

ISDN 時計同期システムのための統計的手法を用いた時計同期方法

6 T-1

山下 高生, 小野 諭

NTT ソフトウェア研究所

1 概要

インターネットを含む計算機ネットワークが普及し、動画・音声などの連続メディアへの期待が高まっている。連続メディア通信にとって、時刻同期および、送信側からの送信レートと受信側での受信再生レートを同期させる周波数同期が必要となっている。我々は、時刻同期と周波数同期を同時に実現することを時計同期と呼んでいる。

時計同期を実現する場合、周波数同期した時計の時刻同期をネットワークを用いておこなうと、一度正確な時刻を設定すると長期間時刻較正が不要となるが、ネットワークの状況によって、一度の測定で正確な時刻を測定することは難しい。よって、ある程度の頻度で同期を行って、同期精度の低い状態が長く続くことを防ぐ必要があるが、時刻較正は、時刻または周波数を変化させるため、周波数安定度および精度を維持するには較正頻度は削減する必要があると考えられる。これまで、計算機間の時刻差を測定したときの誤差が正規分布に近い場合に、同期精度の向上と較正頻度の削減を目的として統計的手法を用いた時計同期方法を提案してきた [1]。本発表では、本方法において、通信コストを削減するために動的に時刻同期間隔を変更することおよび時刻差の測定誤差の統計量である分散が変化する場合でも利用できるように拡張し、その方式を ISDN 時計同期システム [2] に応用したときの評価結果について報告する。

2 統計的時刻同期方法

本方法では、サーバ/クライアント間で周期的に時計同期処理を行う。周期は、基本的な周期  $P_b$  および周期の上限  $P_{max}$  を用いて決定する。1 回目の同期処理時には、時刻差計算のみを行う。2 回目以降では、まず同期はずれ判定を行い、同期していないと判定された場合は、時刻差計算を行う。時刻差計算および同期はずれ判定は、複数回のサーバ/クライアント間接続をして時刻差測定を行い、それぞれ平均区間の推定および母集団平均の検定によって行う。周期の初期値は、 $P_b$  であり、その後、同期はずれ判定で同期していると判定される毎に、十分に同期が信頼できると判断して、 $P_{max}$  を越えるまで周期を 2 倍にしていく。また、同期はずれ判定で同期していないと判定され時刻差計算によって時刻較正を行った場合には、同期が必ずしも信頼できないと判断して周期を  $P_b$  に戻す。これら時刻差計算および同期はずれ判定には、サーバとクライアントの間の時計について同期させたい時刻確度  $T_{acc}$  をパラメータとして用いる。なお、時刻差測定には、広く用いられているサーバ/クライアント間のラウンドトリップの半分として測定する方法を用いている。

最初に、時計同期開始時および同期はずれ判定によって同期していないと判定されたときに行う時刻差計算方法について説明する。時刻差測定した標本  $\Delta$  が正規分布にしたがうとすると  $N$  個の標本値から計算された標本平均  $\bar{\Delta}$  および標本分散  $s_{\Delta}^2$  を用いて、母集団の平均値  $\bar{\Delta}_p$  の推定

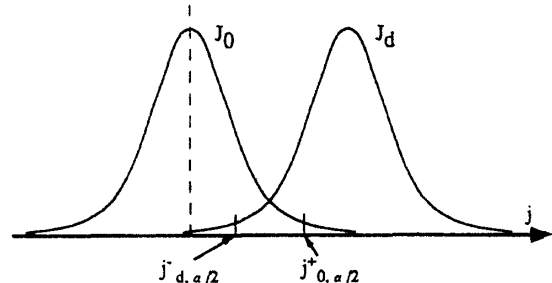


図 1: 同期はずれ判定における検定量  $j_d$  の分布

区間は、確率  $\alpha$  で、

$$\bar{\Delta} - t_{N-1}(\frac{\alpha}{2}) \frac{s_{\Delta}}{\sqrt{N-1}} \leq \Delta_p \leq \bar{\Delta} + t_{N-1}(\frac{\alpha}{2}) \frac{s_{\Delta}}{\sqrt{N-1}} \quad (1)$$

となる [3]。ただし、 $t_{N-1}(\frac{\alpha}{2})$  は、 $t$  分布における自由度  $N-1$  の確率  $\alpha/2$  の確率点である。そこで、時刻差計算は、次のように行う。時刻差測定を繰返し、時刻差測定毎に母集団推定区間を計算し、以下の条件を満たすまで繰り返す。そして、条件を満たした時の標本平均値  $\bar{\Delta}$  をサーバ/クライアント間の時刻差とする。

$$t_{N-1}(\frac{\alpha}{2}) \frac{s_{\Delta}}{\sqrt{N-1}} \leq T_{acc} \quad (2)$$

このことによって、確率  $\alpha$  で母集団平均と最大  $T_{acc}$  の誤差にすることができる。

次に、同期はずれ判定の方法について説明する。判定は、母集団平均の検定によって行う。時刻差計算を行った時および同期はずれ判定を行う時の標本を、それぞれ標本 C および D とする。標本 C および D について時刻差測定した標本  $\Delta_C$  および  $\Delta_D$  が正規分布に従うとし、それぞれの標本数を  $N_C$  および  $N_D$ 、標本 C と D の母平均値の差を  $d$  とすると、

$$j_d = \frac{\bar{\Delta}_C - \bar{\Delta}_D - d}{\sqrt{(\frac{s_C^2}{N_C} + \frac{s_D^2}{N_D})s^2}} \quad (3)$$

は、自由度

$$m \approx \frac{(\frac{s_C^2}{N_C} + \frac{s_D^2}{N_D})^2}{\frac{s_C^4}{N_C^2(N_C-1)} + \frac{s_D^4}{N_D^2(N_D-1)}} \quad (4)$$

の  $t$  分布に従う [3]。ただし、 $\bar{\Delta}_C$  と  $\bar{\Delta}_D$  および  $s_C^2$  と  $s_D^2$  は、それぞれ  $\Delta_C$  と  $\Delta_D$  の標本平均値および標本 C と D の標本分散である。

標本 C および D から推定される母集団平均が同じであるという仮説を立てたとき、 $j_0$  の分布は図 1 の  $J_0$  のようになる。しかし、実際には、母集団平均が  $d$  ずれていたとすると、 $j_d$  の分布は図 1 の  $J_d$  のようになる。よって、確率  $\alpha$  で母集団平均が同じであるという仮説の検定を行ったとき、仮説が棄却されないにもかかわらず、 $d$  のずれがあるという仮説も真である場合が有り得ることになる。よって、この 2 つの仮説を十分に分離するためには、確率  $\alpha$  で検定を行うとすると、 $J_0$  の  $\alpha/2$  の右側の確率点を  $j_{d, \alpha/2}^+ (= t_{N_C+N_D-2}(\alpha/2))$  および  $J_d$  の  $\alpha/2$  の左側の確率点を  $j_{d, \alpha/2}^-$  とすると、 $T_{N_C+N_D-2}(\alpha/2) \leq j_{d, \alpha}^-$  でなければならない。

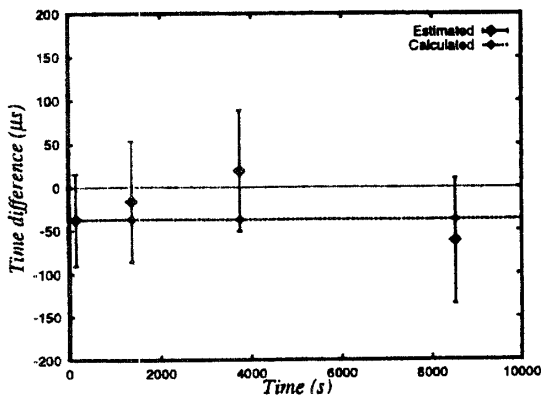


図 2: 時刻誤差が無い時の同期方法の動作

そこで、同期はずれ判定は、次のように行う。各同期処理時に時刻差測定を繰返し測定毎に  $j_{0,\alpha}^-, j_{0,\alpha}^+, j_{T_{acc},\alpha}^-$  および  $j_{T_{acc},\alpha}^+$  を計算する。そして、時刻差が 0 という仮説と時刻差が  $T_{acc}$  以上のある値であるという仮説を十分に分離できるように、以下の条件を満たすまで繰り返す。

$$j_{T_{acc},\alpha}^+ \leq t_{N_C+N_D-2}(\frac{\alpha}{2})$$

or

$$j_{T_{acc},\alpha}^- \leq -t_{N_C+N_D-2}(\frac{\alpha}{2}) \quad (5)$$

上記の条件が満たされたとき、計算された  $j_0$  が、

$$|j_0| > t_{N_C+N_D-2}(\frac{\alpha}{2}) \quad (6)$$

であれば、同期はずれと判定し、時刻差計算を行う。

### 3 評価

本同期方法を用いたときの、時刻のずれがほぼ 0 であり、 $T_{acc} = 150(\mu s)$  であるときの動作を図 2 に示す。横軸が経過時間、縦軸がサーバとクライアント間の時刻差である。エラーバーは、各同期処理の時点での標本平均と平均推定区間を表している。実線は、クライアントの計算機が時刻差計算によって計算したサーバに対しての時刻のずれを表す。この図から、最初に時刻差計算を行い、時刻差を  $-37.3\mu s$  であると計算し、その後の同期はずれ判定では、いずれの判定でもサーバとクライアントで時刻はずれていないと判定していることが分る。また、同期はずれ判定によって、同期していると判定されているため時刻同期処理周期がしだいに長くなっていることがわかる。

次に、図 3 に、時刻のずれが、時計同期開始から約 4500s で、ステップ状に  $120\mu s$  生じたときの動作を、図 2 と同様の方法で示す。同図の Ideal で示した破線は、サーバとクライアント間の実際の時刻差を表している。この図から、最初同期処理開始時には、時刻差が  $-37.3\mu s$  であると計算し、その後の 3750s の同期処理までは、時刻はずれていないと判定し、同期処理周期が長くなっている。そして、8520s の同期処理で、時刻のずれが生じた判定して、そのずれが  $83.6\mu s$  と計算し、同期処理周期が初期値に戻り、その後の同期処理では、ずれがないと判定していることが分る。

ここで、周波数同期の精度および安定度の維持のためには、同期はずれ判定がどの程度の確率で行われるかが重要となる。この確率を明らかにするために、以下のようなシミュレーションを行った。まず、時刻差測定の測定データを用いて乱数によって 2 つの時刻を選び、一方のデータを用いて時刻差計算を行い、他方のデータに一定のオフセットを与えて擬似的に時刻差が発生した状態を作り、

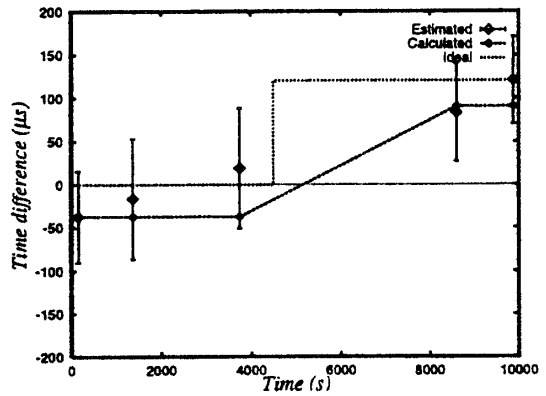


図 3: 時刻誤差が生じた時の同期方法の動作

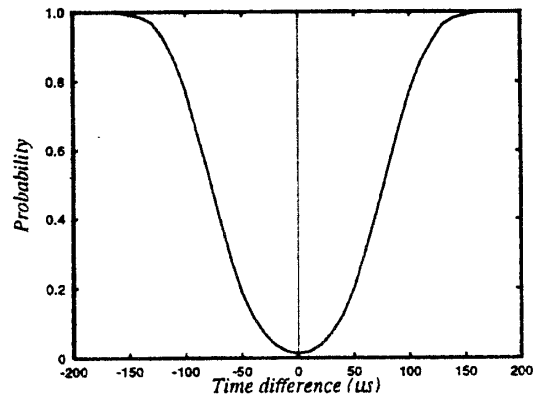


図 4: 同期が必要であると判定する確率

このデータと時刻差計算に用いたデータで同期はずれ判定を行い、ずれが生じていると判定される確率を求めた。これを図 4 に示す。ここで、 $T_{acc} = 150\mu s$  である。この図の横軸は、与えたオフセットの値、縦軸がずれが生じていると判定される確率を表している。この図からオフセットが  $0\mu s$  の時には、ずれがあると誤って判定する確率は 1.45% であり、また、 $150\mu s$  であるときに、ずれがあると判定される確率は 99.95% となっていることが分る。この確率から定常状態における同期処理の通信コストとして平均時計同期処理周期を状態遷移図を用いて計算すると、 $P_b = 1120(s)$ 、 $P_{max} = 9000(s)$  として  $7.54P_b$  となり、ほぼ  $P_{max} = 8P_b$  に近くなっている。よって、時刻が突然ずれた場合の応答は最大で  $P_{max}$  遅れるが、時刻が同期しているときには、ほぼ  $P_{max}$  周期の通信となり、固定同期に比べて通信コストを削減できることが分る。

### 4 今後の課題

今後は、多地点での時刻差測定誤差の測定を行い、本方法の有効性・改善点を明らかにしていく必要がある。

### 謝辞

研究を支援下さる市川晴久広域コンピューティング研究部長に感謝します。また、ご指導、ご討論下さる高橋直久超並列プログラミング研究グループリーダーに感謝します。

### 参考文献

- [1] 山下, 小野, "統計的手法を用いた ISDN 時計同期システムにおける同期誤差の削減", DiCoMo ワークショップ, pp.13-18, Jul. 1997.
- [2] 山下, 小野, "ISDN 網を用いた分散高精度時刻 / 周波数同期", 情処研報 (95-DPS-71), Jul. 1995.
- [3] 芝, 渡部, "統計的方法 II 推測", 新曜社, 1976.