



## 構造ヘルスマニタリング向けスマートセンサネットワーク用 高精度時刻同期システム

石川 健一郎<sup>1)</sup>、 三田 彰<sup>2)</sup>

1) 慶應義塾大学、助教 工博  
e-mail : shinzan@mtb.biglobe.ne.jp

2) 正会員 慶應義塾大学、教授 Ph.D.  
e-mail : mita@sd.keio.ac.jp

### 要 約

近年、構造ヘルスマニタリングが大型建造物の持続可能性（サステナビリティ）の確保に貢献するキーテクノロジーとして注目を集めている。本論文では構造ヘルスマニタリング向けのデータ処理能力を持ったセンサによるスマートなセンサネットワークに注目し、そのセンサネットワークが構造ヘルスマニタリングに適用するために十分な精度の時刻同期を確保するシステムを提案した。提案したシステムを実装しての実験を行い、本時刻同期システムでは190m離れたセンサノード同士を1.42  $\mu$ s以下の誤差で同期させることを確認した。その結果、本時刻同期システムが十分な精度を確保していることを確認した。

キーワード： センサネットワーク、スマートセンサ、時刻同期

### 1. 始めに

近年、都市基盤建造物や建造物、そして航空機等の安全性に対する関心の高まりとともに構造ヘルスマニタリングシステムが注目されつつある。

構造ヘルスマニタリングシステムは、建物などの建造物に変位センサ、圧力センサ、加速度センサなど様々なセンサを張り巡らせ、地震や台風による損傷や経年劣化など建造物の異常を検知することを目的としたシステムである。

構造ヘルスマニタリングで用いられる建物に張り巡らされたセンサとセンサ同士・センサと制御するための機器を結合するためのネットワーク、センサ及びネットワークの制御のための機器の総称を本論文ではセンサネットワーク<sup>1)</sup>と呼び、センサとセンサがセンサネットワークに接続するために必要な機器をセットにしたものをセンサノードと呼ぶ。

センサネットワークで用いられるネットワークには有線ネットワーク、無線ネットワークがある。本研究では有線ネットワークを用いたセンサネットワークを研究対象とした。

大規模な建造物の構造ヘルスマニタリングシステムでは、膨大な数のセンサノードを取り扱う必要がある。従来のアナログネットワークでは各センサノードからロガーまでシールド性能の良いケーブルを引く必要があり、ケーブルコストや敷設コストが問題となっていた。

本研究のシステムではプロセッサを備えたスマートセンサノードを用いたデジタルセンサネットワー

クを形成することによりこの問題に対処する。各センサノードにおいてセンサの出力はすべてデジタルデータとして取得され、記憶された後、値の補正、異常値のカットなどのフィルタリング処理をされ、ネットワークを通じて接続されたノード、サーバ等に送られる。

デジタルセンサネットワークでは正確な測定を行うために時刻同期が重要になる。特に本研究では加速度センサを用い、地震の振動応答を計測することを想定しているため 1KHz 程度の比較的高いサンプリング周波数を必要とする。そのため、通常より精度の高い方式が必要になる。そこで、本研究では高い時刻同期性能を発揮できるメカニズムについて検討した。

時刻同期性能を検証するため、スマートセンサノードのプロトタイプを製作し評価した。プロトタイプでは広く一般的に用いられている通信用機器である 100BASE-TX 規格用機器を改造することにより、ネットワークを形成した。その結果、プロトタイプが正しく動作することが確認され、高い時刻同期精度が実現可能であることが示された。

## 2. 既存の研究

本章では本論文で述べる手法と対比すべき既存の時刻同期手法について述べる。

GPS (Global Positioning System)<sup>2)</sup> は United States Department of Defense<sup>3)</sup> によって運営されている位置特定及び時刻同期システムである。GPS は世界中で時刻同期システムとして幅広く使われている。時刻同期の誤差が 200ns<sup>4)</sup>以下と非常に小さい。だが、高価なハードウェアが必要であり、人工衛星からの電波が受信可能なことが要求される。そのため、標準時間を得るために使用することが可能であるが、各センサノードの同期のために使用するのには現実的ではない。

NTP (Network Time Protocol)<sup>5)</sup>はパケット交換型ネットワークに接続されたコンピュータシステムの時刻同期プロトコルである。様々な遅延要因があるネットワークにおいて時刻同期が可能である。NTP を使用することにより、ローカルエリアネットワークでは 200  $\mu$ s 以下の誤差での時刻同期が実現可能である。

無線ネットワーク向け時刻同期研究も多くなされている<sup>6)7)</sup>。The Flooding Time Synchronization Protocol<sup>6)</sup>では基準となる時刻を他のノードに送る際の誤差を可能な限り補償することにより、無線ネットワークにおいて直接通信し合った場合 1.5  $\mu$ s、他のノードを経由した場合それに加えてノードを通過する毎に 0.5  $\mu$ s の誤差となる。

## 3. センサネットワークの基本構造

本章では大型建造物向けセンサネットワークを提案する。大型建造物は建造物のモニタリングのため有線で結ばれたセンサ群を建造物に取り付けた際、効率よく信号線を配線した場合においてもセンサ同士の配線長が 100m程度を超える大きさの建造物を指す。大型建造物は長期間使われ、構造ヘルスマニタリングのために多数のセンサが用いられることとなる。そのため、センサネットワークは長期の使用に適し、多数のセンサを適用可能にするためスケーラビリティに優れた構造を持たなくてはならない。

センサネットワークは大きく分けて有線ネットワークを用いたもの、無線ネットワークを用いたものが考えられる。有線ネットワークと無線ネットワークそれぞれの利点を以下に記述する。

(有線ネットワークの利点)

### 1. 外部電源が使用可能

- ・半永久的な電源供給ができる。
- ・電力消費の大きい高性能プロセッサやセンサが使用可能である。

コンセントなどの外部電源からの電力供給が可能のためバッテリー駆動時間などを考慮した設計を行う必要がない。

### 2. 高速で安定した通信を行うことが可能

- ・大量のデータを短時間で転送することができる。
- ・通信が不安定になりデータが転送できなくなる可能性が低い。  
有線で通信が行われるため無線での通信と比較し転送速度は速く、また、障害物による通信信号の減衰のため通信が不安定になることがない。

(無線ネットワークの利点)

#### 1. 配線の必要がない

- ・ある程度自由にセンサを設置することができる。
- ・センサの設置が容易。

無線で通信を行うため、配線時の制約に縛られずにセンサの設置位置を決定することができる。また、配線の必要がないためセンサの設置を簡単に行うことができる。

有線ネットワークと無線ネットワークはそれぞれ利点があり適用する対象によって有線ネットワークと無線ネットワークのどちらを選択すべきなのは異なる。また、有線ネットワークと無線ネットワークを混在させ、それぞれの利点を生かすことも可能である。本研究ではあらかじめ設置したセンサノードの長期使用に適した有線ネットワークのみを使用する。

また、本センサネットワークでは大量のセンサを接続可能なスケーラビリティに優れたネットワークを実現するためツリー構造を取る。ツリー構造ではセンサノードはノードに所属し、それぞれのノードはツリー状に接続される(図1)。ツリー構造を採用することにより従来の有線ネットワークの欠点である配線の煩雑さをある程度緩和することが可能になる。

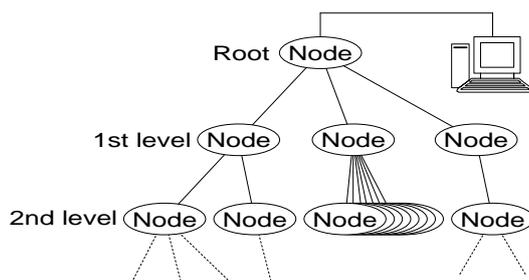


図1 センサネットワークのツリー構造

1つ1つのノードにはノード同士およびノードとセンサノードを接続するためのハブがあり、ハブに1つの親センサノードと複数の子センサノードが接続されている。大元のノードであるルートノードは全体を制御するコントロールサーバに接続されている。

ツリー構造を採用することにより、センサノードが過度に分散し接続されること、もしくはセンサノードの接続先が少数の接続機器に集中することを防ぐ。センサノードが過度に分散した場合、ネットワークの過剰な部分が大きくなるためコスト面及びデータの転送速度の面で不利になる。また、少数の接続機器に集中した場合、多数のセンサノードの接続が可能な機器が必要になるため接続機器が高価になり、ネットワーク構造の変更が困難になる。本研究ではツリー構造により適度に分散したネットワークを目指す。

1ノードに接続可能なノード及びセンサノード数(接続口数)の最適値は実際に構築するセンサノードの数、配置などにより変化する。各ノードには必ず上位ノードへの接続口、下位ノードへの接続口もしくは接続口群が必要になるため4口以下の接続口しか持たないノードはノード当たり2センサノード以下しか接続できず効率が悪い。また、ノードに接続するセンサノード数が多数の場合ツリー構造によるネットワークの分散効果が低下する。これらより1ノードの接続口数は5接続口から十数接続口が適当と考える。1ノードの接続口数によりネットワークの構造は変化する。

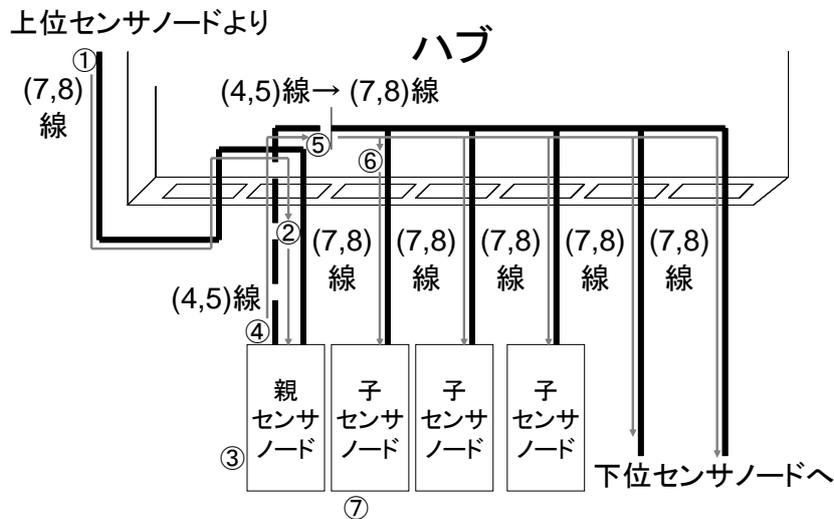


図2 ハブの各ポートと接続先

本システムでは 100BASE-TX を用いセンサノードを接続する。ノード内のハブは上位ノード、親センサノード、子センサノード、下位ノードに接続される。ハブには上位ノードに接続されるポート(The upper level cell port)、親センサノードに接続されるポート(The mother sensor node port)、子センサノード及び下位ノードに接続されるポート(The child sensor node port)があり、それぞれ対応するノード及びセンサノードのみに接続する(図2)。センサネットワークはハブを用いることにより用いない場合と比較し大幅にケーブル量を削減できる。センサノード間、センサノード、コントロールサーバ間は TCP/IP もしくは UDP/IP を用い通信する。本研究で使用するハブは通常のネットワーク機器として使用可能であるため、センサネットワークと通常のネットワークは混在可能である。

通常のネットワークと混在可能とすることによりケーブルコスト及び敷設コストを大幅に削減することを可能にしている。今日の建築物にはローカルエリアネットワークが敷設されるのが標準であり、ローカルエリアネットワークが 100BASE-TX を用いている場合、ハブを本研究で用いられるハブに交換することにより通常のローカルエリアネットワークとセンサネットワークが使用可能になる。

#### 4. 時刻同期機構の実装

時刻同期はスマートセンサを使う際に非常に重要である。スマートセンサはおののちに独自の時刻を持つため、時刻が十分に同期されていない場合、測定結果を効果的に利用することができない。

本システムにおいては時刻同期のための情報を持った時刻同期信号を転送することにより時刻同期を行う。時刻同期信号はルートノードによって作られ、直接接続されているノードへ転送される。時刻同期信号を受け取ったノードは時刻同期を行い、新たに時刻同期信号を作り、下位ノードへ転送する。反復的な構造を取ることにより上位ノードからの時刻同期信号が途絶えた場合においても下位ノードへの時刻同期信号の転送は続けられ、信号が届いている範囲での時刻同期を続行可能である。

時刻同期信号を単一の発信源からすべてのセンサノードに転送する形式を採用することにより、より精度の高い時刻同期が可能になるが、信号の減衰のため接続可能なセンサノードが限られ、スケーラビリティに欠けるため採用しなかった。反復的な構造を採用することにより本センサネットワークには IP アドレスの限界までセンサノードを接続可能である。

時刻同期の実装を行った。本実装ではセンサノードはセンサボードとプロセッサボードを持っている。センサボードは A/D コンバータ及び加速度センサを持っている。プロセッサボードは SUZAKU-V と呼

ばれる市販の FPGA ボードを改造したものを用いた。SUZAKU-V のプロセッサボードのスペックを表 1 に、A/D コンバータのスペックを表 2 に、センサのスペックを表 3 に示す。

表 1 SUZAKU-V プロセッサボードスペック表

プロセッサ	VirtexII-Pro
RAM	32MB SDRAM
フラッシュメモリ	8MB Flash RAM

表 2 A/D コンバータスペック表

分解能	16bit
ダイナミックレンジ	15bit 以上
サンプリング周波数	1KHz

表 3 センサスペック表

センサ	サーボ型加速度計
測定範囲	0.1Gal~2000Gal
周波数特性	DC~100Hz(-3dB)

100BASE-TX 用カテゴリ 5 ケーブルは 4 組の対となっている線を持ち、うち 2 組(4-5 対、7-8 対)は使用されていない。本センサネットワークにおける時刻同期ではこの 2 組の線を使用する。

本研究では 100BASE-TX 用ケーブルの 4-5 対、7-8 対に接続される回路の接地パターンをカットしたセンサネットワーク用ハブを使用する。ハブ内及びハブ周辺の信号線は図 2 のように結線する。使用したハブは無駄な通信を防ぐ機能があるスイッチングハブだが無駄な通信を取り除く機能のないリピーターハブにおいても同様の改造をすれば使用可能である。こうした改造が可能であるかはハブの内部構造に依存する。ケーブルは 4-5 対、7-8 対線を露出させる。

時刻同期信号は RS-485<sup>8)</sup>を用いて転送される。親ノードは接続可能な子ノードの数は RS-485 を実現するためのチップに依存する。本実装では 1 親ノードにつき 32 子ノードとなった。時刻同期信号は次のように転送される。

1. (図 2.①)時刻同期信号は親ノードの子ノードポートから 7-8 対線を通り、子ノードの同期ポートへ送られる。
2. (図 2.②)同期ポートの 7-8 対線は親ノードポートの 7-8 対に結線されており、時刻同期信号は 7-8 対線を通じて親センサノードへ送られる。
3. (図 2.③)親センサノードは時刻同期を行う。
4. (図 2.④)親センサノードは時刻同期信号を発生させ、4-5 対線を通じてハブへ送る。
5. (図 2.⑤)親ノードポートの 4-5 対線はハブ内で子ノードポートの 7-8 対線に接続されている。
6. (図 2.⑥)子ノードポートから子センサノード及び子ノードへ時刻同期信号が送られる。
7. (図 2.⑦)子センサノードにおいて時刻同期が行われる。
8. 1 から繰り返す。

このように同じノードの親センサノードと子センサノードでは異なった時刻同期信号を使用する。そのため、両者の間にはタイミングのずれ(ジッタ)が発生する。

時刻同期信号の基準信号は 250KHz の信号である。より高い周波数の基準信号を用いることにより、基準信号により時刻の同期を取る頻度が増すため、より高精度の時刻同期を行うことができる。だが、高い周波数の信号は高い周波数の交流電流と同じように高周波問題を引き起こす。そのため、本実装では比較的低い周波数の基準信号を使用している。

本実装では時刻同期信号は IEEE802.3 / Ethernet で用いられている符号化方式のマンチェスターエンコーディングに修正を加えたものを用いる (図 3)。マンチェスターエンコーディングは、信号線の電圧が高い状態、または低い状態が続き信号を反転させる際に反応速度が遅くなることを防ぐために信号線を通る電流の電圧が一定の時間内に確実に反転するように変換するために用いる。

信号は 3/2 サイクル信号を High にキープすることにより始まり、時刻、時刻同期信号を発生したセンサノードの ID、命令が続く。図 3 に示すように送信するデータとマンチェスターエンコーディングのための信号を排他的論理和(exclusive OR)し、送信する信号を算出する。時刻同期信号は 0.4ms 以内に転送が始まり、0.27ms で Stop signal の終わりまで転送が終了する。そのため、ネットワーク接続後 0.67ms 以内に時刻同期が完了する。

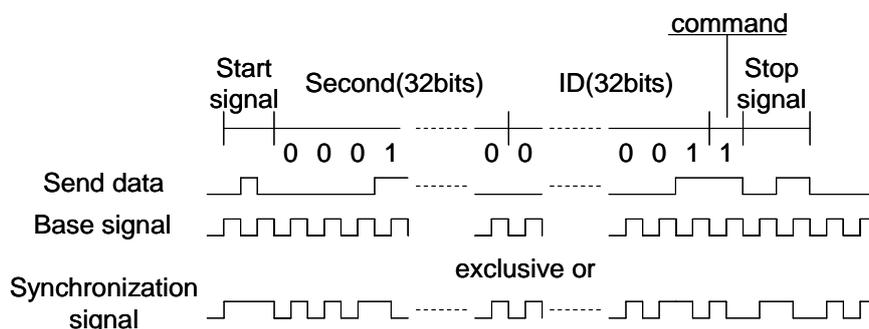


図 3 時刻同期信号

## 5. 評価条件

時刻同期機能はコンピュータによるシミュレーション及び実機によって評価した。コンピュータ上のシミュレーションでは SUZAKU-V 上の VirtexII-Pro の回路記述に用いたハードウェア記述言語(本研究では Verilog)によるプログラムをシミュレータで実行した。

コンピュータによるシミュレーションでは以下の条件で評価を行った。

- 図 4 のように接続された 5 台のノードを想定し、シミュレーションを行った。
- RS-485 向けチップ、及びケーブルの遅延は考慮しなかった。
- エラー耐性及び時刻同期精度を見るため、設定可能な範囲でもっとも実機のクロック周期 (66.3552MHz) に近い 66.313MHz をクロック周期の標準とした。
- クロックのずれ (ジッタ) を表 4 のように 5 ケース (Case0~Case4) 設定し評価した。

SUZAKU-V では通常最大 0.01% 程度のクロックジッタを持つ水晶発振器をクロック源として使用しているがクロックジッタによるエラー耐性を確認するためシミュレーションではクロックジッタを大きく取っている。

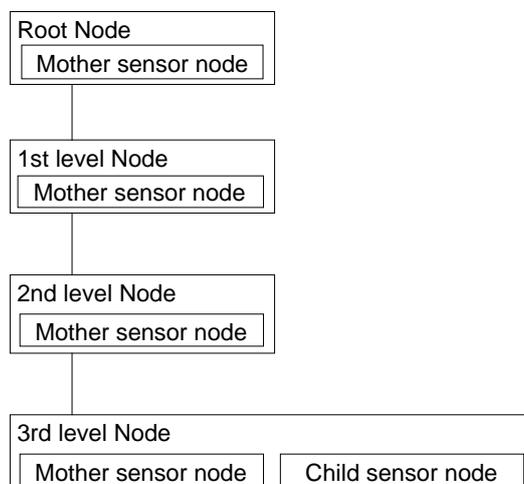


図 4 評価対象

実機評価では 5 台の実機を用い、次のような条件で評価を行った。

- 図 4 のように接続された 5 台のノードを想定し、シミュレーションを行った。
- 各ノード間の接続は 90m のケーブルを用いて、ハブ、センサノード間の接続は 5m のケーブルを用いて接続した（ルートノードとセンサノード間の最大距離は 190m である）。
- 時刻同期信号を RS-485 に変換するため、トランシーバとして MAXIM 社製の MAX3488 を用いた。

表 4 ジッタ

Cell	Sensor	Jitter				
		Case 0	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Root	Mother	0%	+1%	-1%	+2%	-2%
1st level	Mother	0%	-1%	+1%	-2%	+2%
2nd level	Mother	0%	+1%	-1%	+2%	-2%
3rd level	Mother	0%	-1%	+1%	-2%	+2%
3rd level	Child	0%	+1%	-1%	+2%	-2%

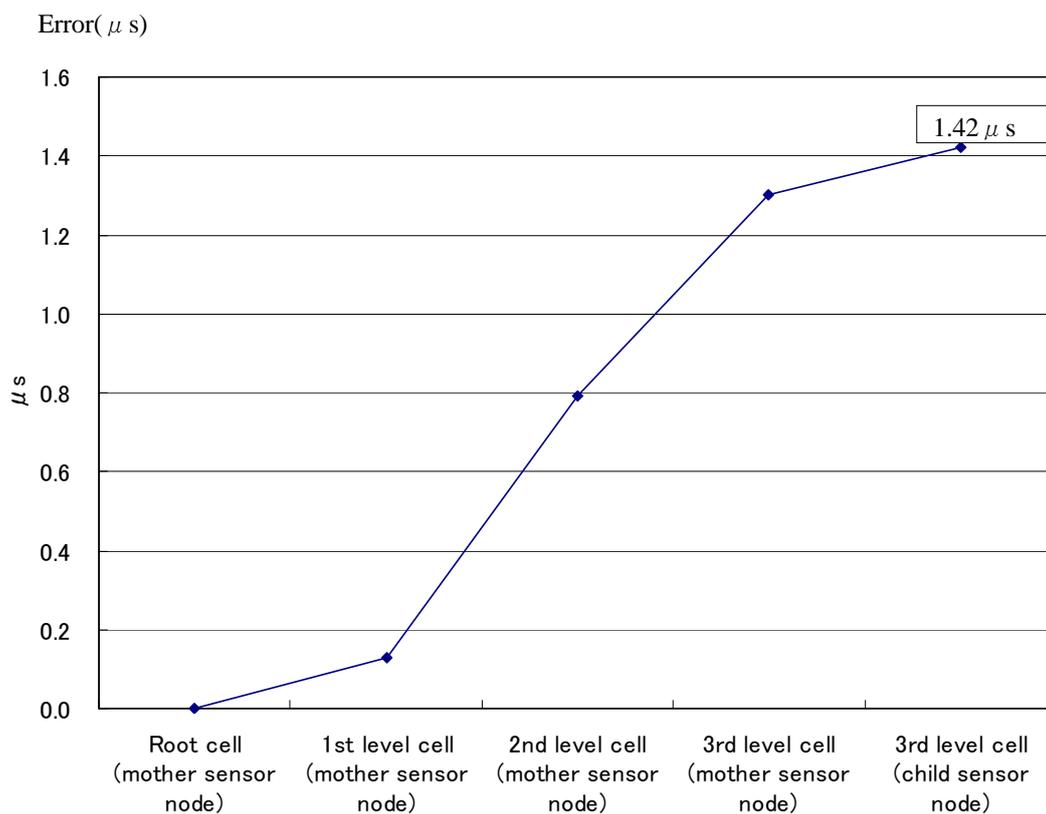
## 6. 評価結果

### 6. 1. コンピュータシミュレーションによる評価

コンピュータによるシミュレーションの結果、クロックジッタを与えた場合においても正しく時刻同期が行われることが確認された。シミュレーションスタート後 1.027ms 後にすべてのノードが時刻同期した。クロックのずれが 0% の場合時刻同期誤差は  $0\mu s$  であり、1% の場合最大  $0.147\mu s$ 、2% の場合  $0.280\mu s$  であった。時刻同期精度は親ノードのクロック周期が標準より長いときには悪化し、親ノードのクロック周期が標準より短い場合は比較的良好である。

### 6. 2. 実機による評価

実機を使用した評価の結果、時刻同期精度はグラフ 1 のようになった。時刻同期が正しく行われることを確認した。時刻同期のずれは最大  $1.42 \mu\text{s}$  であった。サンプリング周波数  $1\text{kHz}$  での測定時に  $0.142\%$  のクロックジッタになる。複数条件での測定結果より時刻同期のずれは親センサノードにおいて時刻同期信号を再発生させる際に約  $80\text{ns}$ 、配線を信号が  $10\text{m}$  進む際に約  $50\text{ns}$  発生することがわかった。ネットワークのデータ転送速度は時刻同期信号を通信しない通常の  $100\text{BASE-TX}$  ネットワークと同等であることが確認された。



グラフ 1 実機評価結果

### 6. 3. 他の時刻同期手法との比較

GPS を用いた既存の研究と比較し本研究の方式は 7 倍程度誤差が大きい。しかし、GPS によるシステムでは衛星からの電波が到達しない屋内での使用が困難なため、広く適応することが困難である。本研究のように屋内の領域が多い大型建造物に適用することを目的とした時刻同期手法として GPS は使用することができない。

NTP では  $200 \mu\text{s}$  以下の精度で時刻同期が可能である。だが、 $1\text{Hz}$  の地震波を測定すると仮定した場合、 $200 \mu\text{s}$  の時刻同期精度では最大  $0.02\%$  程度の誤差が生じる。この誤差では加速時計が  $12\text{bit}$  以上の分解能を持っている場合、時刻同期による誤差が生じる。本方式では同じ地震波を測定すると仮定した場合、最大  $0.00015\%$  程度の誤差となり、本研究で用いている A/D コンバータのダイナミックレンジ  $15\text{bit}$  を超える  $19\text{bit}$  の分解能までは時刻同期による誤差は生じない。そのため、本評価で用いた A/D コンバータを使用する場合には NTP による時刻同期精度では精度として不十分であり、本方式による時刻同期精度では精度として十分であるといえる。

The Flooding Time Synchronization Protocol (FTSP) とは同程度の同期精度である。だが、FTSP の場合誤

差は予想不可能であり、あらかじめ調整するなどの工夫はできない。本方式の誤差は配線長とルートノードから所属するノードまでのノード数から予想可能であり、必要なときはあらかじめ調整可能な点において優れている。

## 7. まとめ

本論文ではセンサネットワークの時刻同期機能について述べた。提案した時刻同期機能は 15bit のダイナミックレンジを持つ A/D コンバータを持つ本研究のセンサノードに適用した場合、十分な精度を持つことがシミュレーションおよび実験による評価で実証された。

高い時刻同期性能はセンサによるより精度の高い測定を可能にする。より精度の高い測定により建造物のより詳細な情報を入手可能になる。より詳細な情報によるより高精度な構造ヘルスマニタリングはより多くの建造物に関する情報をもたらす。より多くの情報を元に建造物のサステナビリティを高めることが可能になる。

## 参考文献

1. Ishikawa K. and Mita A.: "Time Synchronization System for Sensor Grid," In Proceedings of Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, 2006, pp. 506-513
2. Kaplan E. D.:, "Understanding GPS: Principles and Applications," 1996, Artech House
3. Beehler R., : "Time/frequency services of the U.S. National Bureau of Standards and some alternatives for future improvement," Journal of Electronics and Telecommunications Engineers, Vol. 27, No. 10, Part 1, 1981, pp. 389-402
4. Mannermaa J., Kalliomaki K., Mansten T., and Turunen S., " Timing performance of various GPS receivers," In Proceedings of the 1999 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the IEEE International Frequency Control Symposium, 1999, pp. 287-290
5. Mills D. L., "Internet time synchronization: the Network Time Protocol," IEEE Transaction Communications, Vol. 39, Issue 10, 1991, pp. 1482-1493
6. Maroti Miklos, Kusy Branislav, Simon Gyula and Ledeczi Akos, "The flooding time synchronization protocol," Proceedings of the 2<sup>nd</sup> international conference on Embedded networked sensor systems, 2004, pp. 39-49
7. Elson, J. E., Girod, L., and Estrin, D. , "Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts." The Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation, 2002, pp. 147-163
8. TIA/EIA : "Electrical Characteristics of Generators and Receivers for Use in Balanced Digital Multipoint Systems", ANSI/TIA/EIA-485-A-98, 1998

(受理：2007年10月29日)

(掲載決定：2008年3月19日)

# Fine Time Synchronization System for Smart Sensor Network for Structural Health Monitoring

ISHIKAWA Ken-ichiro <sup>1)</sup> and MITA Akira <sup>2)</sup>

- 1) Research Assistant, KEIO University, Dr. Eng.
- 2) Member, Professor, KEIO University, Ph.D.

### **ABSTRACT**

Recently, structural health monitoring technologies draw keen attention for sustaining large structures. In this paper, a smart sensor network consisting of intelligent sensor nodes with an accurate time synchronization mechanism for structural health monitoring is proposed. Using a prototype system, extensive tests have been conducted to ensure its performance. The proposed sensor network could achieve high precision time synchronization. The error for the system with 190m separation was within 1.42 microseconds.

*Key Words: sensor network, smart sensor, time synchronization*