



構造ヘルスモニタリング用ワイヤレスセンサに関する研究

長井望¹⁾、三田彰²⁾、矢向高弘³⁾、佐藤忠信⁴⁾

1) 正会員 慶應義塾大学大学院理工学研究科、大学院生

e-mail : nnozomu@2001.jukuin.keio.ac.jp

2) 正会員 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科、助教授 Ph. D.

e-mail : mita@sd.keio.ac.jp

3) 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科、専任講師 工博

e-mail : yakoh@sd.keio.ac.jp

4) 正会員 京都大学防災研究所、教授 工博

e-mail : sato@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

要約

建築・土木構造物の損傷リスクの定量化を実現する手法として、構造ヘルスモニタリングが注目されている。しかしながら、ワイヤ敷設に費やすコストが大型構造物へモニタリングシステムを導入する障壁となっていた。本研究では、ワイヤ敷設コスト削減のため、TCP/IP と無線通信を用いたワイヤレスセンサネットワークシステムを提案し、その理論解析、プロトタイプ製作、評価試験を行った。こうした検討の結果、本論文で提案したセンサネットワークは、目標として設定した性能を満足し、ワイヤ敷設コストと、敷設に要する時間を大幅に削減することが可能で、かつリアルタイムな損傷検知に必要とされる高い同期性能を確保できることが確認された。

キーワード : 構造ヘルスモニタリング、センサネットワーク、ワイヤレス、時刻同期

1. はじめに

建築・土木構造物へ構造ヘルスモニタリングシステムを適用する場合、地震動や風荷重など、環境からの外乱に対する構造物の応答を計測するために、多点での計測が可能なセンサシステムが必要である。強震動の計測は数多く行われ、構造物の性能確認や現象把握に活用されてきたが、コストの問題から新たな設置は減少している。しかし、健全性診断や劣化予測のために、長期間に渡って構造物の応答を取得する構造ヘルスモニタリングシステムへの期待が高まり、センサシステムの低価格化および導入時間の低減が実現されれば、広く普及していくものと予測されている。構造物の損傷同定、損傷検知に関する信号処理技術の発展は近年著しく、ハードウェアであるセンサとソフトウェアである信号処理技術の融合により、インフラストラクチャのメンテナンスの効率化が期待されている。これにより、現在のスケジュールベースのメンテナンスから、より合理的なコンディションベースのメンテナンスへのパラダイムシフトが期待できる。しかしながら、

現在使用されているような有線で構成されるセンサシステム（図 1）では、センサシステムのケーブリングコストが構造ヘルスマニタリングシステムを実構造物へ適用する際の大きな障害になっている。

たとえば、1997年に完成した香港にある Tsing Ma Bridge（青馬大橋）への構造ヘルスマニタリングシステムの導入コストは1センサチャンネル当たり\$27,000以上であることが報告されている1)。また、構造ヘルスマニタリングシステム導入時間の約75%が対象構造物にセンサデータの伝送路であるワイヤを敷設する作業にかかる時間であり、全モニタリングシステム費用の約25%がワイヤリングの費用だという報告がある。たとえば、カリフォルニア州交通局の報告では、60 から 90 の加速度センサで構成される計測システムをひとつの橋梁に導入するのに約\$300,000の費用がかかり、そのうち橋梁の過酷な環境からワイヤを守るために1フィートあたり\$10の費用がかかったとしている3)。しかも、ワイヤ敷設が困難である場合や、モニタリングシステムを構成するセンサユニットの取り扱いが難しい場合は、導入コストはさらに上昇する。このように、構造ヘルスマニタリングシステム導入の高コスト要因の一つは、データ収集サーバへ取得したセンサデータを送信するために必要なワイヤ敷設である。

また、ワイヤレス化によって、ワイヤリングの計画の煩雑さの回避と、実作業の時間の削減が可能である。そして、永久的に設置するのではなく、既存の建物の耐震診断などのように、計測システムを仮設するような場合には自由度が高く、有線とくらべて格段に有利となる。さらに、例えば毎日人が多く行きかうため、敷設工事時間を十分に取れない構造物では、ワイヤレスの分布型計測は大きな利点と成り得る。

一方、既存の建築構造物では、LAN 設備に相当数の TCP/IP ポートがあり、それを利用して有線でセンサネットワークを構築できるとの考えもあるが、実際にはビル全体を一体したネットワーク管理は現実的ではない。なぜなら、通常、部署、フロア毎にネットワークへのアクセスに権限が求められており、そのために計測が極めて煩雑になるからである。また、通常ビル内では複数のルータを介しており、データの同期性能が著しく劣化してしまうといった問題も生じる。

したがって、ワイヤリングの制約から解放し、図2のようなワイヤレスシステムとすることで、ワイヤリングコスト低減化、ワイヤリングの計画の煩雑さの回避、実作業の時間の削減などを目的とした、ワイヤレスセンサネットワークに関する研究が行われている。

Jerome P. Lynch らは一連の論文 4) 5) 6) において、ワイヤレスセンサシステムの概念設計、ハードウェア設計、ソフトウェア設計、研究室での基礎実験、実構造物への適用実験を報告している。この研究におけるワイヤレスセンサシステムは加速度計、AD コンバータ、RISC マイクロプロセッサ、ワイヤレスモデムから構成されている。H. O. Marcy らは、論文 7) において地域全体と移動車両のヘルスマニタリングを目的にワイヤレスセンサネットワークシステムを提案し、開発している。センサとして、加速度センサが用意されており、48kHz でサンプリングできる。E. Ihler らは、論文 8) において、クラックなどのローカルな損傷をモニタリングするため、バッテリーを無くして電力をワイヤレスで供給するピエゾセンサシステムを提案している。J. Lemke らは論文 9) において、ワイヤレスアクセスとインターネットを介した遠隔での振動モニタリングシステムを提案している。この論文で述べられているワイヤレスアクセス方式は携帯電話のデータ転送モデム機能を利用している。K. Mitchell らは論文 10) において、WEB で制御できるワイヤレスセンサネットワークシステムを提案している。このシステムは HTML を用いて、遠隔からセンサデータへのアクセスとその操作を簡単に行えるようにしているもので、静的な計測が目的である。V. Ravindran らは論文 11) でワイヤレスアクセス方式としてブルートゥースを用いた温度センサネットワークを実装している。

以上、ワイヤレスセンサネットワークの構造ヘルスマニタリングへの適用研究事例は多いが、加速度データのような短いサンプリング周期（10msec 以下）のデータを、センサ内にストアすることなく逐一データ収集ホストへ転送することでリアルタイムな損傷検知が可能なワイヤレスセンサシステムに関する研究はほとんど存在していない。

そこで本論文ではコンピュータネットワーク標準プロトコルとして普及が進んだ TCP/IP プロトコルを用いたネットワーク技術と、近年接続の容易性から普及がすすむ無線技術を用いて、建築・土木構造物を対象としたワイヤレスセンサネットワークを提案し、その検討を行う。構造ヘルスマニタリングシステムを実構造物に対して、より低コストかつより短時間に導入することを可能とさせることを目指している。

主な固有振動数が 50Hz 以下である建築・土木構造物を適用対象として想定し、ワイヤレスセンサシステムの性能に対する目標を以下のように設定した。

- ①センサ間時刻同期誤差は 2msec 以下 (50Hz 以下の成分の精度を確保)
- ②センサの最大サンプリング周波数は 1kHz
- ③センサ数の増減に対して、容易に対応できる拡張性を有すること
- ④センサによるデータ取得から収録ホストに入力するまでの転送遅延が 20msec 以下で予測可能であること

①、②に関しては、50Hz 以下の成分の精度を確保するために、センサ間時刻同期誤差を 2msec 以下とし、同定の精度を十分に保障するためにセンサのサンプリング周波数を 1kHz とした。また、同定モデルの最小更新周期は 100Hz でも十分であることから、転送遅延の増大を考慮し、本研究で開発のセンサユニットは、データ転送周期を 100Hz にしている。

③、④に関しては、構造ヘルスモニタリングがワイヤレスアクセスにメディアアクセス方式として求める性能から決定した。その性能とは、

- ・センサの同期を実現できること
- ・センサデータの遅延時間が予測可能であること

である。構造ヘルスモニタリングの主な目的は、構造物の損傷同定であり、構造物の損傷同定では構造物の加速度応答など時刻歴データが必要である。同定対象物に取り付けられた各センサのデータの時刻が異なっている場合、多点入出力のシステムとして同定することができなくなってしまう。この観点において、センサの時刻同期性は構造ヘルスモニタリングにおいて必要条件であるといえる。

また、取得したセンサデータの遅延時間の予測可能性には二つの解釈がある。遅延時間最大値の確定的な予測可能性と、遅延時間最大値の非確定的な予測可能性である。リアルタイム制御の分野では、前者をハードリアルタイム性、後者をソフトリアルタイム性と呼ぶ。構造ヘルスモニタリングにおいては、その目的が構造物の損傷同定である場合、同定モデルの更新サイクルの時間制約はソフト的な制約で十分であるため、ハードリアルタイム性は要求されないとの考えもあるが、本研究では同定モデルの更新サイクルの遅れを確定的に 20msec 以下とすることを目標とした。

本研究では、まず拡張性と経済性の両立を確保するため無線 LAN を用いたシステムを想定し、設定した要求性能の実現可能性を理論的に検討する。次にワイヤレスセンサネットワークのプロトタイプを構築し、初期目標性能を実現可能かどうか検証する。

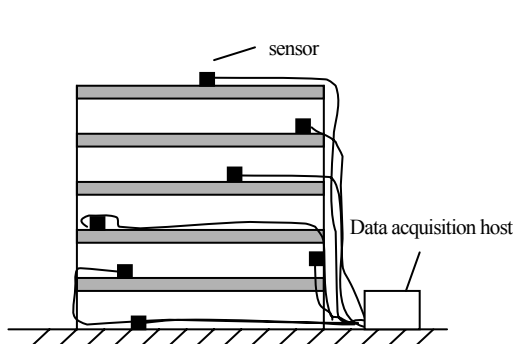


図 1 Conventional sensor network

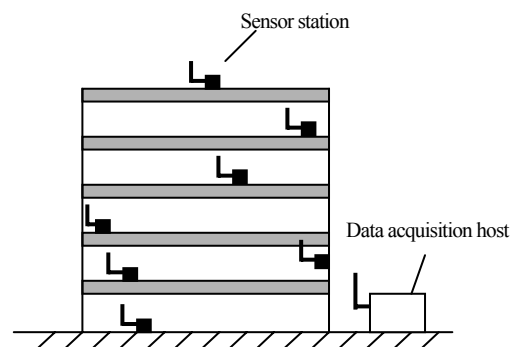


図 2 Proposed wireless sensor network

2. ワイヤレスアクセスの方法とその性能

2.1 ワイヤレスアクセスの種類と構造ヘルスモニタリングの要求特性

許可を得ることなしに利用できるワイヤレスアクセス方式には、多くの種類が存在する。表 1 に種々のアクセス方式とその使用周波数帯を示す。

表 1 Wireless access system and frequency band

Wireless access system	Multiple access method - Duplex method	Frequency band
PHS	TDMA - TDD	1.9GHz
PDC	TDMA - FDD	800MHz, 1.5GHz
W-CDMA	CDMA - FDD	2GHz, etc
Wireless LAN IEEE802.11	CSMA/CA - TDD (MAC)	2.4GHz, 5GHz
FWA	Depend on frequency band	1.9, 2.4, 22, 26, 38, 60GHz, Optical
Bluetooth	TDMA - TDD	2.4GHz
Wireless IEEE1394	Isochronous, Asynchronous	5GHz, 60GHz

ワイヤレスアクセスには大別して二つのアクセス形態が存在する。各ワイヤレスノードの役割がアクセスポイント（以下 AP: Access Point）とステーション（以下 STA: Station）が固定されているインフラストラクチャ形態と、その区別がなくいずれのワイヤレスノードも AP や STA になることができるアドホック形態の二つである。インフラストラクチャ形態は AP を介してすべての通信を行う通信形態である。したがって AP を介さず STA だけによる通信を行えない。つまりインフラストラクチャモードでは、AP からの電波到達半径がワイヤレスネットワークの構成範囲になる。一方アドホック形態ではどのノードとも通信ができ、電波の電力範囲が狭い場合においても近隣のワイヤレスノードを介すことによって、電波到達半径外のノードとも通信が可能となる。歴史的に AP を介したインフラストラクチャ形態がワイヤレスアクセスとして普及してきた。そのためアドホック形態を実現できるワイヤレスアクセス方式はまだ少ないのが現状である。アドホック形態は携帯電話網のような巨大なワイヤレスシステムではなく数メートルから数百メートル範囲での狭い範囲でのワイヤレスネットワークをアドホックに構築する通信方式として開発されている。表 1 の中においてアドホック形態を構成できるワイヤレスアクセス方式は、一部の無線 LAN, Bluetooth, ワイヤレス IEEE1394 である。図 3、図 4 にインフラストラクチャ形態、アドホック形態の概念図をそれぞれ示す。

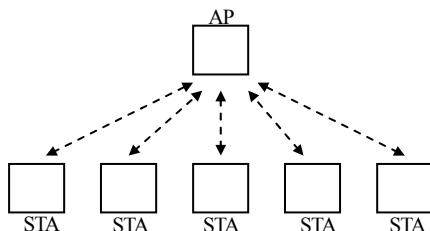


図 3 Infrastructure mode

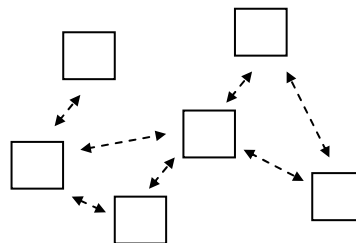


図 4 Ad-hoc mode

以上が一般的なワイヤレスアクセスの方式である。構造ヘルスモニタリングでは、複数のセンサからのデータを最終的には一箇所に収集して処理する場合と、ローカルにデータを処理する場合があるが、本論文では、例として図 3 のようなインフラストラクチャ形態を選択している。

2.2 無線 LAN を利用した場合のワイヤレスセンサネットワークのビット誤り率と転送遅延の理論解析

無線 LAN は、現在のイーサネットによる LAN をそのまま無線化することを目的に開発された。従って既存 LAN との接続が容易で、急速に普及が進んでおり低価格化が著しい。最も一般的に普及している 2.4GHz 帯を用いた IEEE802.11b では最高で 11Mbps の通信帯域がある。他には、最高で 54Mbps の物理帯域である IEEE802.11a があり、指定された遅延時間を保証するリアルタイムサービス提供を実現する IEEE802.11e などの開発が進められている。帯域の拡大とリアルタイム性のサポートの充実を期待できるという観点より、本研究ではワイヤレスアクセスとして無線 LAN を使用する。

また、802.11b 無線 LAN では異なる周波数 11 チャンネルを使用しており、うち 4 チャンネルを同時に使用して

も互いに干渉せずに使用することができる。そのため、既に無線 LAN が設置されている場所では、既存無線 LAN の周波数帯と異なるチャンネルをヘルスマonitoring用チャンネルとして設定することで、互いの混信を回避することができる。

ワイヤレスセンサネットワーク内で送受信されるセンサデータは、周辺環境の雑音電力によって取得データの送受信時にデータのビット誤りが発生する。ワイヤレスアクセスではパケット内にビット誤りを検知すると送信元のセンサに同じデータの再送を要求する。従って、エラーが頻発するような高雑音環境下におけるセンサネットワークの実現可能性を検討する必要がある。そこで本解析では、市街地での平均雑音として -80dB 、工場などの高雑音環境として -70dB の二つの雑音電力を想定 (文献 14)) し、センサネットワーク半径とパケット誤り率 (Pp) およびその平均値 (Pave) を文献 12) 13) より、式 (1) に基づいて計算した。なお式 (1) の積分内部がパケット誤り率 (Pp) に相当する。

$$P_{ave} = \frac{1}{\pi r^2} \int_0^r \left[1 - \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi(W_R - N_0)}} \exp(-(W_R - N_0)/4) \right\}^{L_p} \right] 2\pi r dr \quad (1)$$

ここで W_R は受信電力、 N_0 は雑音電力、 r はセンサネットワークの半径である。 W_R は、伝送方程式 (2) から求められる。

$$W_R[\text{dBm}] = W_T[\text{dBm}] - L_{CT}[\text{dB}] + G_{AT}[\text{dB}] - L_A[\text{dB}] + G_{AR}[\text{dB}] - L_{CR}[\text{dB}] \quad (2)$$

ここで、 W_T は送信電力、 L_{CT} は送信側の給電線損失、 G_{AT} は送信側のアンテナ利得、 L_A は空間損失、 G_{AR} は受信側のアンテナ利得、 L_{CR} は受信側の給電線損失である。また簡単のため、変調方式を 2 値のオンオフキーイング (ASK) で同期検波方式とした。図 5 にその結果を示す。これによって理論的には -70dB の様な高雑音電力環境下でも 100m 以内のネットワーク半径であれば、 10^{-5} 以下のパケット誤り率を実現可能であることを確認できた。なお、IP 電話回線の最高品質の PER 推奨値が 10^{-5} である。

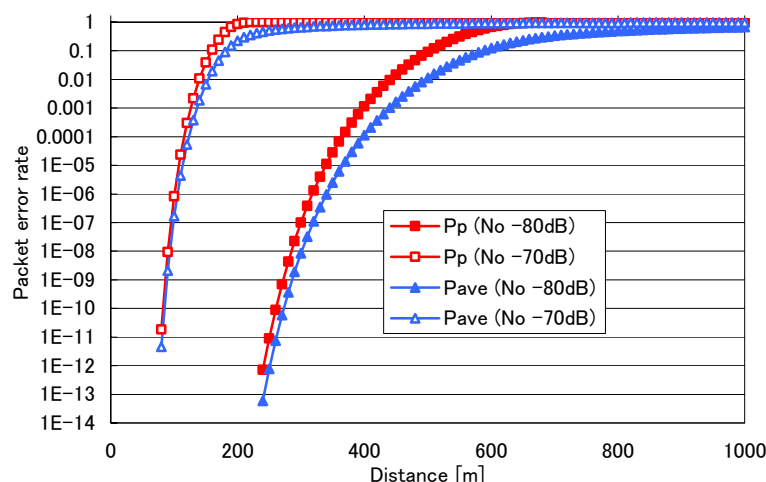


図 5 Packet error rate with respect to distance

無線通信では搬送波の有無を検出するキャリアセンス(CS : carrier sense)が存在する。キャリアが存在している場合、他のステーションがパケットの伝送を行っていることを意味する。無線 LAN では、このキャリアセンスを用いた多元接続方式である CSMA(carrier sense multiple access)が用いられる。これは、各ステーションがキャリアを検知し、その時点でキャリアが存在していれば、ビジーとみなし、衝突を避けるために送信を控える。逆にキャリアが存在していなければ、送信を試みるという多元接続方式である。しかしながら、フレームが転送される際には伝搬遅延時間が存在するため、完全に衝突を防ぐことはできない。しかも無線アクセスではこの衝突を送信側で直接検知することができず、送信先からの受信不完全 (NACK) であった (もしくは受信完了 ACK した) というパケットの受信によって検知する。したがって、なんらかの方法で

衝突を回避する必要がある、この方式を CSMA/CA (carrier sense multiple access with collision avoidance) と呼ぶ。なお、以下の解析では特に断りのない限り、搬送波の測定にかかる時間は無視できるとし、パケットの伝搬遅延時間を一定として、送信パケット時間（パケットサイズを回線速度で割ったもの）に対して十分小さいとする。また、パケット発生はポアソン分布に従い、受信通知（ACK, NACK）パケットのパケット誤り率を 0 と仮定する。

解析条件として、ステーションがキャリアセンスし、チャネルがビジーであった場合を考える。その後、キャリアセンスをし続け、ビジーからアイドルになった瞬間に必ず送信を試みる方式を 1-persistent CSMA という。本論文では簡単のため、1-persistent CSMA の場合を想定し議論する。1-persistent CSMA を理想的な回線において用いた場合のスループット S は、パケット誤り率を考慮すると、文献 15) により、

$$S = \frac{G(1+G)e^{-G}}{G+e^{-G}} \cdot (1-P_{ave}) \quad (3)$$

となる。一方、供給トラフィック G は、

$$G = \frac{\left\{ (r_{sensor} \cdot n_{sensor}) \times \frac{T_{send}}{T_{sensor}} + L_{head} \right\} \times \frac{n_{STA}}{T_{send}}}{R} \quad (4)$$

と求められる。

次にパケットが発生してから、誤り無く相手に受信されるまでの平均遅延時間 d について考察する。図 6 はパケット発生と、キャリアセンス、それに伴うビジー状態と遅延を表したものである。横軸は時間の経過を表し、上段が STA、下段が AP の時間的な状態推移である。また図中の横軸の時間はパケット一つあたりの送信時間で正規化している。STA、AP のそれぞれのキャリアセンスによってチャネルがビジーと分かり、送信が一回延期されることによる遅延を d_1 とし、送信が失敗し再送するのに要する遅延を d_2 とすると、図 6 より、

$$d_1 = \overline{t_w} \quad (5)$$

$$d_2 = 1 + 2t_e + SIFS + t_a + \overline{t_w} \quad (6)$$

となる。ここで、 t_w を送信待ち時間、 t_e を伝搬遅延時間、 t_a を ACK の伝送時間、 $SIFS$ を ACK 送信前の待ち時間とした。なお、使用している時間を表す数はすべて 1 パケットの送信時間に正規化している。すなわち、式 (6) の 1 はパケット長を回線速度で割った時間を表現していることになる。衝突なしに受信されたパケットあたりの平均再送回数は N は、

$$N = \frac{G-S}{S} \quad (7)$$

と表現できる。以上より平均遅延時間 d は、

$$d = d_1 + d_2 N + t_e + 1 + SIFS + t_e + t_a \quad (8)$$

となる。 t_w の平均値である $\overline{t_w}$ の許容可能な最小値を解析的に求めることは困難であり、その評価にシミュレーションが用いられている。本論文では IEEE802.11b の使用を考慮し、IEEE802.11b 仕様書 16) を参考に各値を表 2 のように設定した。1 センサユニットあたりのセンサ数（チャネル数） n_{sensor} を 8、センサデータの分解能 r_{sensor} を 16bit、センサユニットから送信され無線化する際に付加されるヘッダ長 L_{head} を 118byte、センサのサンプリング周期 T_{sensor} を 10msec、センサユニットから収録ホスト AP に送信する送信周期 T_{send} を 10msec、無線チャネルの回線速度 R を 11Mbps とした。雑音電力を -80dB、セル半径（AP から最も遠いセンサユニットまでの距離）を 10m、200m、400m、600m、800m、1000m とした場合の 1 セルあたりのセンサユニット数 n_{STA} に対するスループットの計算結果を図 7 に示す。なお図 7 の縦軸のスループットは回線速度 R で正規化してある。また、雑音電力を -80dB、セル半径を 400m、600m、800m、1000m とした場合の、センサユニット数に応じた遅延時間の計算結果を図 8 に示す。8 チャンネルのセンサユニット数が 100 程度の場合

合、遅延は 1msec 以下にできることがわかる。

以上の計算は理想的な直線見通し内での計算であり、実構造物を考慮するとそのような条件は考えにくい。しかしながら、例えば電波減衰の大きい部分では AP を複数用意し、有線で AP 間同士を接続して複数のセルを作成するなどの対応ができる。このように、状況に応じてセンサシステムを変更しやすいことも無線 LAN の利点である。

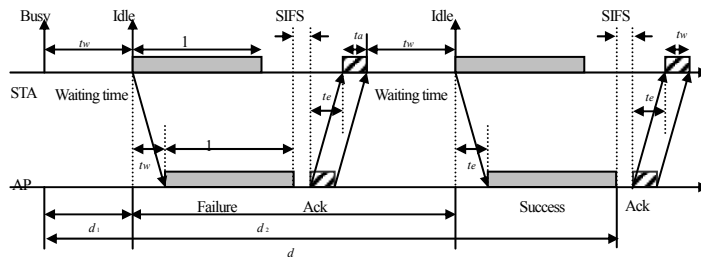


図 6 Packet transmission and delay

表 2 Delay parameter of DSSS PHY

t_w (DIFS)	50 μ sec
	(DIFS=SHIFS+2*SLOTTIME)
SIFS	10 μ sec
ACK size	14byte
Air propagation delay	1 μ sec

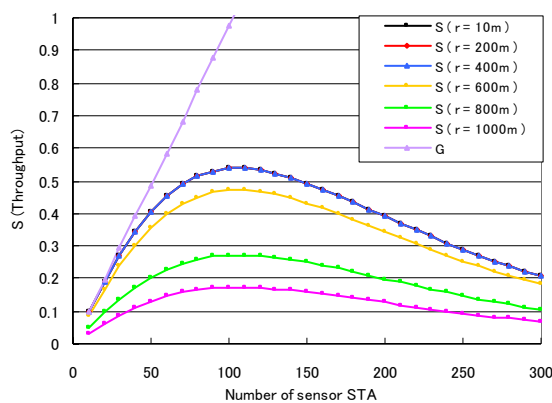


図 7 Throughput analysis

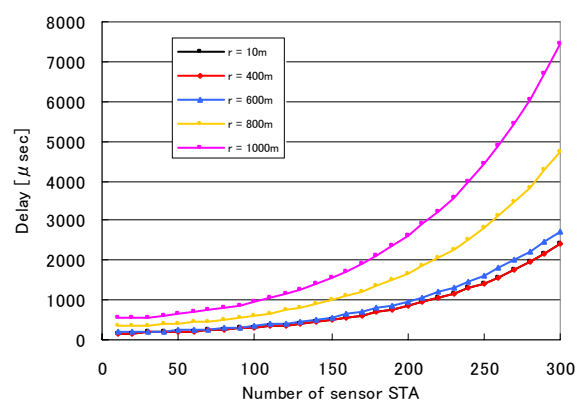


図 8 Delay of sensor network

3. ワイヤレスセンサのプロトタイプの構築と実験的評価

3.1 ワイヤレスセンサの構成

前節におけるワイヤレスセンサネットワークの理論解析により、その実現可能性を確認した。そこで、前節で設定したセンサの分解能、センサユニットあたりのセンサ数、センサのサンプリングタイムと送信時間周期を用いて、センサユニットを設計し、実装した。センサユニットの外観を図 9 に示す。

センサユニットはセンサからのアナログデータを 1kHz でサンプリングし、デジタルに変換して、10 サンプル毎にデータ送信を行う。データのワイヤレス化は日本無線株式会社製の IEEE802.11b ユニットである JRL-600 および JRL-610 を用いた。JRL-600 をセンサユニット側の無線ユニットとして、JRL-610 を収録ホスト側の無線ユニットとして使用した。JRL-600 有線インターフェイスとして、イーサネットを採用しており、ワイヤレスセンサユニットとは、10Base-T で接続する。一方 JRL-610 は有線インターフェイスが 100Base-TX に対応しており、収録ホストとは 100Base-TX で接続する。また、センサユニット、STA、AP、センサ収録ホストからなる、本論文で提案するセンサネットワークを図 10 に示す。

本研究において設計、実装したセンサユニットは A/D コンバータ、FIFO メモリ、イーサネットコントローラチップ、CPU、1MHz 水晶発信器などから構成されている。センサは物理量を電圧値としてステーションに入力するが、それをサンプリングし、デジタル化を行うのは A/D コンバータである。この A/D コンバータのサンプリング間隔を規定するのが水晶発信器であり、A/D コンバータへは水晶発信器の同期の 1000 倍、すなわち 1kHz クロックが入力される。ユニットが送信可能状態になってから、クロックに従って CPU に割り込みが入ると、CPU は FIFO メモリに存在しているセンサデータをイーサネットのデータとして送信すべ

く、イーサネットコントローラに送信処理を行わせる。本センサユニットは、各ユニットごとに差動 8ch のセンサ入力が可能となっている。イーサネットコントローラで作られたパケットは無線ユニットに受信され、無線化されてデータ収集ホストへ送信される。パケットは、この無線ユニットで受信されるとイーサネットパケットとして、データ収集ホストへイーサネットインターフェイスカードを通して送信される。本ワイヤレスセンサネットワークの特徴は、コンピュータネットワークとして最も普及してコストが安いイーサネット機器、また市販の無線 LAN 機器を用いている点である。このため、PC との接続が容易であり、センサユニット部のみの製作でワイヤレスセンサネットワークの構築が可能というメリットがある。



図 9 Sensor unit and STA

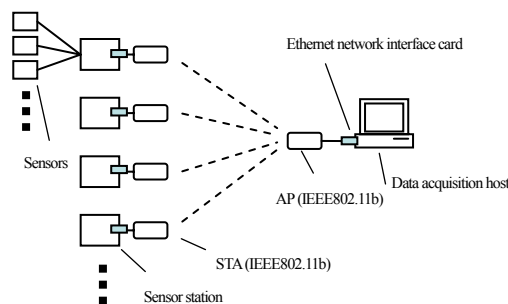


図 10 Configuration of proposed wireless sensor network

3.2 同期精度の評価試験

センサ間の時刻同期を確保するために、本センサネットワークでは、データ取得作業前にデータ収録ホストから各センサユニットへ同期用ブロードキャストパケットを送信している。各センサユニットは時刻同期用のブロードキャスト信号を受信し、その時刻を 0 としてセンサ内部のタイムカウンタを開始させる。それ以降の計測のタイミングはセンサユニット内部の水晶発信器に従う。従って、水晶発信器の固体間誤差を無視すると、センサユニット間での同期精度を測定するためには、ブロードキャスト信号がセンサユニットへ到着する時刻の時間差をとればよい。

図 11 にブロードキャスト信号の到着時間差測定試験の状況を示す。無線ユニット AP に PC-UNIX をイーサネットで接続し、STA にはセンサユニットを接続した。STA とセンサユニット間のイーサネットケーブルの被覆をそれぞれ剥がして分岐させ、オシロスコープに入力させた。PC-UNIX からは UDP プロトコルで各センサユニットへブロードキャストパケットを送信し、オシロスコープで計測して観測した。拡大したレンジのオシロスコープ測定画面を図 12 に示した。

また、センサユニット内部のカウンタは前述したように、ブロードキャストパケットの受信時にリセットされ、開始される。そこでその開始時間差を、ブロードキャストパケット受信後のカウンタピンの信号をオシロスコープで測定することにより測定した。オシロスコープの測定結果画面例を図 13 に示す。4 つのブロードキャストパケット到着時刻の最大誤差と、ブロードキャストパケットを受信してから、受信カウンタピンが立ち上がる時刻の時間差の最大値を 100 回測定し、その結果をヒストグラムにした。それぞれ図 14、図 15 に示した。

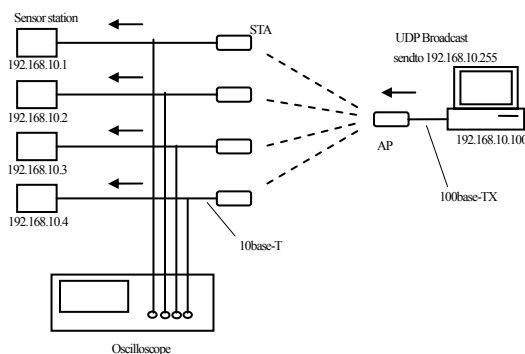


図 11 Experimental setup of synchronous characteristic of sensors

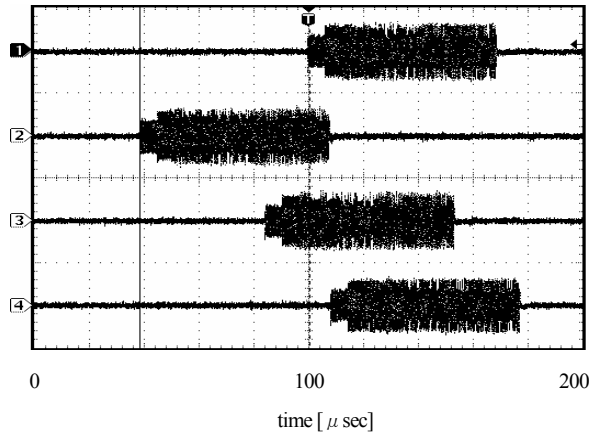


図 12 到着 of broadcast packet

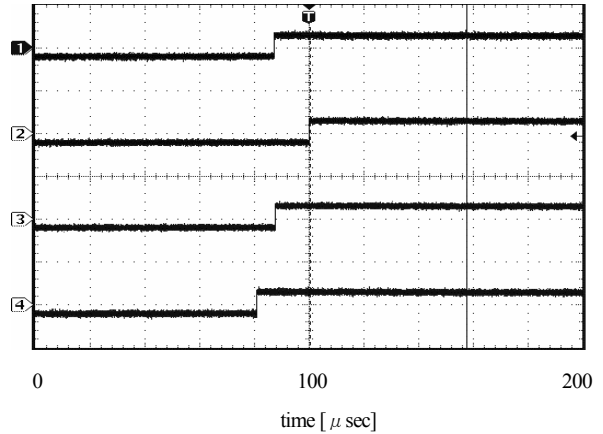


図 13 Time difference of counter start time

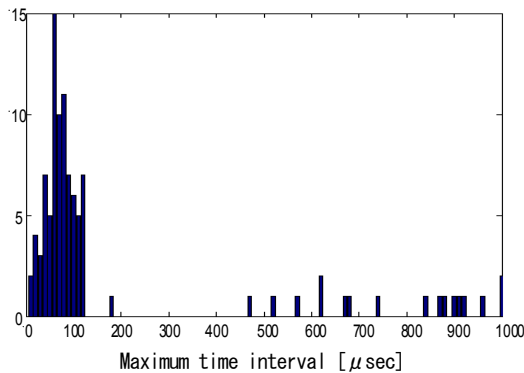


図 14 Histogram of max arrival time interval of broadcast packet

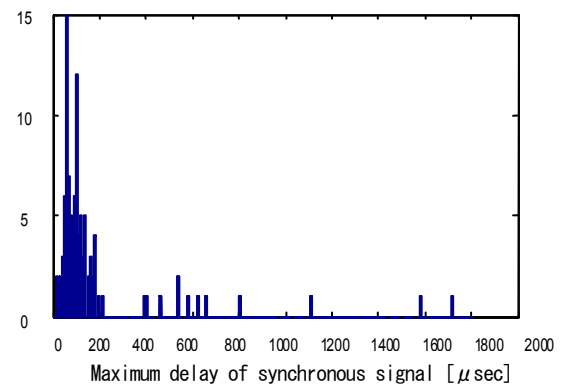


図 15 Histogram of max difference of synchronous

3.3 送信遅延時間の評価試験

センサネットワークの遅延時間を測定するため3つに遅延時間を切り分ける。所望の遅延時間を T_{system} とすると次のように書ける。

$$T_{sys} = T_w + T_s \quad (9)$$

ここで、 T_s はセンサから信号がセンサユニットに入力され A/D 変換後データがユニットから出力されるまでの時間である。 T_w は有線を通してワイヤレスユニットにデータが入力されワイヤレスネットワークを経てそのデータがまた有線の信号で出力されてデータホストに入力されるまでの時間である。

まず、 T_s を測定した。 T_s はセンサユニットのハードウェア設計に依存する。本研究において設計、実装したセンサユニットでは、水晶発信器の波形の立ち上がり時刻と、イーサネットケーブルへの出力データの立ち上がり時刻の時間差を計測することで、ユニットの遅延時間 T_s を計測できる。水晶発信器の発振の ON/OFF を簡便に行うため、調整可能な外部発信器を用いて水晶発信器波形を模擬した。外部発信器を用いて、水晶発信器のような振幅 5V、振動数 1.000MHz の波形を作成し任意のタイミングでセンサユニットへ入力できるようにした。同時に発信器からの出力信号を、オシロスコープにも入力した。センサユニットからの出力信号は、IEEE802.11b 無線ユニットへイーサネットで転送されるが、そのイーサネットケーブルの被覆を剥ぎ、センサユニットからの出力もオシロスコープへ入力した。オシロスコープへのこれら二つの入力信号時間差を測定すればよい。本実験のセットアップ状況を図 20 に示す。センサユニットは全部で 4 つあり、各センサユニットの計測はそれぞれにつき 10 回計測した。10 回の平均値を表 3 に示す。

次に、ワイヤレスリンク自体の遅延時間 T_w を測定した。無線 AP 側を PC-UNIX サーバ、無線 STA 側を PC-UNIX クライアントにイーサネットで接続し、サーバではクライアントから UDP で受信したパケットを

そのまま送信元クライアントへUDPで転送するプロセスを起動させた(図16)。またクライアントでもサーバからのデータを受信すると、サーバへ新しい送信を開始させるというプロセスを起動させた。バイト数を100Byteから1500Byteまで変化させ、それぞれにおいてクライアントで500回UDP送信関数sendto()を実行し、終わるまでの時間を関数gettimeofday()を用いて計測した。時間軸(上下方向)とパケットの送受信の関係を図17に示す。同様に無線ユニットをはさまず、直接クロスケーブルで接続した場合においても計測を行った。それぞれの計測結果を図18に同時に示した。差をとることで、100Byteのパケットでのワイヤレス部のみの遅延は2019 μ sec、1500Byteでは3916 μ secとなった。ワイヤレス部の物理帯域が11Mbpsであることを考慮すると、100Byteでは1946 μ secが、1500Byteでは2825 μ secがワイヤレスによるオーバーヘッドとなっていることが分かった。また、センサユニット数増加に伴う転送遅延の変化も計測した。これは、一つのAPに対して1つのSTAの時から4つのSTAの時までそれぞれにおける遅延時間を計測したものである。計測は計測用のセンサデータに関して行い、負荷として流したセンサデータは、送信側のホストにおいて2msec間隔で100、500、1000、1500Byteの大きさである。また、各測定条件において計測用フローのパケットByte数も負荷用のByte数と同じに設定した。結果を図19に示す。図19の横軸はパケットByte数、縦軸は遅延である。

結果、すべてのセンサユニットにおいて、 T_s および T_w を足しあわせた値は、目標とした20msec以下となっており、設定した目標を達成できたことが確認できた。この遅延はセンサユニットとその数に固有であり、予測可能である。また、本条件は4つのSTAによる結果であるが、STAの増加に伴う遅延時間の増大は、STA数100までは1msec以内であることを理論計算によって確認している(図8)。

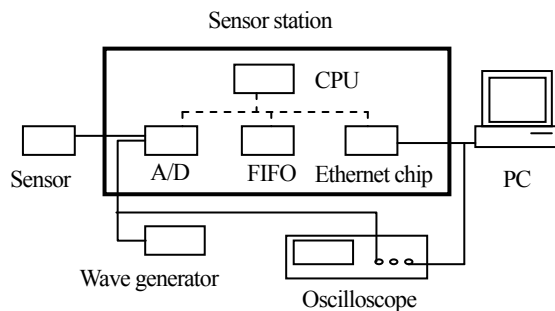


図16 Sensor unit delay experiment

表3 Average of sensor unit delay

Serial No.	1	2	3	4
Average of delay [msec]	11.2	13.0	6.0	5.6

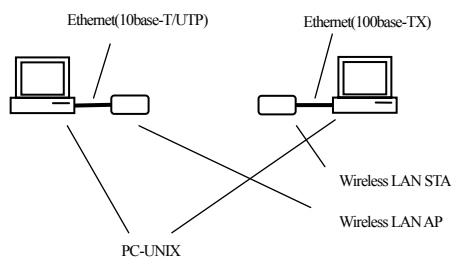


図17 Wireless link delay experiment

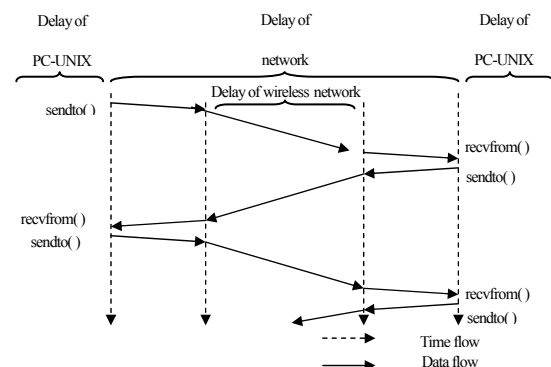


図18 Packet transmission through wireless link

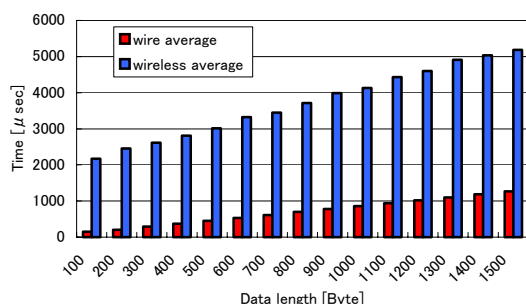


図 19 Average time of wire and wireless communication

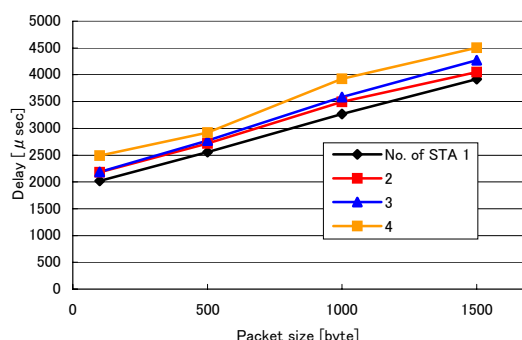


図 20 Delay of wireless link

6. まとめ

本研究では、TCP/IP を用い、構造ヘルスモニタリングに適したワイヤレスセンサネットワークの理論解析、構築とその評価を行った。ワイヤレスアクセスに対する要求性能を明確化し、十分な帯域と今後のリアルタイムサポートを期待できる無線 LAN を選択し、最も普及している規格である IEEE802.11b を用いてワイヤレスセンサネットワークのプロトタイプを設計、構築した。提案するセンサシステムの目標は、センサ間時刻同期誤差を 2msec 以下とし、センサのサンプリングタイムを 50Hz 以上に保証、センサの最大サンプリングレートは 1kHz であり、センサによるデータ取得から収録ホストがそのデータを受信するまでの転送遅延を 20msec 以下とするというものであった。

まず理論的にその実現可能性を検討した。理論解析の結果、提案センサネットワークは-70dB の雑音電力下で、100m 以内のネットワーク半径であれば、 10^{-5} 以下の PER を実現可能であった。また、送信遅延時間は、理論上 300m のセンサネットワーク半径であっても 20msec 以下であることを確認し、目標を実現可能であること確認した。次に、プロトタイプを実際に製作し、その評価試験を行った。製作したセンサユニットは 1kHz でのサンプリング、100Hz でのデータ転送が可能である。この提案システムのセンサユニット間時刻同期誤差は最大で 1.7msec と計測された。また、データ収集ホストのスペックに依存しない範囲での転送遅延時間は、センサユニット数が 4 つの場合では初期の目標性能を満たしており、目的を達成したといえる。今後の課題として、センサ数増加にともなうワイヤレスリンクの転送遅延時間増大への対処と、精度が高いセンサ間時刻同期の安定的な確立などがあげられる。

なお、本研究で開発した無線 LAN システムは、バッテリー駆動ではなく AC100V の電源を必要とするため、電源部はワイヤレス化されていない。しかし近年、電源部に無線微弱電波の使用や、スリープモードなどを活用して、省電力化する研究も進められており、また燃料電池の使用も現実的なものになっている。こうした利用も視野に入れているが、本研究では第一歩として、電源を確保するのは容易であるものの短時間で多くの計測を行いたいような場合を想定して開発した。また、パソコンを見ればわかるように無線 LAN を使った場合でも数時間程度はバッテリー駆動にはまったく問題なく、現状のシステムにおいても、臨時に設置してフィールドで計測するような場合に大いに有効と考えられる。

以上、本論文で提案したセンサネットワークは TCP/IP による拡張性、ワイヤレスアクセスという接続の容易性を有し、構造ヘルスモニタリングに適したセンサネットワークとして有用であり、センサ敷設コストの低減、ワイヤリングの計画の煩雑さの回避、実作業の時間の削減を可能にするものとして期待される。

謝辞

株式会社 東京測振社長 横井勇氏にはワイヤレスセンサネットワークの研究に関してご協力いただきました。また第一技術グループ 佐藤正幸氏、佐藤卓也氏には主にセンサの回路、ソフト開発に関し、大変お世話にな

りました。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) Sohn, H., and Farrar, C.R. : Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals. Smart Materials and Structures, Institute of Physics, 10:4, 2001, pp.446-451.
- 2) Straser, E. G., and Kiremidjian, A. : A Modular Wireless Damage Monitoring System for Structures, The John A.Blume Earthquake Engineering Center, Report 114, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA., 1998, pp.18-20,
- 3) Graizer V., T. Cao, A. Shakal and P. Hipley : Data from downhole arrays instrumented by the California Strong Motion Instrumentation Program in studies of site amplification effects. Proceedings of the 6th International Conference on Seismic Zonation, Palm Springs, California. 2000.
- 4) Jerome P. Lynch, Arvid Sundararajan, Kincho H. Law, Anne S. Kiremidjian, Thomas W. Kenny and Ed Carryer, : Computational Core Design of a Wireless Structural Health Monitoring System, Proceedings of Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'02) Conference, Pusan, Korea, August 21-23, 2002.
- 5) Jerome P. Lynch, Kincho H. Law, Anne S. Kiremidjian, Ed Carryer, Thomas W. Kenny, Aaron Partridge, and Arvind Sundararajan : Validation of a Wireless Modular Monitoring System for Structures, SPIE 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, CA, USA, March 17-21, 2002.
- 6) Jerome P. Lynch, Kincho H. Law, Anne S. Kiremidjian, Thomas W. Kenny, Ed Carryer, and Aaron Partridge, : The Design of a Wireless Sensing Unit for Structural Health Monitoring, Proceedings of the 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, USA, September 12-14, 2001, pp.1041-1050
- 7) Henry O. Marcy, Jonathan R. Agre, Charles Chien, Loren P. Clare, Nikolai Romanov, and Allen Twarowski : Wireless sensor networks for area monitoring and integrated vehicle health management applications, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Portland, OR, Aug. 9-11, 1999, Collection of Technical Papers. Vol. 1, pp.1-11
- 8) Elmer Ihler, Helmut W. Zaglauer, Ursula Herold-Schmidt, Kay W.Dittrich, Werner Wisebeck : Integrated Wireless Piezoelectric sensors, Procs. of SPIE vol.3991, industrial and commercial applications of smart structures technologies, Mar, 2000, pp.44-51
- 9) John Lemke : A remote vibration monitoring system using wireless internet data transfer, Procs. of SPIE vol.3995, Nondestructive Evaluation of highways, utilities, and Pipelines 5, Mar,2000, pp.436-445
- 10) Kyle Mitchell, Nghia Dang, Pengxiang Liu, Vittal S. Rao, and Hardy J. Pottinger : Web-Controlled Wireless Network Sensors for Structural Health Monitoring, Smart Structure and Materials 2001 Smart Electronics and MEMS, Vijay K. Varadan, Editor, Proceedings of SPIE Vol. 4334, 2001, pp.234-243
- 11) Vibha Ravindran, V.V. Varadan : Implementation of Local Area Wireless Sensor Networks using Bluetooth, Smart Structures and Materials 2002: Smart Electronics, MEMS, and Nanotechnology, Vijay K. Varadan, Editor, Proceedings of SPIE Vol. 4700, 2002, pp.258-265
- 12) 松本充司、若原俊彦、: 60GHzミリ波帯による高速無線キャンパスネットワークの構築、第3回YRP移動体通信産学官交流シンポジウム2001、2001年、pp.124-125
- 13) トランジスタ技術, CQ出版社, 2001年7月号
- 14) 柴田伝幸, 山田直之, 浅野孔一: 工場内無線LANシステム、豊田中央研究所R&Dレビュー、Vol. 29 No. 3, 1994年9月、pp. 25-35
- 15) 松下温 監修 重野寛 著 : 無線LAN技術講座, SRCハンドブック, 1994
- 16) IEEE 802.11b-1999, Supplement to 802.11- 1999, Wireless LAN MAC and PHY specifications: Higher speed Physical Layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band,
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11b-1999.pdf>

(受理 : 3月 17日)
(掲載決定 : 9月 16日)

Wireless Sensor for Structural Health Monitoring

NAGAI Nozomu ¹⁾, MITA Akira ²⁾, YAKOH Takahiro ³⁾ and SATO Tadanobu ⁴⁾

- 1) Member, Graduate student, Keio University
- 2) Member, Associate Professor, Keio University, Ph. D.
- 3) Assistant Professor, Keio University, Dr. Eng.
- 4) Member, Professor, Kyoto University, Dr. Eng

ABSTRACT

Structural health monitoring attracts attention, as the technique of realizing quantification of the damage risk of building and civil structure. However, the cost spent on wiring had become the barrier which introduces a monitoring system to a large-sized structure. In this research, for wiring cost reduction, the wireless sensor network system which used TCP/IP and radio communications was proposed, and the theoretical analysis, prototype manufacture, and the evaluation examination were performed. The sensor network proposed in this paper satisfied the target performance. And it was able to reduce sharply the wiring cost and the time. Furthermore, it has attained the high synchronicity needed for real time damage detection.

Key Words: Structural Health Monitoring, Sensor Network, Wireless, Time Synchronization