

ICT 社会を支える時刻同期技術

岩間 司 (国立研究開発法人 情報通信研究機構)

システムにおける時刻同期

⇒ 時刻同期の必要性

現在のコンピュータシステムはほぼすべてがネットワークに接続されており相互に情報のやりとりを行っている。また最近では、IoT (Internet of Things) と呼ばれるコンピュータ以外のさまざまなモノ (Thing) からインターネットを介して多くのデータが生成され、これらのデータが集められることでビックデータが構築される。これらの機器は地理的に離れた場所に配置される場合も多く、このビックデータを利活用するためにはどのデータが「いつ」生成されたかが大変重要になる。特に空間的に広く分布させたセンサを同期させ仮想的に大口径の高分解能センサを構築するような場合、生成されるデータの時刻が高精度に同期している必要がある。

時刻同期とは、単純化して表現すると異なる時計同士の時刻を一致させる行為であり、さまざまな用途の実現可能性を広げるための手段である。本稿の場合では時計とはコンピュータの基準クロックを指すことが多い。

コンピュータにおける時刻同期の利用用途は、単に通信のためにネットワークなどを通じてコンピュータ等を同期・協調させるものから、物理的な制約を解消する手段として時刻同期を用いるものまでさまざまである。今後、ICT 社会の進展に伴いさまざまなシステムがコンピュータおよびコンピュータ以外の機器がネットワークを介して構築されるようになり、これらのシステムが必要とする時刻同期の範囲もますます拡大していく。

時刻同期の方式を決定する上で考慮すべきことは、

構築するシステムの利用用途によって時刻同期を必要とする範囲や必要となる時刻同期精度も異なってくるため、それぞれの用途に適した時刻同期手法を用いることである。

ここでは構築するシステムの時刻同期について、時刻同期を必要とする範囲を日本全国レベルまで広げた場合に必要な手法と時刻同期精度の観点から時刻同期の基本的な手法について解説する。

⇒ 基準時刻

時刻同期を構築する際にもう1つ考慮しなければならない点として、基準時刻がある。

一事業所など特定の閉鎖地域内で閉じた時刻同期を行うだけであれば、システム内のどれかの時計に同期すればシステム全体の同期をとることは可能である。しかし、空間的に遠く離れた地域間で時刻同期を行う場合は、片方の時刻に合わせるよりも共通の基準時刻を用いる方がシステム構築の応用性が高くなる。さらに、別々に動作している複数のシステムであっても基準時刻が共通で、かつ、基準時刻との時刻同期精度が既知であればそれぞれのシステムで時刻同期系を構築することも可能となる。

このような基準時刻として一般的に用いられるのは協定世界時 (Coordinated Universal Time : UTC) である¹⁾。UTC は国際電気通信連合 (International Telecommunication Union : ITU) の勧告に基づいて、国際度量衡局 (Bureau International des Poids et Mesures : BIPM) が国際地球回転・基準系事業 (International Earth Rotation and Reference Systems Service : IERS) の支援を受けて維持する時系であり、世界各国の標準時の基準である。このた

め世界中で最も入手しやすい基準時刻である。

このため、ある地点で A というシステムが UTC を基準として動作し、別の地点で B というシステムが同じく UTC を基準として動作していた場合、システム A と B を同期させることは可能であり、さらにそれぞれのシステムの UTC との時刻同期精度が既知であるならば、システム A と B の時刻同期精度も推定できる。この場合、それぞれのシステムと UTC との時刻同期精度を向上させることで、システム同士の時刻同期精度も向上する。これはシステム A と B が直接接続されていなくても可能であるため、基準時刻として UTC を用いることにより地球規模で広く分散しているシステムであってもシステム同士を時刻同期させることが可能である。

時刻同期の方式

⇒ 方式概要

時刻の同期方式は、情報の取得方法によって 2 通りに分けられる。

1 つは報時型であり、時刻が広く放送され利用者がそれぞれ独立に時刻合わせを行うことで時計を同期させる方法である。

もう 1 つの時刻同期方式は従属同期型であり、クライアント側の装置がサーバ側の装置の時刻を受けて時刻を合わせ込む方式である。これら 2 つの方式についてそれぞれの特徴を解説する。

また時刻同期の精度は周辺環境やシステムの性能によって左右されるため、以下で記述する時刻同期精度も一般的な目安であることに注意されたい。

⇒ 報時型

報時型時刻同期方式は、標準電波や GPS (Global Positioning System) 衛星による標準時配信など基準時刻源から供給される信号を単に受信して時刻を同期する方式であり電波時計や GPS 携帯電話など広く利用されている方式と同様である。

この方式は放送のような一方向型の通信で行われ

るため、一度に広い地域をカバーでき、広域で直接複数のシステムで時刻同期する際に有効である。ただし、受信側は送信された時刻信号を受信して同期しているだけなので、伝搬遅延など伝搬路の状態がそのまま時刻同期精度に影響する。さらにコンピュータ等で利用する場合には受信機と接続するためのインタフェースが必要となる。

また報時型の場合、利用者側が正しく受信できているかどうかは受信側しか判断できない。

以上から、報時型同期方式の主な特徴は以下の点である。

利点

- 広範囲を一度に直接カバーできる

欠点

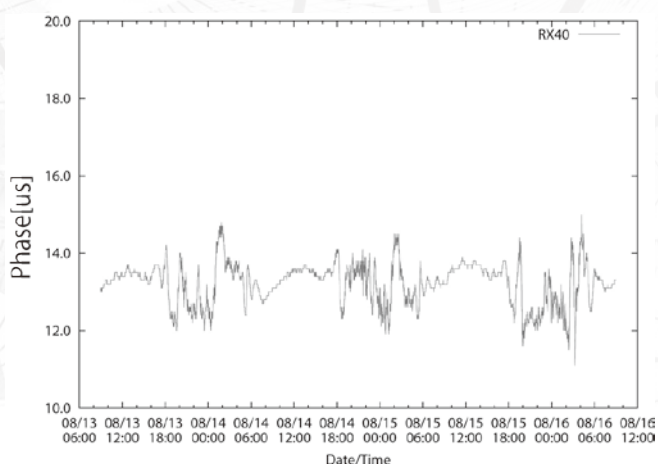
- 一方向伝送であり距離により伝搬遅延量が異なるため、同期誤差が生じる

代表的な時刻源として長波標準電波と GPS 衛星を用いる手法について概説する。

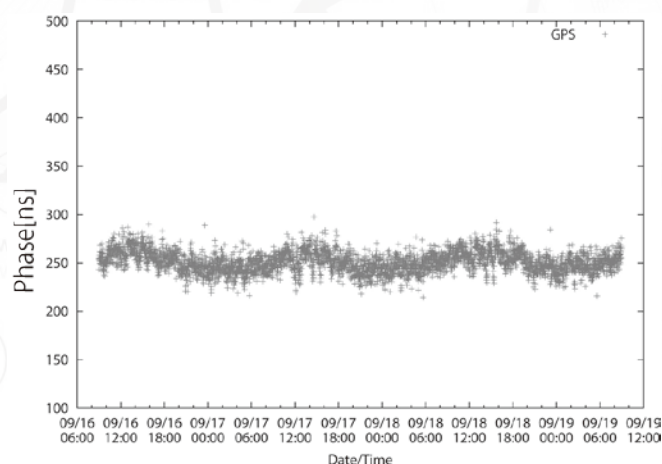
長波標準電波は UTC を 9 時間進めた日本標準時を日本国内 2 カ所の長波標準電波送信所から送信される電波であり、国内であれば屋外にアンテナを設置することにより日本全土で利用可能である。ただし、地表波または電離層反射波を用いるため送信所からの距離に依存した伝搬遅延が生じ、伝搬距離差 300m で約 1 ミリ秒の差が生じるため絶対的な時刻同期精度が必要な場合は遅延補正を行う必要がある。また日変動は十数マイクロ秒程度あるが、送信時刻が UTC と同期しているため毎日同じ時刻にのみ同期をとることで長期間にわたりマイクロ秒以下の時刻同期を維持することが可能である。

次に GPS 衛星を用いる場合には伝搬距離は衛星軌道までの距離約 20,200km となるため、地表の多少の凹凸は無視でき伝搬遅延差がほぼ一定という利点がある。このことから GPS 衛星を用いることにより世界レベルで広域な時刻同期が可能となる。しかし、GPS 衛星を用いる場合は時刻同期精度を維持するため常時高度の高い複数の衛星を補足する必要があり、アンテナ設定に注意を払う必要がある。

これらの時刻同期精度は受信機の性能に左右され



(a) 40kHz 標準電波受信データ (小金井)



(b) GPS 受信データ (小金井：1 周波)

図-1 標準電波と GPS 衛星の受信信号の位相変動

るがオーダレベルでの位相変動について図-1に示す。

図-1の(a)は情報通信研究機構で公開している小金井における40kHz標準電波の受信データの位相変動をプロットしたもの、(b)は一般的なGPS受信機の出力信号の位相変動をプロットしたものである。

長波標準電波は日周変動により数マイクロ秒、GPS衛星は数十ナノ秒の位相変動がある。図-1から報時型時刻同期においてマイクロ秒以下の時刻同期精度が必要な場合はGPS衛星を用いる方法が適していることが分かる。

⇒ 従属同期型

従属同期型時刻同期方式の場合、クライアント側の装置がサーバ側の装置の時刻を受けて時刻を合わせ込む方式であり、クライアントが2次的なサーバになることで接続する機器を増やすことができる。ただし、同期系のループを防ぐため、1台をマスターサーバとして順次ツリー形式の階層化構造になり、階層が進むにつれ時刻同期精度が低下する。

従属同期型の特徴は、以下の点である。

利点

- 双方向型であり、遅延量などを相殺することで時刻同期精度を向上できる

欠点

- サーバ・クライアント型の接続であるため、一度に大量・広範囲のシステムへの接続が難しい

こちらはコンピュータ等でよく利用される方式で、ここではNTP (Network Time Protocol) 方式やPTP (Precision Time Protocol) 方式について概説する。

NTPはTCP/IP系のネットワーク上で一般的に使われている時刻同期用のプロトコルであり、RFC (Request for Comments) で定義されている技術仕様である。近年のネットワークに接続できるコンピュータ、電子機器類にはデフォルトで実装されているものも多い。

NTPの原理は図-2に示すようなパケット交換により、サーバクライアント間の相対的な時刻差 δ_t を求める。ここで T_1 から T_4 をパケット送信時あるいは受信時にパケットに書き込まれるタイムスタンプとすると、サーバとクライアント間の時刻差は以下の式で表される。

$$\delta_t = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2}$$

ただし、NTPではパケットがクライアントからサーバに到達するまでの遅延時間とサーバからクライアントに到達するまでの遅延時間が同一と仮定しているため、サーバ・クライアント間のネットワークの状態に左右される。このため、LANなど特定のトラフィックや通信経路しかないようなネットワ

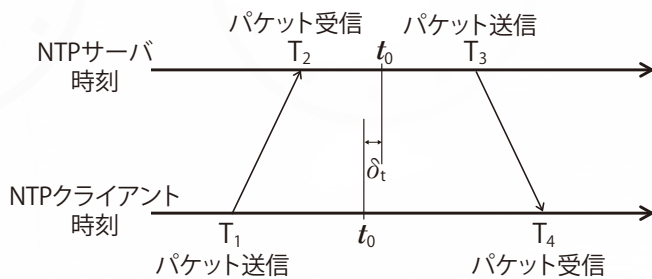


図-2 NTP パケットの交換手順

ークの状態が安定している環境では、コンピュータの処理能力にもよるが、近距離ならばミリ秒以下、一事業所レベルの LAN であればベストエフォートとして数十マイクロ秒オーダーの時刻同期精度も期待できる。

しかし、インターネットなどではトラフィックの不均衡が生じやすく同期誤差が生じやすい。殊に遠距離になるとトラフィックの不均衡のみならず、パケット交換の往路と復路とで経路が異なる可能性もあり高精度な時刻同期は難しい。さらに UDP パケットを用いるため、外部ネットワークへ接続する際にはファイアウォール等でポート解放の設定が必要である。また、最近 ntp デーモンの脆弱性が攻撃対象になる場合も多く、セキュリティには十分注意する必要がある。

PTP は IEEE-1588v2 で規格化された時刻同期用のプロトコルである。NTP が OS やシステム自身の時刻を用いて時刻同期を行ったのに対して、PTP ではネットワークドライバでパケットにタイムスタンプを発行できる機能を有する。これにより OS などの処理能力の影響を受けず純粋にネットワーク両端の時刻差を推定できるため、NTP よりも高精度な時刻同期が実現可能である。一般的にソフトウェアで実現した場合はベストエフォートで数十マイクロ秒、ハードウェア実装の場合はベストエフォートで数十～数百ナノ秒レベルの時刻同期精度が実現可能である。

しかしながらネットワーク環境としては NTP の場合と同様にネットワークの不均衡の影響を受けやすい。さらに PTP の場合はネットワークの両端に

常にタイムスタンプを発行する時計が必要となるため、システム機器のみならずネットワーク上のルータなども専用の機器が必要である。このため、広範囲に展開しにくい欠点がある。

以上から、従属同期型時刻同期方式は比較的狭いエリアでローカルなネットワークでの実現に適している。特に、ミリ秒以下の精度ならば普及している NTP が適しており、より高精度の同期が必要な場合は PTP を用いるべきである。また、次章で述べるがうるう秒などの影響を最小限にして同期の連続性を確保するためには、NTP または PTP の構成、バージョンを統一しておく必要がある。

うるう秒の扱い

⇨ 時刻同期とうるう秒

うるう秒については本誌 2015 年 7 月号²⁾ で解説しているが、正確な 1 秒を用いて維持されている UTC へ地球の自転とのずれを調整するために挿入あるいは削除される 1 秒のことである。たかが 1 秒のことであるが、連続して積み上げている時刻のイレギュラーであり時刻同期システムに大きな影響を与える因子となる。

時刻同期状態を維持するためには、時刻が連続している場合は各コンピュータ内蔵の時計で時刻を維持し、適切な間隔で時刻同期を行うことで各コンピュータ間の時計の誤差を補正すればよい。しかし、うるう秒調整が行われると 1 秒を挿入または削除する時点で時刻が不連続となるため、各コンピュータの時計ごとに対応を行う必要がある。うるう秒の対応がシステム内で一致して行われなかった場合、時刻の同期状態が損なわれさまざまなトラブルが生じることになる。

コンピュータでうるう秒調整を行う際に生じるトラブルは大きく分けて 2 つある。

1 つは、うるう秒挿入時の時刻である。過去 26 回発生したうるう秒調整はすべて 1 秒挿入による調整であった。うるう秒挿入は月末最終日の最後、23 時 59 分 59 秒の後に 1 秒挿入され 23 時 59 分 60

秒という時刻を発生させる。しかし、通常のコンピュータでは60秒という時刻は存在しないため0秒を2回行ったり、1,000秒前から1,000分の1秒長い1秒を用いて少しずつ時刻をずらしながらうるう秒を吸収したりして対応を行っている。これらの対応をシステム内で統一していないと同期が損なわれる原因となる。

もう1つは、うるう秒調整の発生頻度である。表-1に1972年の第1回から最新の第26回までの日本でうるう秒調整を実施した年月日を示している。20世紀後半にはほぼ年1回の頻度でうるう秒調整を実施していたが、2000年以降は実施の間隔が開いている。コンピュータなどの場合、その間にソフトウェアなどが更新されバージョンなどの統一性が崩れる場合がある。また、頻度が不定期になるため、処理の自動化が難しい。

時刻配信・同期方式の中にはうるう秒に対する対応方法が定められているものもある。たとえばNTPなどはうるう秒指示子(Leap Indicator: LI)を用いてサーバ・クライアントとも適切に設定すればうるう秒に自動で対応できる。ただしNTPのバージョンによってLIの動作が異なるため、LIへの対応の有無とともにNTPのバージョンを確認しオプション等を適切に設定する必要がある。また標準時については日本標準時のWebページにうるう秒への対応が記載されている³⁾。

⇐ うるう秒の今後

うるう秒調整時のトラブルはネットワークが発展するに伴い大きな社会問題となってきた。このため、2000年以降UTCを定義しているITUの作業部会において「UTCの将来問題」についてSpecial Rapporteur Groupを組織し、外部からの参加者も交えさまざまな議論を行ってきた。

2005年頃にはうるう秒をうるう時に変更する案が提示され外部組織も含め議論されたが、うるう時を導入することによる新たな障害の発生なども指摘され、2007年以降はうるう秒調整を廃止する方向で議論が行われた。そして2012年の総会にうるう

第 回	年 月 日	うるう秒	UTC-TAI
26	2015年7月1日	+1秒	-36秒
	2014年	—	
	2013年	—	
25	2012年7月1日	+1秒	-35秒
	2011年	—	
	2010年	—	
24	2009年1月1日	+1秒	-34秒
	2008年	—	
	2007年	—	
23	2006年1月1日	+1秒	-33秒
	2005年	—	
	2004年	—	
	2003年	—	
	2002年	—	
	2001年	—	
	2000年	—	
22	1999年1月1日	+1秒	-32秒
	1998年	—	
21	1997年7月1日	+1秒	-31秒
20	1996年1月1日	+1秒	-30秒
	1995年	—	
19	1994年7月1日	+1秒	-29秒
18	1993年7月1日	+1秒	-28秒
17	1992年7月1日	+1秒	-27秒
16	1991年1月1日	+1秒	-26秒
15	1990年1月1日	+1秒	-25秒
	1989年	—	
14	1988年1月1日	+1秒	-24秒
	1987年	—	
	1986年	—	
13	1985年7月1日	+1秒	-23秒
	1984年	—	
12	1983年7月1日	+1秒	-22秒
11	1982年7月1日	+1秒	-21秒
10	1981年7月1日	+1秒	-20秒
9	1980年1月1日	+1秒	-19秒
8	1979年1月1日	+1秒	-18秒
7	1978年1月1日	+1秒	-17秒
6	1977年1月1日	+1秒	-16秒
5	1976年1月1日	+1秒	-15秒
4	1975年1月1日	+1秒	-14秒
3	1974年1月1日	+1秒	-13秒
2	1973年1月1日	+1秒	-12秒
1	1972年7月1日	+1秒	-11秒
	1972年1月1日	—	-10秒

表-1 これまで実施されたうるう秒調整年月日

秒調整を廃止する勧告案が提出された。

しかしうるう秒調整廃止の議論はアラブやアフリカの諸国には浸透しておらず、うるう秒廃止についての議論は2012年の総会から2015年11月に開催される世界無線通信会議に持ち越されることになった。

ITUの作業部会における議論で日本はうるう秒によってICT分野で発生した問題について報告した。たとえば電子文書の安全な保存に必要なタイムスタンプシステムがシステムを停止して対応したこと、およびNTPにおいて複数のStratum 1サーバのうるう秒への対処が異なって混乱が生じていたことなどを報告した。特にタイムスタンプシステムの不具合はうるう秒調整のICTへの具体的な報告例としてその後のさまざまな報告に多く引用された。

それ以外にも地理的条件から日本ではうるう秒調整が午前9時というビジネス開始時に起こるため、ネットワークトラブルなどが生じると大きな社会問題になることを報告しうるう秒の廃止を推進した。

本稿執筆時点ではまだ世界無線通信会議の結論は出ていないが、うるう秒調整の廃止が決議された場合、世界の標準時の変更になるため、5年間の移行期間が設定される。このため、決議が確定するのが2016年、その後5年間の移行期間ということで、実際にうるう秒調整が廃止されるのは2022年以降になる。

逆に言えば時刻同期を必要とするシステムにおいては、今後ともうるう秒に対する対策を立てておく必要がある。

導入に向けて

最後に、実際の導入に向けた目安についてまとめる。

まず一事業所レベルでは、1台マスターサーバを設置して従属型時刻同期システムを構築するのが一般的である。要求精度がミリ秒以下であればNTP方式、マイクロ秒以下の高精度を必要とする場合はハードウェアクロックを用いたPTP方式が適している。また、ほかの事業所等と情報の共有などを行う

ため、マスターサーバは標準時と同期するべきである。

マスターサーバの時刻同期には、長波標準電波やGPS衛星など報時型時刻同期方式を用いるのが一般的である。しかし外部アンテナなどの設備が用意できない場合はアナログ電話回線による日本標準時の供給システム、通称「テレホンJJY」を利用する方法もある⁴⁾。

テレホンJJYを利用することで、電話回線用モデムと汎用通信ソフトを用いて時刻が取得可能である。さらに専用の通信装置を用いることで電話回線の双方向性を活用し回線遅延を測定・補正することにより、1ミリ秒以下という時刻同期が可能となる。

このように各拠点のマスターサーバは標準時に時刻同期し、拠点内は従属同期型で時刻同期を行うことでシステム全体の規模が大きくなっていても時刻同期が可能となる。システム構築の際は、用途に応じた精度の時刻同期方式を組み合わせるようにする。

また、採用した時刻同期方式がうるう秒調整に対応しているか、うるう秒に共通の対応をとることができるかについてソフトウェアのバージョンや実装などに十分注意を払う必要がある。

参考文献

- 1) Rec. ITU-R TF.460-6, Standard-frequency and Time-signal Emissions (2002).
- 2) 岩間 司：うるう秒とは何か、情報処理, Vol.56, No.7, pp.624-625 (July 2015).
- 3) <http://jyy.nict.go.jp/news/leaps-new.html>
- 4) <http://jyy.nict.go.jp/time/teljyy/index.html>

(2015年9月30日受付)

岩間 司 iwama@nict.go.jp

1985年東工大大学院修士課程修了。同年郵政省電波研究所(現情報通信研究機構)入所。以来、1~3GHz帯地上波伝搬特性解析、移動通信のセル構成、日本標準時供給、周波数校正、時刻認証基盤技術の研究開発等に従事。博士(工学)。IEEE会員。