

仮想共有メモリに基づくセンサネットワーク

矢澤潤¹・三田彰²

¹ 慶應義塾大学学生 理工学部システムデザイン工学科 (〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)

² Ph.D. 慶應義塾大学助教授 理工学部システムデザイン工学科 (〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)

In this paper, the digital sensor network for a health monitoring system based on the “Virtual common memory” is proposed. Every sensor unit in the network has a memory inside itself, and all sensor units can access to all of the other memories. By using this method, the synchronized data acquisition that was the problem in conventional systems can be solved. Besides, its multidrop configuration can significantly reduce the amount of cables required. The performance, especially the synchronization of this method, was extensively examined. The result shows that this method has sufficient performance for health monitoring systems.

Key Words: Health monitoring, Digital sensor network, Real time system, Virtual common memory

1. はじめに

建築構造物の構造性能を維持し、高耐久・長寿命化を実現するためには、損傷や劣化を可能な限り早期に検出し、適切なタイミングで補修することが重要である。そこで、構造ヘルスマonitoringが注目され、国内外で盛んに研究が行われている。しかし、高層ビル、高速道路、橋やダムなどの大型構造物を対象とする場合、モニタリングシステムにおけるセンサ数やケーブル量は膨大となり、従来のアナログセンサに基づくシステムでは金銭的・時間的コストが問題となっていた。実際、モニタリングシステムの全設置時間の75%、全導入コストの25%は、ケーブルリングが占めているという報告もある¹⁾。さらに、信号の減衰やノイズの混入という問題もあり、嚴重なノイズ対策が必要とされた。

そこで、本研究では、各センサユニット内で信号をデジタル化し、センサの取得データをデジタル情報として処理するシステムを提案する。その特徴は、各センサノード共通で利用可能な仮想共有メモリを活用することであり、これは従来型のセンサやアクチュエータの引き回し及び接続の変更が容易で、かつ高い同期性能を持つ手法である。構築したシステムの特性和その課題について報告する。

2. 仮想共有メモリ

(1) 概要

本研究で使用する仮想共有メモリとは、シリアル通信回線で接続された複数のマイコン間で仮想的に同一メモリ空間をリアルタイムで共有する、リモートメモリ共有技術である。本論文で対象とする通信方式においては、シリアル通信回線の構成ハードウェア、通信速度、ノード数、ユーザインタフェースなどは規定しておらず、パケットフォーマットや、

その処理方法などの通信プロトコルのみを規定している。ネットワークの構成には、通信プロトコル処理などの機能を持ったステーション素子とマルチドロップ接続の通信回線を使用する。ネットワークを構成する同一システム上の各拠点を“ステーション”または、“局”と呼び、全ステーションがアクセスできるように共有されたメモリ空間を“グローバルメモリ”(GM)と呼ぶ。実際のGMは、各ステーションが内部にそれぞれ管理しているが、仮想的に共有されたマルチポートメモリと考えることができる。システムが稼働中のGMの内容は、通信エラーが起きていない限り、一定の遅延を許容すれば全ステーションで同一であることが保証され、リアルタイム性を持ったシステムであると言える。また、従来の通信ではマイコン間のデータ交換をする場合、ユーザ自らが大量のプログラムを開発しなければならなかったが、この通信方式を用いれば局の参入・離脱も簡易であり、データ交換の信頼性を確保するための通信管理プログラムの量は激減する。以下に概念図を示す。

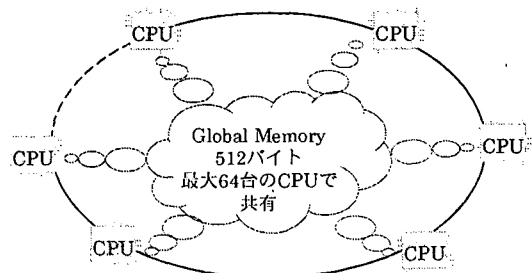


図-1 概念図

(2) メモリ共有動作

本研究で使用する LSI (ステップテクニカ社 MKY40) には、独自の時刻を刻む時計と、共有メモリの対象となる 512 バイトのメモリが搭載されている。このメモリにデータの書き込みを行う各ステーションは、同一システム上で重複しないステーションアドレス(SA)によって識別され、また、GM 内に SA に対応した始点から始まる 8 バイトずつ(変更可能)の占有エリアを持つ。この通信方式は、若い SA を持つ局から順番に行われる通信パケット送出の連続で成り立っている。

まず、時刻「0」の時に、SA.0 の局からメモリ内アドレスを指定されたデータパケットが回線上传信される。ネットワークに接続された全ての局はこのパケットを受信し、自局内のメモリの指定されたアドレスに取り込む。発言されたパケットには、発言した局の占有エリアの現在値が含まれており、このパケットを正常受信した全てのステーションは、発言局の GM 内占有エリアの値を知ることができる。直後の時刻「1」の時に、SA.1 局からメモリ内アドレスを指定されたデータパケットが送信され、同様にネットワーク上の全ての局が自局内のメモリの指定されたアドレスに取り込む。この動作を全ての局が行い常時巡回することで、各局に個別に搭載されている 512 バイト・メモリ (GM) 内部のデータは全ての局で常に同一となる。つまり、1 つの共有メモリが存在していることと同様の状況となる。この仕組みが、メモリ共有動作である。

(3) 同期性能

ネットワーク上の各局は、自局内のクロックによって独自のサイクルを刻んでおり、毎サイクルの先頭では、先頭であることを示すストロブ (STB) 信号を出している。通信が開始され、SA の一番若い局からのパケットがネットワーク上に送信されると、他の局はそれを参照して、自局内の時刻を修正する。ここで、各局の STB 信号のタイミングが合い、同時刻を同じ速さで刻む状態が維持できる。そして、各局一斉に 16 bit A/D 変換を行うわけだが、その同期性能はかなり良質である。理論上、通常の利用環境 (通信エラーが頻発しない環境) では STB 信号発生時期の最大ずれ時間 T_{max} は、

$$\begin{aligned} T_{max} &= 2T_{bps} \text{ 時間} + (1 \text{ サイクル時間} \times \text{クロック精度}) \\ &+ \text{伝送路遅延} \end{aligned} \quad (1)$$

で表すことができる。通信レートは 12, 6, 3[Mbps] の 3 段階から選択することができ、本研究では 6[Mbps]とした。このときのネットワーク長の限界は約 200[m]である。今回のシステムについて STB 信号発生時期の最大ずれ時間を計算してみると、6Mbps では、2Tbps 時間は 333.33[nsec]、一般的な水晶発振器の精度は通常 ± 100 [ppm]であり、その最大差は $+100$ [ppm]と -100 [ppm]で 200[ppm]となり、(1 サイ

クル時間 \times クロック精度) は 200.4[nsec]、そして、後述するが、本研究で構築したネットワークの範囲は 10[m]以内なので、伝送路遅延は遅いケーブルで 7 [nsec/m] \times 10[m]より 70[nsec]となる。これらより、10[m]範囲の 6[Mbps]では STB 信号の最大ずれ時間は、

$$333.33 + 200.4 + 70 \approx 600[\text{nsec}] \quad (2)$$

以内となる。各局の時間ずれがこの値以内であれば、これはシリアル通信を利用する複数局保有システムの同期性能としては世界最高水準であると言える。

3. 同期性能評価実験

(1) 実験装置

今回使用したネットワークは、3 台の計測ユニットと 1 台のモニタユニットの計 4 台を 100BASE-T ケーブルで接続することによって構成し、各ユニット間距離は 3 メートルとした。なお、ケーブルの端まで伝わった信号が反射してノイズとなってしまうことを防ぐため、ネットワークの両端には終端抵抗を接続した。また、モニタユニットには、コマンドの入力およびデータの読み出しを行うために、RS232C ケーブルでパソコンを 2 台接続した。以下に、ネットワークシステムの接続図、計測ユニット概観及び詳細を示す。

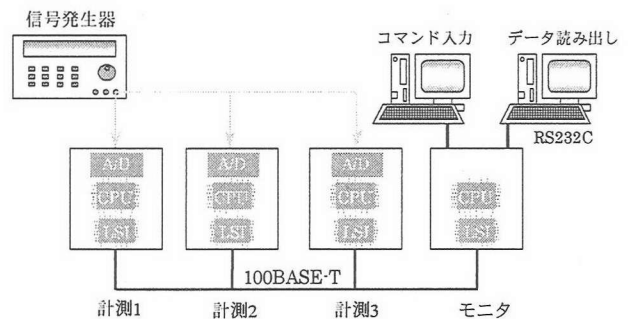


図-2 ネットワークシステム接続図

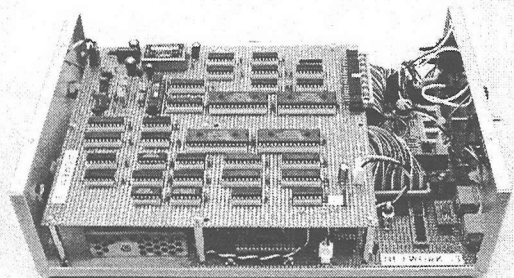


図-3 計測ユニット概観

(2) 実験方法

本実験では、3つの計測ユニットに同時に、信号発生器によって sweep sin 波を入力し、これをセンサからのデータとして測定を行った。各ユニットから得られたデータ間の時間的なずれを調べることで、システムの同期性能を評価した。尚、本研究で用いた波は全て、1~200[Hz] 間を 10[sec] で 1 往復する sweep sin 波を連続させたものである。

(3) 実験結果・考察

前述の方法で実験を行い、ユニット1のデータを入力、ユニット2, 3のデータを出力としたときの伝達関数を求めた。

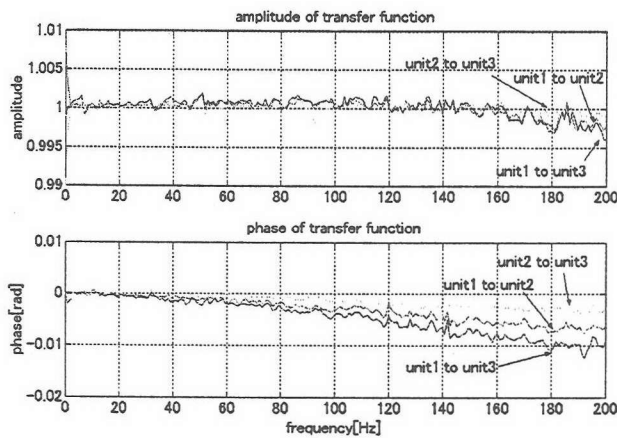


図-4 ユニット間伝達関数

もし、各ユニット間で完全に同期がとれていれば、この伝達関数のグラフのうち振幅は1、位相は0の位置でフラットになるはずである。しかしこの図から、ユニット間の伝達関数は周波数が高くなるにつれて、振幅、位相ともに僅かだが遅れていることがわかる。この伝達関数の位相差のグラフ横軸を frequency[Hz] から ω [rad/s] に変換してプロットしなおし、それを線形近似し、傾きを求めた。図-5に結果を示す。この傾きは、秒単位の時間遅れを表す。これらのグラフより、時間遅れはユニット1, 2間で約5 [μ sec]、ユニット1, 3間で約8 [μ sec]、ユニット2, 3間で約3 [μ sec]となることがわかった。

次に、これらの遅れはネットワーク上の接続順に依存するものなのか、それともユニット固有のものなのか、ということを検証するため、ユニット接続順を入れ替えて先の実験と同様の測定を行った。どの接続順においても上記の結果とほぼ同様となり、接続順には依存しないことがわかった。よって、ユニット間の時間遅れは各ユニットが特性として持っている固有のものであり、その原因としては、同期をとるための合図となるストロブ信号が、そもそもずれているということ、もしくは、ユニット内のフィルタの特性によるものであるということが想定された。

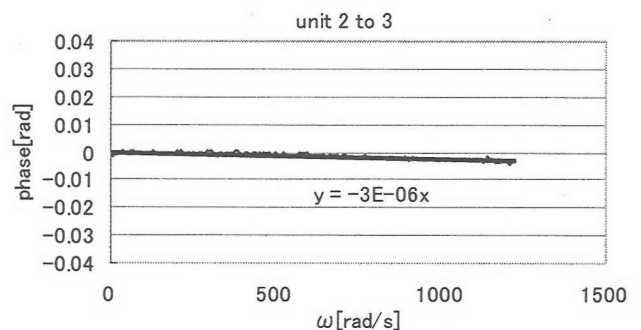
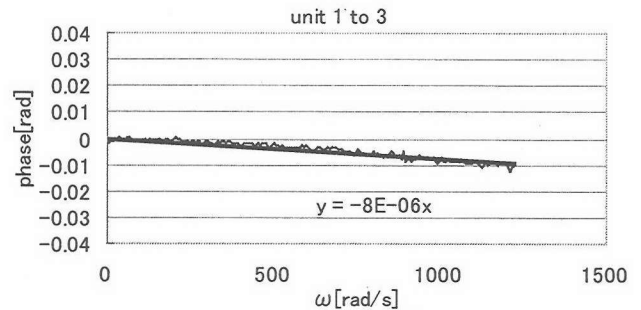
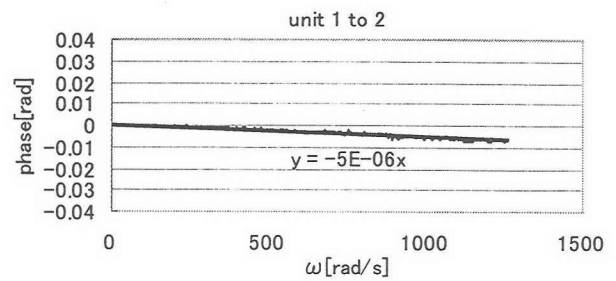


図-5 線形近似結果

そこで、まず、各ユニット内の LSI から出ている、同期のタイミングを合わせるための合図となるストロブ (STB) 信号が、特性としてどのくらいのずれを持っているのかをオシロスコープを用いて測定した。その結果を以下に示す。

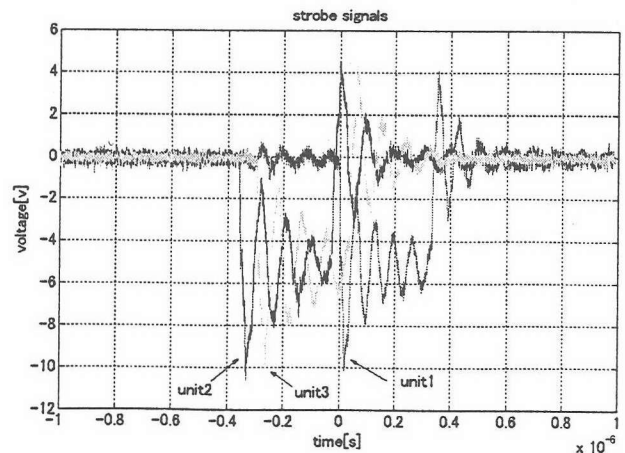


図-6 STB 信号のずれ

上図は、ある瞬間のデータをプロットしたものであり、STB 信号には変動があるため、実際には各ユ

ニットの STB 信号の相対的な時間差は一定ではない。今回の測定では最大で約 350[ns]のずれが観測できた。しかし、この値は、前述の実験によって得られた 3~5[μ sec]の十分の一程度であり、位相遅れの原因はこの STB 信号のずれだけではないことが了解される。そこで、フィルタの特性を検証してみることにした。

本研究で使用した各計測ユニットは、A/D 変換の手前に、カットオフ周波数（以下、fc）が約 200[Hz]の二次バターワース形のローパスフィルタを使用している。前述の遅れは、このフィルタの影響である可能性が考えられる。fc においては、理想値で振幅が $1/\sqrt{2}$ となり、位相が $\pi/2$ 遅れる。しかし、使用した部品の許容誤差は $\pm 1\%$ であり、その状態で製造された装置の fc は、 $\pm 2\sim 3\%$ の許容値を持つ。つまり、同じ回路のフィルタを製造しても、 $\pm 2\sim 3\%$ 以内の誤差が発生することになる。今回のデータの周波数 200[Hz]の周期は 5[msec]であり、先の実験で得た 3~8[μ sec]という値は、5[msec]の 0.06~0.16% に当たる。つまり、十分にフィルタの許容誤差の範囲内であり、これがそのままユニット間のずれの原因となっているということが考えられる。

ここで、MATLAB を用いて、二次バターワースフィルタの fc の違いによって伝達関数はどのように変化するか、シミュレーションを行った。まず、他の実験と同様の 1~200[Hz] sweep sin 波を生成した。そして次に、fc を 200~201[Hz]間で 0.1[Hz]刻みに変化させたフィルタを生成、それぞれを sweep sin 波にかけた。その後、各フィルタ通過後の信号間の伝達関数を求め、ずれを実験データと比較した。その結果を以下の図に示す。

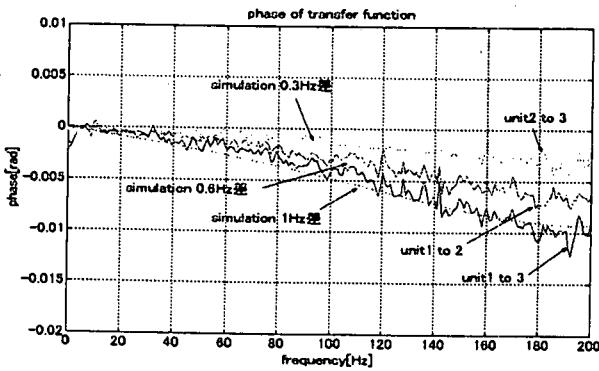


図-7 シミュレーション結果と実験データの比較

上図のように、実験で得られたデータはそれぞれ、シミュレーション結果のうちカットオフ周波数が 0.3Hz 差、0.6Hz 差、1Hz 差のものと同様に挙動がほぼ一致している。この結果から、ユニット間の位相遅れは、フィルタの fc のずれが原因であると考えてほぼ間違いのないと言える。

そこで、フィルタをバイパスした状態で測定を行った。図 8 にその結果を示す。これらの図から明らかのように、フィルタをバイパスした状態にすると、フィルタ有効時には周波数が高くなるにつれて大き

くなっていた遅れは無くなり、ゲイン・位相ともにフラットになるということがわかった。そして、前述の実験と同様に線形近似を行った結果、ユニット間の時間ずれはそれぞれ、30[nsec]、70[nsec]、30[nsec]とフィルタ有効時の約 1/100 となることがわかった。

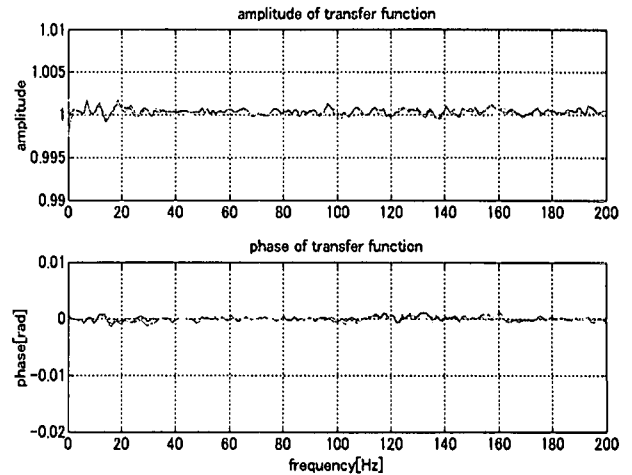


図-8 フィルタバイパス時のユニット間伝達関数

4. まとめ

本研究では、仮想共有メモリという手法を用いたデジタルセンサネットワークを提案し、その同期性能についての検討を行った。本手法によって構築したネットワークにおいては、4 局 10[m]範囲での各センサユニット間の時間的なずれは数十[nsec]以内となることを示した。従って、基本的には実用上十分な同期性能を持つ手法と言える。今後、より実際に近い形での測定を行い、大型構造物のモニタリングシステムに適用した際の諸問題について検討を加えることにより、実用化は達成されると考える。

謝辞

本研究を行うにあたり、実験装置の製作および、実験に関して数多くの有益な助言、様々なご指摘を頂きました。(株)東京測振の石野正志氏に、心より御礼申し上げます。また、(株)ステップテクニカの麦谷富浩氏には、ネットワークについて幾度となく適切な助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Straser, E.G. and Kiremidjian, A.S. "A modular, wireless damage monitoring system for structures." Report No.128, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA. 1998. B.Chen, M.Su and Y.Du. "Design of Digital Sensor Network" 2002.
- 2) A.Chu, F.Gen-Kuong and B.Swanson "Smart Sensors and Network Sensor Systems" 2002. Steptechnica Inc., "CUnet user's manual", 2001.
- 3) Steptechnica Inc., "Let's try CUnet!", 2001.