員。



尾家 祐二 (正会員)

昭和 55 年京都大学大学院工学研究科修了。佐世保高専電気工学科助手, 助教授, 九州工業大学情報工学部助教授, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学センター教授を経て, 平成 9 年より九州工業大学情報工学部教授。同大学情報科学センター長。工学博士。ネットワーク性能評価, 高速ネットワークに関する研究に従事。著書に「コンピュータ・ネットワーク」(共著, 共立出版) 等。IEEE 会員, 電子情報通信学会フェロー。



箱崎 勝也 (フェロー)

昭和 38 年九州大学工学部電子工学科卒業。同年日本電気 (株) 入社。中央研究所, ソフトウェア開発グループにおいて, システム性能評価, コンピュータアーキテクチャ, OS, ネットワークの相互接続性等の研究開発に従事。平成 6 年より電気通信大学大学院情報システム学研究科教授。工学博士。分散システム技術, マルチメディア応用システム, モバイルコミュニケーション等の研究に従事。昭和 57 年情報処理学会論文賞受賞。電子情報通信学会, IEEE, ACM 各会員。