

Precision Time Protocol (PTP/IEEE-1588)

IEEE-1588 に定義された PTP (Precision Time Protocol) は、LAN上のコンピュータを高精度に時刻同期させる手段となります。IEEE-1588 のために構築されたLANにおいて、PTP は複数のクロックを100 ナノ秒以上の精度で同期させることができます。PTP をサポートするネットワークタイムサーバーは "IEEE-1588 Grandmaster" や "PTP Grandmaster" と呼ばれます。この白書は PTP の基本原理とグランドマスターの冗長化、100 ナノ秒の時刻同期を達成するネットワークの構築について説明します。

PTP 同期の基本

このプロトコルは NTP サーバーとクライアントに相当する、PTP マスターとスレーブの間に使われる同期メッセージを定義しています。マスターは時刻を配信し、スレーブはマスターに同期します。グランドマスターは GPS や CDMA といった基準時刻に同期したマスターです。

プロトコルのメッセージには Master sync message, Master sync follow-up message, Master delay response message, と Slave clock delay request messages があります。これらメッセージに加えて、Best Master Clock (BMC) アルゴリズムが複数のマスターからそのネットワークで最良のマスターを選出します。

LAN の時刻同期には、少なくとも1台のマスターと1台のスレーブが必要です。1台のマスターには複数のスレーブが同期できます。マスターはスレーブがそのクロックを補正するのに必要とする同期メッセージを提供します。正確なタイムスタンプがマスターとスレーブクロックでやりとりされます。これらタイムスタンプはスレーブをマスターに同期させるのに必要なネットワーク遅延を算出するのに使われます。Sync message は通常1秒か2秒に1回マスターから送られます。スレーブからはそれより低い頻度で Delay request message が送られ、マスターは Delay response message で応答します。

マスターとスレーブの間で4つのタイムスタンプがやり取りされます。タイムスタンプはスレーブがオフセットを計算するのに必要とされ、それぞれ T1, T2, T3, T4 (図1参照) と呼ばれます。

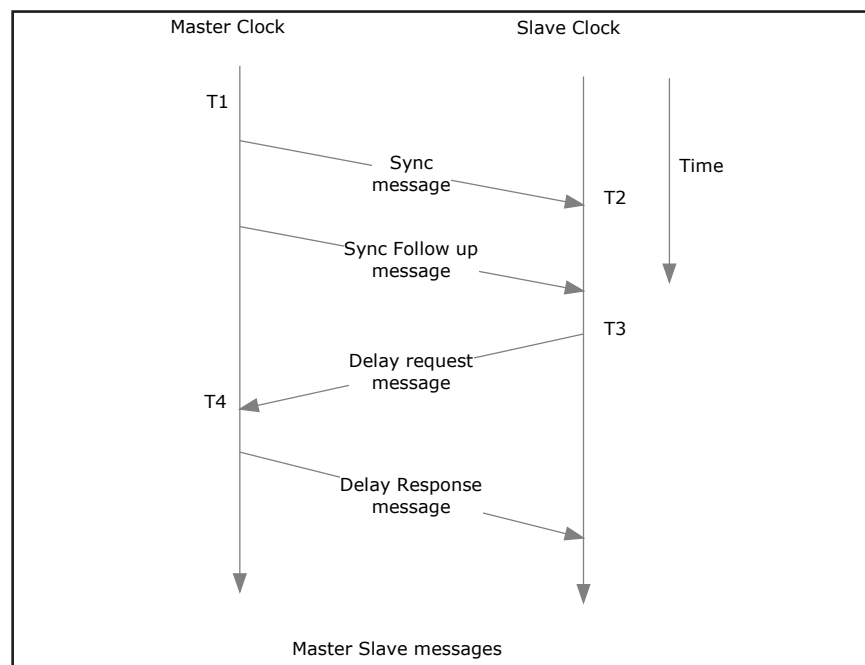


図 1. PTP タイムスタンプ (T1 - T4)

2つの遅延、マスターとスレーブの遅延とスレーブとマスターの遅延を計算しなければなりません。まずマスターとスレーブの差を計算します：

最初に送られるタイムスタンプは T1 です。T1 はマスターがその Ethernet のポートに Sync message を送った時刻であり、Follow-up message でスレーブに伝えられます。

2番目のタイムスタンプは T2 です。これはスレーブが Sync message を受け取った時刻です。

スレーブが T1 と T2 を手に入れると、マスターとスレーブの差が計算できます：

マスターとスレーブの差 = T2 - T1

次にスレーブとマスターの差を計算します：

3つめのタイムスタンプは T3 です。スレーブが Delay Request message を送った時刻です。4つめのタイムスタンプは T4 です。マスターが Delay Request message を受け取った時刻であり、Delay Response message でマスターからスレーブに伝えられます。

スレーブとマスターの差はスレーブが T3 と T4 を手に入れると計算できます。

スレーブとマスターの差 = T4 - T3

一方方向の遅延をマスターとスレーブの差、スレーブとマスター差からスレーブは計算します：

一方方向遅延 = (マスターとスレーブの差 + スレーブとマスターの差) / 2

オフセットはスレーブクロックを補正するのに使われます：

Offset = マスターとスレーブの差 - 一方方向遅延

または

Offset = ((T2 - T1) - (T4 - T3)) / 2

ですから、ネットワークの伝搬遅延が一定であり、運用環境はゆっくり変化すると仮定すると、このアルゴリズムについて次のことが言えます：

スレーブクロックはオフセットを使い時刻をマスタークロックに合わせるように調整する。通常、スレーブクロックはオフセットに影響するネットワークの伝搬遅延を計算に入れ、またクロックの安定性に影響する水晶発振子の温度特性とエージング効果を考慮したクロック調整アルゴリズムを使う。

PTPの実装方法

IEEE-1588 プロトコルはどのように PTP をマスターやスレーブに実装すべきか定義していません。大別して2つの方法で Ethernet に PTP が適用されてきました：ソフトウェアタイムスタンプとハードウェアタイムスタンプです。次にこれらについて説明します。

ハードウェアタイムスタンプのグラントマスター

GPS に同期している時、グラントマスタークロックは GPS 時刻に対して 30ナノ秒以上の精度で正確なタイムスタンプを打ちます。グラントマスタークロックは GPS に同期した基準発振器を内蔵しています。この発振器が受信する Delay request と送出する Sync パケットに正確なタイムスタンプを打つ専用のハードウェアの基準クロックとなります。オシロスコープを使って、グラントマスターの出力する 1PPS 信号とハードウェアスレーブの 1PPS 信号を比較測定することができます。この方法は OS やネットワークの遅延の影響を受けません。

ハードウェアタイムスタンプのスレーブ

専用の PCIe 基板によるハードウェアタイムスタンプと PTP ソフトウェアデーモンは、ナノ秒級のタイムスタンプ性能を提供します。このようなハードウェアスレーブはソフトウェアスレーブ（下記）に比べて、高精度な発振器、マスターとの位相比較を可能にする 1PPS 出力、OS の遅延の影響を受けない専用ハードウェアなど、数々の利点を持ちます。ハードウェアグラントマスターと 1588 PTP に対応するイーサネットスイッチと組み合わせることで、100ナノ秒以上の同期精度を達成できます。

ソフトウェアタイムスタンプのスレーブ

ソフトウェアのみによる PTP は、既存のハードウェアと PTP デーモン（図3 参照）で実現できます。ソフトウェアスレーブではソフトウェアタイムスタンプを使ってマザーボード上のシステムクロックを補正しなければなりません。一般的にマザーボード上のシステムクロックの精度は悪く、またソフトウェアタイムスタンプは OS の遅延の

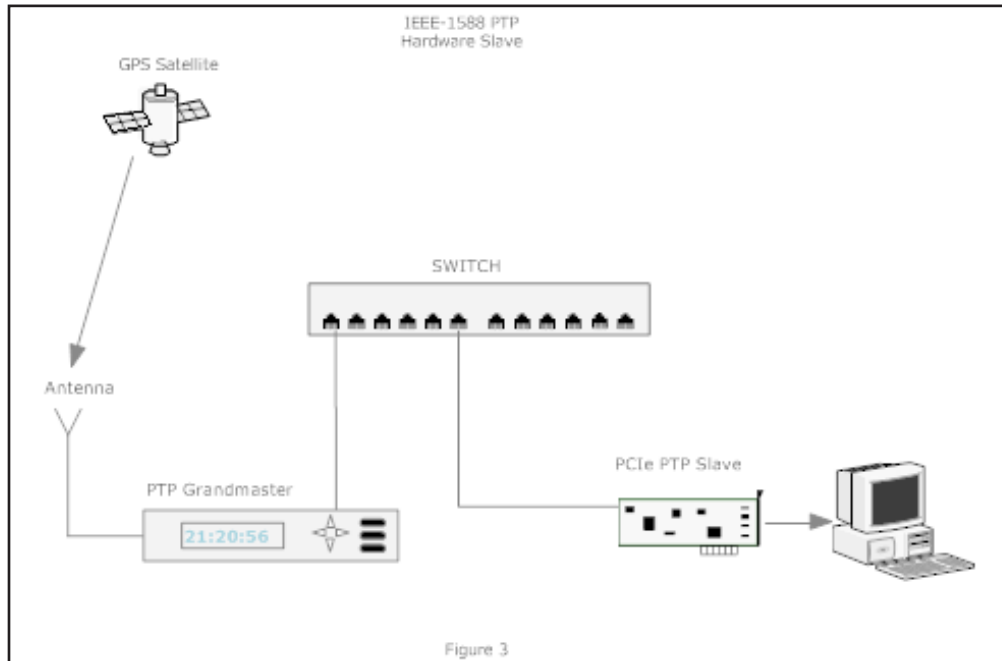


図 2. ハードウェアタイムスタンプの PTP スレーブ

影響を受けるためハードウェアタイムスタンプのような精度は期待できません。また1PPS 出力がないために、ソフトウェアスレーブとマスターの同期精度の測定はログファイルの記録に頼るしかありません。ソフトウェアスレーブでもマスターに対して通常10から100マイクロ秒程度の精度での同期は可能です。

100ナノ秒以下の同期を実現するネットワークの条件

100ナノ秒以下のタイミングを LAN で実現するには IEEE 1588 に完全に準拠した構築が必要とされます。3つの大切な構成部品は: GPS グランドマスタークロック、イーサネットスイッチ(TCないしBC)、PTP スレーブです。これら全てがハードウェアタイムスタンプをサポートしていなければなりません。グランドマスターとスレーブに

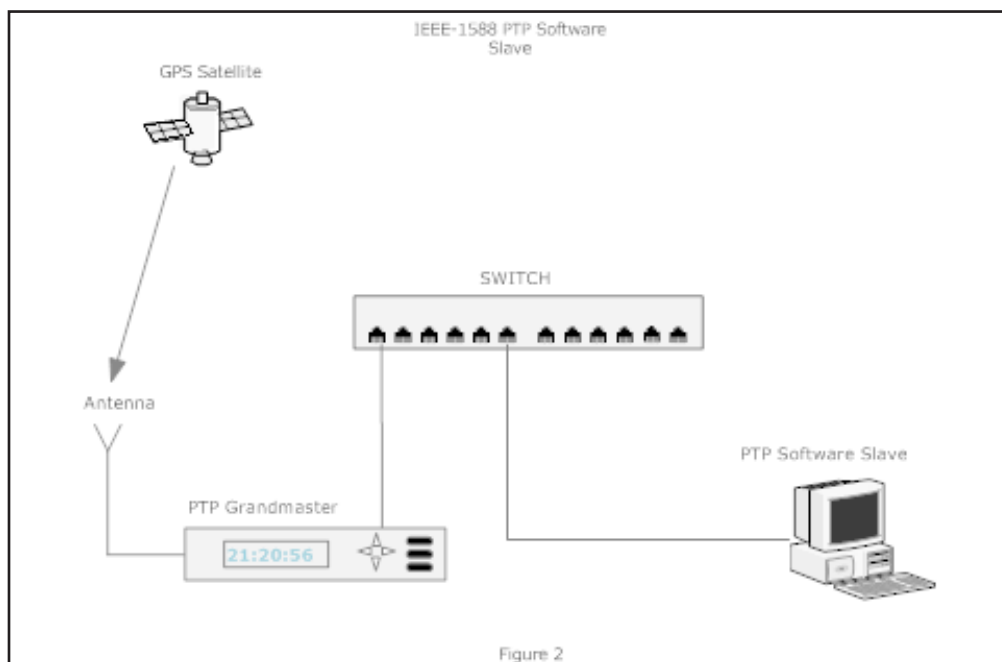


図 3. ソフトウェアタイムスタンプの PTP スレーブ

については「PTP の実装」のところでもふれました。以下はイーサネットスイッチについての議論です。

イーサネットスイッチ

イーサネットスイッチは一般的なイーサネットスイッチと IEEE-1588 機能を持つイーサネットスイッチに大別できます。一般的なイーサネットスイッチは受け取ったパケットを一旦蓄積してから出力します。蓄積する時間は予測できず、ネットワークの負荷の影響も受けるためにパケットの遅延はばらつきます。このパケット遅延のばらつきゆえ、たとえハードウェアタイムスタンプのマスターとスレーブを使ったとしても、一般のイーサネットスイッチを経由すると、時刻同期の結果が悪くなります。IEEE-1588 機能を持つスイッチは、TC (transparent clock) ないし BC (boundary clock) です。TC または BC はパケット遅延のばらつきの影響を排除することで、マスターとスレーブの同期を改善します。

高速低遅延スイッチ

高速低遅延なスイッチは、タイミングについて言えば一般のスイッチと同じです。高速低遅延な蓄積伝送スイッチは、少ないネットワーク負荷においては安定した精度の高い同期を実現しますが、蓄積伝送ゆえパケット遅延のばらつきが生じ、これが時刻同期に悪い影響を与えます。

TC (Transparent Clock)

TC は IEEE-1588 のパケットを通常のスイッチとは違う方法で取り扱うイーサネットスイッチです。TC ではパケットを蓄積している時間を計測し、その時間を Follow-up message の補正項に書き込みます。スレーブがパケットの遅延を計算する際に、タイムスタンプとこの補正項を使います。

BC (Boundary Clock)

BC は IEEE-1588 のパケットを通常のスイッチや TC とは違う方法で扱うイーサネットスイッチです。BC を設置する際は PTP パケットのためにサブネットを用意します。マスターから見て BC はスレーブのように振る舞い、サブネットに対してはマスターとして振る舞います。BC は PTP のパケットだけを扱い、一般のイーサネットスイッチやルーターがその他全てのトラフィックを担います。分離されたサブネットにあるスレーブは、BC がマスターであるかのようにそれに同期します。

同期精度を測定する

グランドマスターと PTP スレーブの同期精度を正確に測定するには、位相差をオンロスコープで測定するために双方に 1PPS 出力が必要になります。図4を参照してください。同期精度と安定性はネットワークの構成の影響を受けます。1588 対応でないスイッチはパケット遅延のばらつきを生じ、スレーブの同期精度と安定性に影響を与えます。そのため、スイッチの代わりにクロスケープルを使い基本同期性能を測定しておくことで、スイ

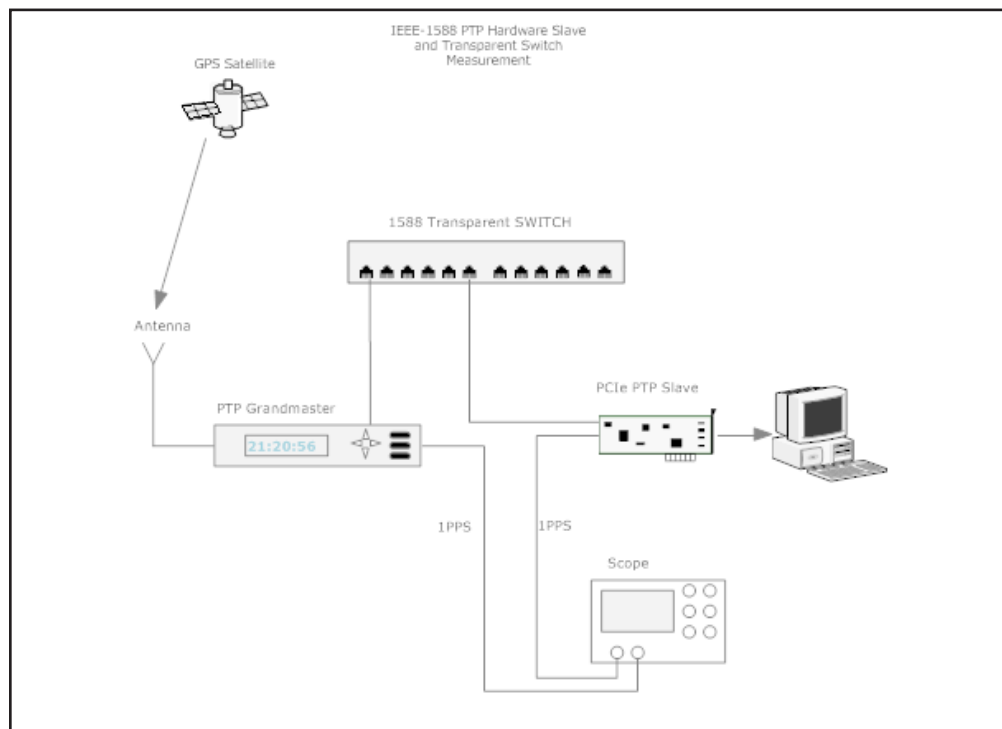


図 4. TC で接続したハードウェアタイムスタンプのマスターとスレーブ

ツチの影響をより良く理解できます。また現実的な同期性能の測定は、計画されたネットワーク負荷の元で行うことが重要です。

グランドマスタークロックの冗長化

2台のグランドマスタークロック(GMC)を持つ 1588 タイミングネットワークを構成するには、2台を BMC (Best Master Clock) アルゴリズムに従って設定します。図5を参照してください。BMC アルゴリズムは IEEE 1588-2008 (v2) 標準に定義されています。

BMC は2つのグランドマスターのクロックデータを比較し、最適なクロックを決定します。クロックデータはクロックの特性を定義し、マスターから Announce パケットで送信されます。最適なクロックデータを持つグランドマスターがそのネットワークの PTP グランドマスターとなり、スレーブに時刻を送信します。ある時点において、ただ1つの PTP グランドマスターが同期パケットを送信します。BMC アルゴリズムは次の階層順にクロックデータを元に最適なクロックを選出します：

1. Priority1: 設定範囲 0-255. 低い数字のマスターを選択。
2. Clock Class: クロックが同期しているか、ホールドオーバーか、非同期か。エポックが PTP か ARBか。 選択順: Locked PTP epoch, Holdover PTP epoch, Locked ARB epoch, Holdover ARB epoch, Unlocked PTP epoch, Unlocked ARB epoch.
3. Clock Accuracy: クロック精度 (予測誤差), 選択順: <25ns, <100ns, <250ns, <1us, <2.5us, <10us, <25us, <100us, <250us, <1ms, <2.5ms, <10ms, unknown.
4. Clock Variance: 発振器の種類, 選択順: Rubidium, OCXO, TCXO.
5. Priority2: 設定範囲 0-255. 低い数字のマスターを選択。
6. Unique identifier (上記全てが同点になったときに): ポートの MAC アドレス. 値が低い方を選択。

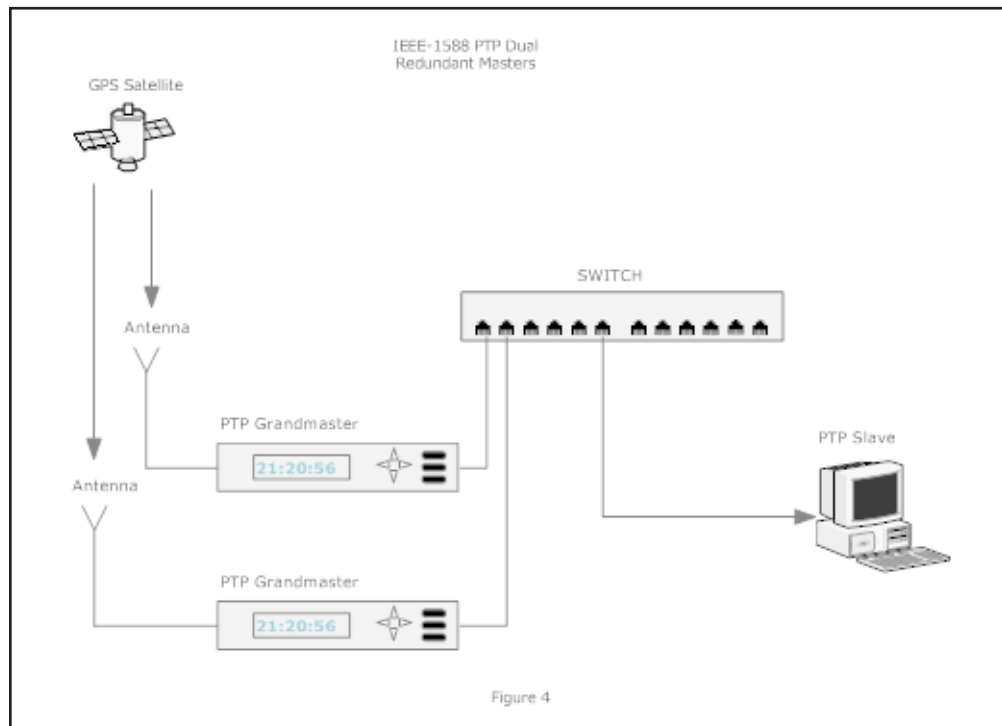


図 5. 二重化 グランドマスタークロック



日本総代理店

 **株式会社 昌新**

情報システム営業部

〒103-0022 東京都中央区日本橋本町1-9-13

TEL 03-3270-5926 FAX 03-3245-1695

大阪支店 TEL 06-6946-7751 名古屋支店 TEL 052-581-7291

IS@shosin.co.jp <http://www.shosin.co.jp/c/endrun>

EndRun
TECHNOLOGIES
"Smarter Timing Solutions"

Santa Rosa, CA, USA
1-877-749-3878 or 707-573-8633
sales@endruntechnologies.com
www.endruntechnologies.com

