

インターネット環境下における高精度時刻比較技術

岩間 司 金子 明弘 町澤 朗彦 鳥山 裕史
情報通信研究機構 〒184-879 東京都小金井市貫井北町 4-2-1
E-mail: iwama@nicto.go.jp

あらまし これまで様々なインターネット環境下における高精度ハードウェアタイムスタンプを用いた片方向遅延時間測定の結果について報告してきた。一般のインターネット環境下では、測定系の精度が向上してもパケット遅延時間自身の分散が大きすぎるため、そのままでは遠隔地の原子時計の計測及び時刻同期に用いるためには精度が不十分である。今回、計測によって得られたデータを適切なフィルタリング処理を行うことでクロストラヒック等の影響を抑え、さらに統計的な処理を行うことにより遠隔地の原子時計との時刻比較精度を大きく向上させることが可能となったので報告する。

キーワード 時刻比較, 片方向遅延時間, 時刻同期, タイムスタンプ

Precise Estimation of Time Transfer in Internet Environment

Tsukasa Iwama, Akihiro Kaneko, Akihiko Machizawa, and Hiroshi Toriyama

National Institute of Information and Communications Technology,

4-2-1 Nukui-kitamachi, Koganei, Tokyo, 184-8795 Japan

E-mail: iwama@nicto.go.jp

Abstract We have reported measuring results of one-way delay in several internet environment using a hardware time-stamper. In usual internet environment, although the precision of measuring equipment are increased, variance of the measuring data are much worse. Then we cannot compare with remote atomic clocks directly. Here, we propose a precise estimation method of the time transfer in internet environment.

Keyword Time Transfer, One-way Delay, Time Synchronization, Time Stamping

1. はじめに

電子商取引の普及や政府の高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部 (IT 戦略本部) による電子政府の推進により、近年、情報の電子化が飛躍的に進んできた。情報の電子化が進むにつれて時刻情報の重要性も増大し精度に対する要求も高まってきている。また総務省では平成 16 年 11 月に時刻配信業務及び時刻認証業務を総称したいわゆるタイムビジネスを対象に「タイムビジネスに係る指針」を策定した[1]。この指針を踏まえてタイムビジネス認定制度が開始され、書面の電子保存を可能とする e-文書法 (「民間事業者等が行う書面の保存等における情報通信の技術の利用に関する法律」) においても認定されたタイムスタンプの付与が要件となっている。このように正確時刻の需要は日に日に高まっており、正確で手軽な時刻の配信

技術や時刻同期技術に対する要求も大きい。

現在タイムビジネス認定制度で定められている高精度な時刻配信業務における時刻配信方法は GPS コモンビュー方式のみである。GPS コモンビュー方式は世界的な時刻比較にも用いられている方式[2]であり、高精度な時刻比較が可能であるが、配信側のデータ公表を受けてから時刻比較を行うため、タイムラグが大きい。また、時刻比較用の GPS 受信機のほかにアンテナの設置・運用が必要となり、データセンターなどで運用しにくい欠点がある。一方、インターネットを用いた時刻の取得は、コストが低く、双方向性を有しているといった点で優位性が高いが、得られる時刻精度がネットワークの状況に依存する等、信頼性の面では注意すべき点がある。

これまで我々は各種インターネット環境下において高精度ハードウェアタイムスタンプ[PUTS]を用いた

片方向遅延時間測定について報告してきた[3-5]。その結果、高速回線を利用できる環境においてはかなり高精度な時刻供給が可能である見通しがたった。また PUTS 自体もファームウェアを改良しハードウェア SNTP サーバとして動作させることも可能となった[6]。

本報告ではこのハードウェア SNTP サーバを介して遠隔地に設置してある原子時計と UTC(NICT)との高精度な時刻比較結果について示す。

2. 原子時計の時刻比較

2.1. 一般的な時刻比較法

原子時計の時刻比較には大きく分けて以下の4つの方法がある[2]。

- 1. 時計運搬法
- 2. ワンウェイ法
- 3. コモンビュー法
- 4. ツーウェイ法

1の時計運搬法は、原子時計を実際に運搬して他の原子時計と比較する方式である。比較時点における比較精度は最も優れているが、運搬による時刻変動要因及び時刻比較後の時刻の正確さについては何も保証されない。

2のワンウェイ法は、標準電波やGPS受信のような通報される時刻に同期する方法である。現在、NTPのStratum1サーバではこの方法により基準時刻を生成しているものも多い。この方法の場合、送受信間の伝搬遅延や媒体の性質を保証することにより時刻精度が向上する。

3のコモンビュー法は、比較する原子時計の双方から観測可能な参照原子時計の時刻を双方から同時に計測する方式である。この時の計測値のずれが比較する原子時計同士のずれとなる。参照原子時計(信号)としてはカラーテレビのサブキャリア信号やGPSが一般的である。カラーテレビのサブキャリア信号を用いた時刻比較は、国内で以前から利用されている方法である。比較用データについても1日に1回NICTから公表されているが、2010年にテレビのアナログ放送終了に伴い終了する。

GPSを参照時計とした場合、日本国内であれば電離層など

の影響はほぼ同等とみなせるため、ワンウェイ法よりも高い正確さが期待できる。GPSコモンビュー法は世界的な時刻比較ネットワークや現在のタイムビジネス認定制度でも採用されていることは第1章でも述べた。

4のツーウェイ法は比較する原子時計双方のデータをリアルタイムでお互いに送受信して比較する方式である。ツーウェイ法は通信衛星を用いて行うのが一般的であり、新たなリアルタイムでデータを取得できるため電離層等の影響を排除できコモンビュー法よりも高精度な時刻比較が可能である。このため、世界的な時刻比較ネットワークにも徐々に取り入れられてきているが設備費、回線維持費が莫大である。

2.2. タイムビジネス必要な時刻比較精度

2.1で示した時刻比較法は、主として国家標準機関同士などで実施されている方式であり、時刻比較に要求される正確さは時刻でnsオーダーである。現状のタイムビジネスでは、まだそこまでの正確さは求められていない。ここで一つの基準となるのが、タイムビジネス認定制度で採用されているGPSコモンビュー法の時刻精度を比較対象とする。

ここでGPSコモンビュー法により得られるデータについてまとめると、マルチチャネル受信機を用いた場合の精度は10ns程度である。1回のデータはコモンビュー用受信スケジュールに従い13分間データを受信して平均化したデータを用いる。現在、比較対象であるNTAのGGTSデータの更新頻度は1日に1回である。

このことから今回の時刻比較用データの平均化は10分を基準とする。今回の比較対象である原子時計はルビジウム(Rb)とセシウム(Cs)であるが、それぞれの10分間の変動幅は短期安定度のカタログ値から

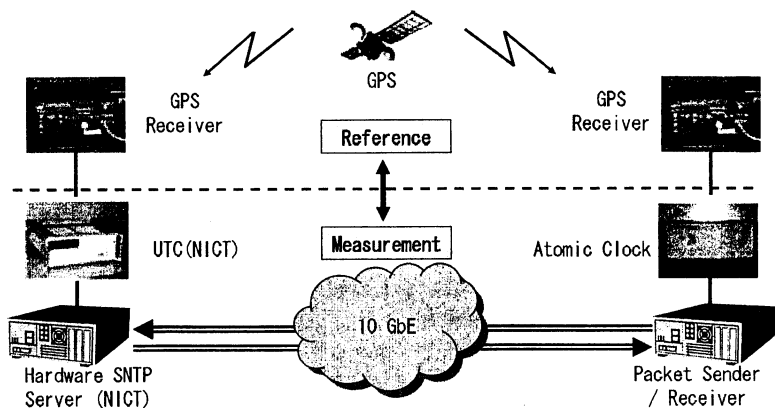


図1 インターネット時刻比較システム

計算すると 1.2ns 以下及び 0.6ns 以下である。ハードウェア SNTP ボードの時間分解能は 4ns であるので平均化時間 10 分のそれぞれの原子時計のデータ変動は測定分解能以下であるので無視できる。

3. インターネット時刻比較システムの構成

図 1 に今回の時刻比較システムの構成を示す。中央の 2 つの原子時計が比較対象である。原子時計から下のブロック図がインターネット時刻比較システム、上側が比較対象となる GPS コモンビューシステムを用いた時刻比較システムである。

Stratum1 サーバは研究室内に設置し、UTC(NICT)から信号を供給した。またパケット送受信機としてハードウェア SNTP ボードをクライアント補助モードで動作させた PC を 2 台用意した。

1 台目は大手町に設置し、自走している Cs 原子時計から信号を供給した。原子時計の比較基準として、図 1 に示すような GPS コモンビューシステムを設置して参照データを取得した。

もう 1 台は研究室内に設置し、UTC (NICT) と同期している Rb 原子時計から信号を供給した。実験に用いた回線は 1 GbE 回線を小金井-大手町間の折り返しで利用した。また、Stratum1 サーバと同じ研究室内に設置したため、原子時計の比較基準には GPS コモンビューシステムではなく、タイムインターバルカウンタを用いて参照データを取得した。

インターネット時刻比較データはパケット送受信機側のハードウェア SNTP ボードを「NTP クライアント補助モード」で動作させることで NTP パケット送出時及び Stratum1 受信時、NTP 応答パケットの Stratum1 送出時及びパケット送受信機受信時のタイムスタンプを得ることができる。これにより、往路のタイムスタンプ差及び復路のタイムスタンプ差を実測できる。

ハードウェア SNTP ボードの時間分解能は 4ns、パケットの送受信頻度は 4~5 パケット/秒で実験を行った。

4. 遅延時間のデータ処理

片方向遅延時間を用いて 2 点間の時刻差を計測する場合、通常は区間最小値が用いられる。しかし、伝送経路が長くなると最小値データにおいてもばらつきが大きくなる。このようなデータのばらつきを小さくするためには平均値などの統計処理データを利用したい。この場合、統計処理データを劣化させる要因として次の 2 点がある。

- ・クロストラヒック等による遅延時間幅のばらつき
- ・経路変更による遅延時間のジャンプ

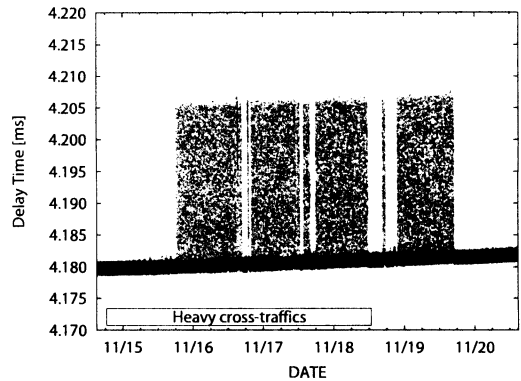


図 2 クロストラヒックによる時刻比較値の変動

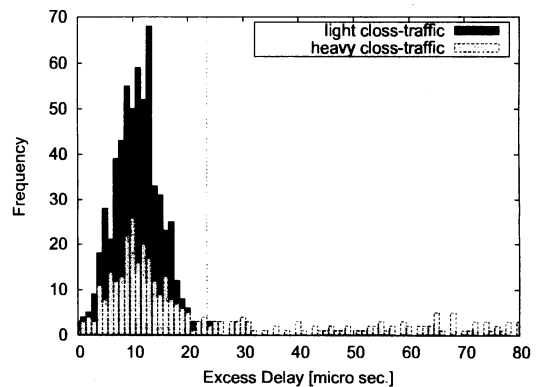


図 3 トラヒック量と度数分布

以下にこの 2 点に対する対応策について検討する。

4.1. 遅延時間のばらつきの軽減

ネットワークを利用する場合、避けることができない課題としてトラヒック変動によるデータ伝送時の遅延時間のばらつきである。

図 2 にクロストラヒックによる片方向遅延時間の変動の例を示す。図 2 の横軸は時刻、縦軸は瞬時データの片方向遅延時間である。図 2 のデータは、極端にトラヒックが変動した場合の例である。

さらにクロストラヒックが大きな場合と小さな場合の代表的な片方向遅延時間の度数分布を図 3 に示す。図 3 ではデータの最小値を基準として、10 分間の瞬時データから求めた相対的な度数分布である。図 3 の中の縦線はクロストラヒックが小さな場合の度数分布の最小値から 95% の相対値を示している。

図 3 からクロストラヒックが大きな場合においてもクロストラヒックが小さな場合の最小値から 95% の範囲までの範囲一つのピークがあり、その部分のみの分

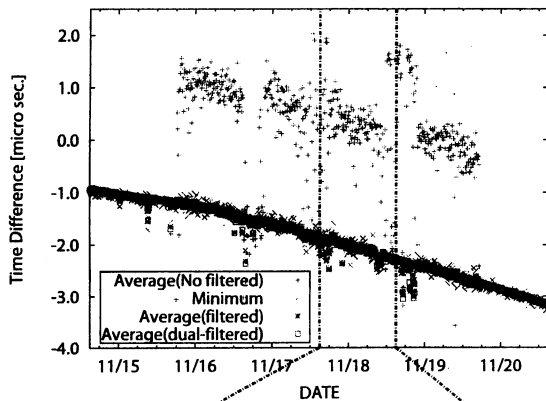


図4 データ処理結果の比較

布形状もほぼ正規分布に近い形状となっている。
 この結果から、まずクロストラフィックが小さな場合の10分間データの標準偏差 σ を複数計算し、平均的な σ を算出する。図3から10分間のデータの最小値から 5σ までの範囲を有効データとして一次フィルタリングして抽出する。さらに最小値側の変動を軽減するため、抽出したデータの中央値の前後10%のデータのみ抽出(二次フィルタリング)して平均値を計算することにより10分間データの平均値とする。

図4にクロストラフィックが大きい区間においてデータ処理を行った結果を示す。

データはすべて10分間の区間データから算出した最小値、単純平均データ、一次フィルタリングのみの平均値、二次フィルタリングした平均値である。

フィルタリングによりクロストラフィックの影響をほぼ排除できていることがわかる。またフィルタリングして平均化することにより最小値よりもデータのばらつきが少ないこともわかる。以下のデータ処理では二次フィルタリングしたデータを用いる。

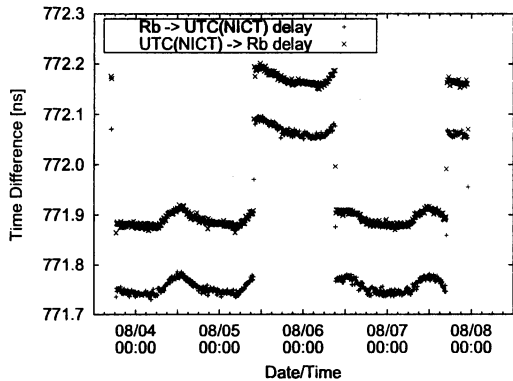


図5 経路変更に伴う遅延時間のジャンプ

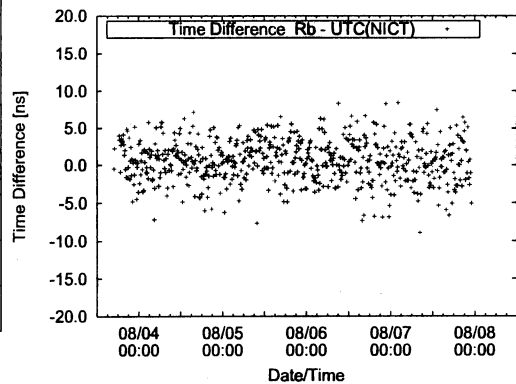
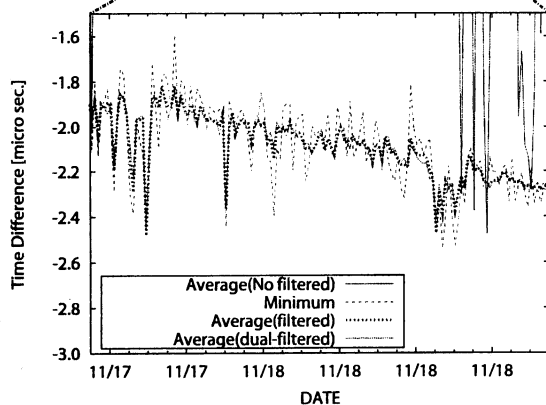


図6 遅延時間ジャンプを保証した場合の時刻差データ

4.2. 経路変更等による遅延時間ジャンプの修正

ネットワークを利用した場合、もう一つの大きな課題は伝送経路変更に伴う遅延時間の不連続な変動(以下、ジャンプという)にどのように対応するかである。

図5に経路変更に伴う片方向遅延時間のジャンプの例を示す。図5においてはパケット送受信機からのdown-linkとup-linkのそれぞれ片方向遅延時間の結果を示している。このような経路変更が生じた場合は片方向遅延時間のジャンプ量も伝送方向によって異なることが多い。このため、伝送方向ごとのジャンプ量を算定してオフセットとして保証することで時刻差のデータに対する影響を取り除くことができる。今回の場合は参照データの値を参考に、ジャンプの前後の片方向遅延時間データのうち、二次変動が影響しない範囲の区間データを一次近似して差分を求めジャンプによるオフセットとした。

図6は伝送方向による片方向遅延時間のジャンプを保証した結果得られるパケット送受信機側原子時計と

Stratum1 サーバ側原子時計の時刻差データである。

今回の場合は参照データがあったため、比較的容易にオフセット量が算定できたが、参照データがない場合はオフセット量の算定で誤差が生じる可能性がある。経路変更は機器の入れ替え等を伴わない限り、特定の複数の経路の間で生じる場合が多いと考えられるため、あらかじめ複数の経路情報及び実測データを入手し、データベース化しておくことにより、オフセット量の計算精度を向上できると考えられる。

また遅延時間ジャンプが生じた場合は、4.1.のフィルタリングのためのデータ等もすべて算定しなおす必要がある。

5. 時刻比較結果

時刻比較には3つの原子時計と日本標準時の元である UTC(NICT)の時刻を用いた。最初に UTC(NICT)と研究室に設置した Rb 原子時計の間の時刻比較を実施した。研究室内で双方の時刻信号が入手できるため、参照データはタイムインターバルカウンタを用いて取得した。

図7に室内実験における時刻比較結果を示す。図7の結果はタイムインターバルカウンタを用いて取得した参照データと本測定系で取得した10分間平均データとの時刻誤差である。以前、文献[4]で報告した際はボードの時間分解能が8nsであったため、時刻比較結果も8ns以内の時刻誤差であったが、今回のボードでは時間分解能が4nsに向上したため、時刻比較結果も4ns以内、時刻誤差の標準偏差は1.9nsとなっている。

続いて同じ研究室内の Rb 原子時計を小金井一大手町間の折り返し回線を利用して時刻比較した場合の実験結果を図8に示す。図8は、図7と同じタイムインターバルカウンタを用いた参照データと実測データとの時刻誤差である。小金井一大手町間の折り返し回線は10Gbps回線でトラフィック量も少ない。このため、フィルタリング係数に当たる低トラフィック時の片方向遅延時間データの10分間の瞬時データの標準偏差は双方向とも平均220nsであった。フィルタリング係数が小さいため、10分間平均データの時刻誤差は±15ns程度、時刻誤差の標準偏差は19.9nsと非常に良好な結果が得られた。

次に大手町に設置してある Cs 原子時計との時刻比較結果を図9に示す。図9において+マークで示すデータは GPS コモンビュー法によって測定された参照データ、×マークで示したデータが本測定系で得られた10分間平均データである。こちらも図8と同じ10Gbps回線を用いており、低トラフィック時の片方向遅延時間データの標準偏差は双方向とも220nsであった。図9の結果からネットワークを用いた時刻比較におい

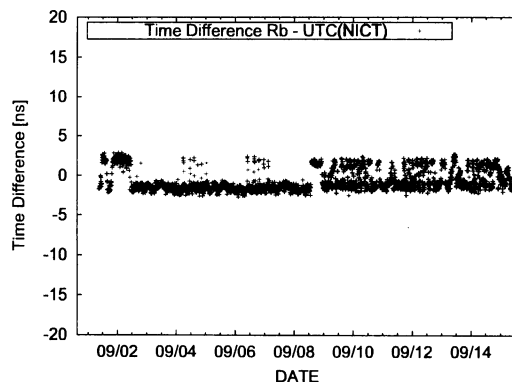


図7 Rb-UTC(NICT)の時刻比較結果（室内折返し）

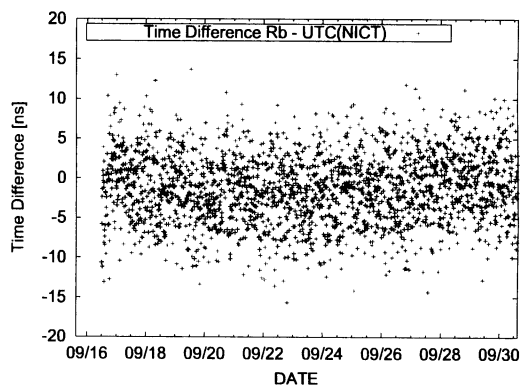


図8 Rb-UTC(NICT)の時刻比較結果（大手町折返し）

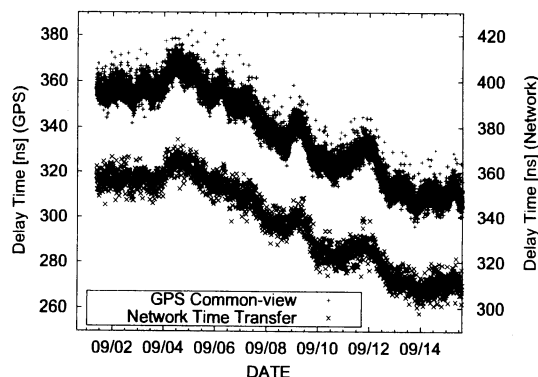


図9 GPS コモンビュー法との比較

ても高速・低トラフィックなネットワーク回線を用いることにより GPS コモンビュー法とほぼ同等の測定結果が期待できる。

最後に大阪に設置してある Rb 原子時計との時刻比較及び時刻制御の結果について示す。大阪には GPS 受信機が設置してないため、参照データはなく実測データのみである。

東京-大阪間の回線は 10Gbps 回線であるが JGNII の回線を利用しているためトラフィックの変動が激しい場合がある。まず比較的クロストラフィックが大きな場合の二次フィルタリングの効果について図 10 に示す。図 10 において、東京-大阪間を含んだ測定系の 10 分間の片方向遅延時間データの標準偏差は大阪から東京向きで 2,400ns、東京から大阪向きで 3,000ns と小金井-大手町間の約 10 倍であった。また図 10 の 18 時前後に片方向遅延時間の大きな変動が生じており、10 分間平均値データにおいても値のばらつきが生じている。

次に、10 分間平均値データから求めた時刻誤差を図 11 に示す。図 11(a) は 1 日分の時刻比較結果である。図 11(a) では時刻誤差の広がりには 10ns 程度である。この時刻誤差のデータの実用性を検証するため、大阪に設置してある Rb 原子時計を手動で制御した結果を図 11(b) に示す。ここで 9 月 25 日、27 日及び 10 月 2 日に原子時計の周波数調整を実施した。10 月 3 日のデータのように時刻誤差が大きくずれる場合もあるが、平均的に 10ns 程度の幅で制御結果を観測でき充分実用的であることがわかる。この結果から、高速な回線と適切なフィルタリングを行うことにより数 10ns の精度で時刻比較を行うことが可能であることがわかった。

6. おわりに

1Gbps 以上の高速なネットワークと適切なフィルタリングを行うことにより、我々の研究室で開発したハードウェア SNTP サーバを介して遠隔地に設置してある原子時計と UTC(NICT) との間で数 10ns の精度で高精度な時刻比較が可能であることがわかった。

遠隔地のネットワーク環境下における問題点のうちクロストラフィック等による影響は二次フィルタリングを行うことで実用上問題のないレベルまで軽減できる。ただし経路変更に伴う遅延時間のジャンプについてはまだ検討が必要である。

文 献

- [1] 総務省報道資料、「タイムビジネスに係る指針（ネットワークの安心な利用と電子データの安全な長期保存のために）」の策定、総務省、Nov. 2004.
- [2] 森川他, “総合通信研究所季報 時間・周波数特集,” vol.49, nos.1/2, March/June 2003.
- [3] 鳥山, 町澤, 岩間, 金子, “高速インターネット環境におけるパケット遅延時間の精密測定,” 信学技報, IA2004-24, Jan. 2005
- [4] 金子, 岩間, 町澤, 鳥山, “ネットワークによる時刻比較,” 2005 年信学総合大会, B-16-1, Mar. 2005

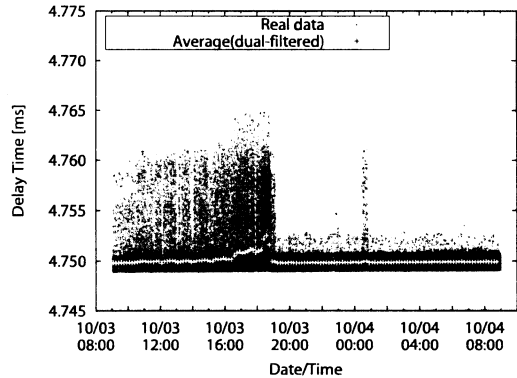


図 10 片側遅延時間データの瞬時値と 10 分間平均値 (NICT-大阪)

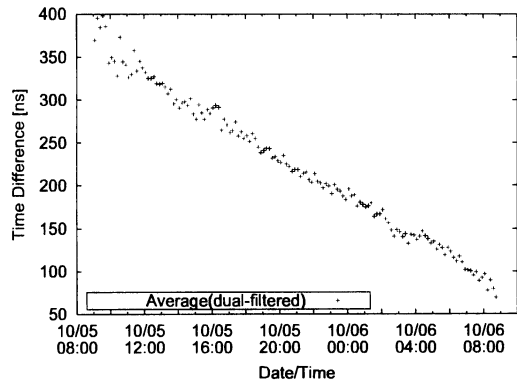


図 11(a) Rb(大阪)-UTC(NICT)の時刻比較結果

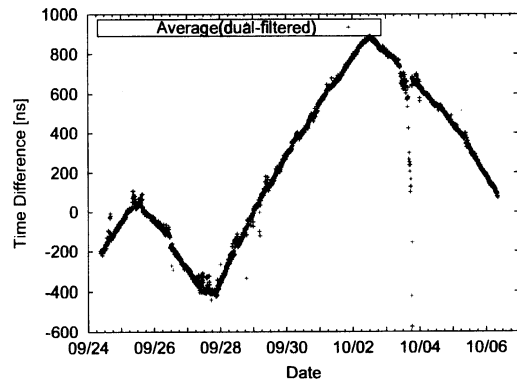


図 11(b) Rb(大阪)-UTC(NICT)の時刻制御結果

- [5] 岩間, 金子, 町澤, 鳥山, “インターネット環境における遅延時間の統計処理,” 2005 年信学総合大会, B-16-2, Mar. 2005
- [6] 鳥山, 町澤, 岩間, 金子, “ハードウェア SNTP サーバの開発,” 信学技報, CQ2005-12, Apr. 2005