精密小型加振機と無線センサネットワークを結合した 周波数応答関数計測手法の基礎的検討

Basic Study on Measurement Method of Frequency Response Function Using Artificial Vibrator
and Wireless Sensor Network

日高ちはる*・斎藤拓馬**・渡邊和樹**・佐伯昌之***

Chiharu HIDAKA, Takuma SAITOH, Kazuki WATANABE and Masayuki SAEKI

*非会員 修士(工学) 元東京理科大学 理工学研究科 土木工学専攻 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

**学生員 学士(工学) 東京理科大学 理工学研究科 土木工学専攻 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

***正会員 博士(工学) 東京理科大学 理工学部 土木工学科 講師 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

A structural sensing method using artificial vibrator and wireless sensor network is presented. In this method, the artificial vibrator excites very accurate harmonic vibrations to a target structure and accelerometers deployed on the structure observe the response. The observed acceleration data is collected to a central sever machine through wireless sensor network. Since the artificial vibrator is able to excite very accurate harmonic vibration and sensor nodes are time synchronized to the artificial vibrator, heavy stacking can be applied to the observed data on the sensor nodes. Besides, the response of excited vibration can be accurately estimated by means of discrete Fourier transform due to the time synchronization. These processes successfully compress the amount of data without collapsing the important information of the data that is the amplitude and phase of excited vibration. In this paper, development of the prototype system and the implementation of time synchronization between the artificial vibration source and wireless sensor node are described.

Key Words : artificial vibrator, wireless sensor network, time synchronization

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に建設された社会基盤構造物が数多く存在し、それらの劣化や老朽化の問題が深刻になってきている。これは、各地方自治体の財政や専門家の人的資源が限られている一方で、数多くの社会基盤構造物が一斉に更新期間を迎えようとしていることが原因である¹⁾。そのため、例えば橋梁を例にとれば、各地方自治体では橋梁長寿命化計画を策定し、その計画に沿って計画的に橋梁の維持・管理を行うことが求められている。

ところで、効率的に既存の橋梁を長寿命化するためには、より定量的に保有性能を把握し、それと同時に、実施に当たっては具体的な数値目標を持つことが重要となる。特に、余寿命や耐荷力などの性能を数値化することは、補修・補強の費用対効果を説明する上でも重要になると思われる。ところが、現状では、橋梁の定期点検は目視が主流であり、客観性をもった定量的指標であるとは言い難い。そのため、橋梁の健全性をより定量的に把握するための研究が必要であると考えられる。

以前より、橋梁の健全性を数値化する方法の一つとして、橋梁の振動特性の変化に着目して損傷を同定する構造センシング手法の研究が進められている²⁾。そ

のような研究では、計測した振動データから、構造物の固有振動数やモード形状を推定し、それらの変化から構造物を構成する各部材の剛性や減衰定数の値の変化を説明することが試みられている。振動データとしては、代表的なものとして常時微動があり、これをホワイトと仮定して解析がなされている。

近年では、より高次のモード形状を高精度に捉えるために、構造センシングに無線センサネットワークを導入する研究がなされている³⁾。無線センサネットワークは、各センサノードが安価に構成されており、またケーブルが無いことから、対象とする構造物に多点・高密度で自由度をもってセンサを配置できるという利点を持つ。無線センサネットワークの適用に当たっては、センサノードの時刻同期や、取得した膨大な加速度データの回収方法が技術的課題であったが、それらの解決手法も提案されている。例えば、時刻同期の問題では、実際に各センサノードを時刻同期するのではなく、あるタイムスタンプを全てのセンサノードが同時に計測することにより、見かけ上時刻同期できるようにする手法などがある⁴⁾。また、膨大な加速度データを微弱な無線で回収する課題に対しては、センサノードに演算力をもたせ、加速度データを Auto-regressive などを用いてモデル化し、推定されたモデルパラメータのみをサーバに送信する方法³⁾や、周辺センサノー

ドとのローカルなデータ通信と相関解析により振動パラメータを推定し、サーバに集約すべき通信データ量を抑制する手法などが提案されている⁵⁾。ただし、これ等の手法では、無線通信負荷を大幅に削減することに成功しているものの、モデル化誤差の混入や、生データ喪失による解析における自由度の低下といった問題が発生する。

他の高精度化の試みとしては、振動源を既知とする研究がなされている。例えば、偏心した錘を数 Hz 程度で回転させることで遠心力を発生させ、それを構造物に伝達することで構造物を振動させるマイクロ起振器と呼ばれる振動源が開発されている⁶⁾。このマイクロ起振器は、起振力として遠心力を用いているため、錘が回転する位相を高精度に制御しさえすれば、起振力を既知とすることができるという特徴をもつ。ただし、提案されている起振器は回転周波数を一定にするものであり、同時に 1 つの周波数応答のみしか計測できないという問題がある。

本研究では、構造物の固有振動数やモード形状、減衰定数などのパラメータを高精度に同定するためのシステムを開発することを最終目的とし、そのための基礎的検討を行うものとする。具体的には、上記のマイクロ起振器とは制御方式が異なる精密小型加振機を開発する。この振動源は、錘の回転を位相制御型のサーボモータにより高精度に制御することで、周波数変調を可能とし、これにより同時に多成分の応答を取得できるようにする。そして、この振動源を無線センサネットワークと高精度に時刻同期することで、構造物の伝達関数を位相情報も含めて高精度に取得する。本論文では、実際に精密小型加振機の試作機を作製するとともに、無線センサネットワークに時刻同期、スタッキング、離散フーリエ変換等の機能を実装し、実証試験により精密小型加振機が励起する振動成分を高精度に取得できることを報告する。

2. 本研究で検討するセンシング手法の概要

本手法では、振動源のことを特に精密小型加振機と呼ぶことにする。図-1 に精密小型加振機と無線センサネットワークを結合した構造センシング手法のイメージを示す。この手法は、まず、精密小型加振機で構造物を振動させ、多点に配置したセンサノードで加速度応答を測定する。そして、センサノードはその情報をサーバに無線で送信し、サーバで解析することにより、構造物の固有振動数やモード形状、減衰定数等を同定するものである。

精密小型加振機は、先に述べたマイクロ起振器と同様、偏心した錘を回転させることで遠心力を発生させ、これを対象とする構造物に伝達させることで振動させる。偏心錘の回転は位相制御型のサーボモータで制御

図-1 精密小型加振機と無線センサネットワークを結合した構造センシング手法のイメージ

する。サーボモータの制御クロックは GPS クロックから取得するため、常に UTC(世界標準時) に同期した加振が可能となる。また、精密小型加振機の加振力は、構造物に損傷を与えないよう、十分に小さな加振力とする。その場合、各センサノードにおけるシグナル/ノイズ比は小さくなるが、これは次に述べるスタッキングにより改善する。

センサノードは、精密小型加振機と同期して加速度データをサンプリングする。精密小型加振機は定期的に観測のトリガ信号を送信し、各センサノードはそれを受信した後、決まったデータ長をサンプリングする。この方法を用いると、観測しているデータ長の中ではクロック誤差が生じるものの、そのクロック誤差が累積することはない。このような時刻同期手法を用いれば、観測した加速度応答波形をセンサノード上でスタッキングすることでシグナル/ノイズ比を改善することが可能となる。さらに、観測波形をスタッキングすることから、センサノード上のメモリを節約することができることも重要な特徴の 1 つのである。

センサノードでは、スタッキングのみならず、さらに無線通信データ量を減らすために離散フーリエ変換も行う。従来から提案されているデータ削減手法では、全ての時系列データを無線送信するのではなく、例えば AR 法などを用いて時系列データをいくつかのパラメータでモデル化し、推定されたパラメータの値のみを無線送信している³⁾。この手の手法では、時系列波形のモデル自体が正しいかどうか不明であるためにモデル化誤差が生じるという問題があり、さらに生データが残っていないためにその検証も行えないという問題がある。一方で、本手法では精密小型加振機のモータの位相制御とセンサノードの加速度サンプリングが時刻同期されているため、精密小型加振機により励起された加速度波形は、その周波数が既知の定常振動としてモデル化することができる。そのため、その振動成分の位相と振幅の値を離散フーリエ変換により高精度に同定することが可能となる。この様に、本手法では、振動源により励起された振動成分の情報のみを精度よ

く抽出することで、無線通信データ量を大幅に圧縮することが可能であり、これは無線センサネットワークを構造センシングに適用する際の重大な課題の1つである膨大なデータ量の確実な回収の問題を解決する。

3. 試作機の作製と基本動作の確認

本論文で提案する構造センシング手法を実現する上で、問題点を把握するために、まず試作機を製作し、基本的な動作プログラムを実装して正常に動作することを確認した。

3.1 精密小型加振機

図-2 に製作した精密小型加振機の試作機を示す。偏心錘は回転軸に取り付けられており、回転軸はベアリングにより2点で支持されている。回転軸はカップラーを介してモータと結合されている。この試作機では、モータとしては KEYENCE 社製の位相制御型サーボモータ SV-020AK およびサーボアンプ SV-020P1 を使用している。偏心錘は取り外し可能であり、様々な重さの錘を取り付けれるようになっている。尚、図に示されている偏心錘の1次モーメントは $1.20 \times 10^{-3} \text{kgm}$ ($=0.04\text{g} \times 0.03\text{m}$) であり、10Hz の回転で 4.7N の力を励起することができる。現在は試作機を用いた室内実験段階であるため、小さな偏心錘を取り付けているが、将来的には 100N 程度を考えている。既往の研究では、実橋梁を対象としてマイクロ起振器で実験を行っているものがあり、その際の振動源の起振力は 221.8N(7.5Hz 時)であった。この起振力で十分に加速度応答を計測できている⁶⁾。また、精密小型加振機全体の質量は約 10Kg である。

位相制御型サーボモータ

図-2 精密小型加振機の試作機

図-3 に、精密小型加振機の制御部の構成を示す。本試作機では、基準クロックは 128kHz の一定周期のクロック（方形パルス）を生成し、これをパルス生成装置に入力する。パルス生成装置では基準クロックをカウントし、所定のカウント値になったところで制御パルスをサーボアンプに出力する。この様に分周するこ

とで、基準クロックに同期してモータを制御することができる。また、分周比を時間の関数とすることで周波数変調が可能となる。ここで周波数変調とは、周波数を時間の関数として変化させる方法であり、一般には電磁波などでデジタル信号を送信する際の搬送波の変調方法の1つとして使用されている。本手法では、この周波数変調を一度に多数の周波数成分を励起する方法として使用している。サーボアンプは制御パルスを受信すると、それに従ってモータを回転させる。本試作機では 512 パルスで 1 回転するように設定している。モータが回転すると、モータのエンコーダ部から A 相、B 相、Z 相などの実際の回転に応じてパルス列が出力される。こちらも 1 回転で 512 パルス生成するように設定している。このパルス列はサーボアンプから取り出すことができ、パルスカウンタにより実際のモータの回転をモニタリングすることで偏心錘の位相を計測できるようになっている。さらに、パルス生成装置は周波数変調を開始するタイミングで、無線センサモジュールの観測開始のトリガー信号を生成する。無線に関する部分については、次節 3.2 にて説明する。

図-3 精密小型加振機の制御部の構成

本試作機では、パルス生成装置のコア部分には Microchip 社製の MCU (Micro Controller Unit) である PIC16F877A を使用している。この MCU に実装されている Timer0 のカウンタ割り込み機能⁷⁾に基準クロックを入力し、所定のクロック数をカウントした後にサーボアンプに制御パルスを出力するようプログラミングしている。また、基準クロックとしては Agilent Technology 社製のファンクションジェネレータを使用しており、これは外部からの 10MHz クロックと同期することが可能である。ここに GPS 時計の 10MHz 出力を入力すれば UTC と時刻同期できるわけだが、現段階では GPS 時計は未接続である。また、パルスカウンタには横河電機の WE7000 シリーズの WE7521 (4-CH

timing measurement) モジュールを使用している。このパルスカウンタは、外部からサンプリングパルスを取り込むことができるため、パルス生成装置で生成する制御パルスと実際にモータが回転した情報であるエンコーダ A 相の出力パルスを比較することができる。これにより、偏心錘が回転した実際の位相を把握することができる。一定の周波数で制御する場合には、モータの回転は制御パルスから一定の遅延を伴って回転するため、このようにエンコーダの情報を取得しなくても振動源の励起力を把握することは可能である。しかしながら、周波数変調する場合には、偏心錘の回転を速くしたり遅くしたりするため、必ずしも制御パルスの通りにモータは回転しない。これは周囲の温度や、振動源を設置した対象物の運動によっても変化するため、実際に偏心錘がどのように回転していたかを把握することは重要となる。

3.2 加速度計測のためのセンサノード

図-4 にセンサノードの試作機を示す。このセンサノードには、無線機能を備えたマイコンモジュール、16bit の ADC (Analog Digital Converter)、3D 加速度計が搭載されており、3.3 ~ 5.0V の電源をバッテリーから供給することで動作する。

図-4 センサノードの試作機

無線機能を備えたマイコンモジュールとしては、東京コスモス電機社製の TWE-001 を採用している。この無線マイコンモジュールは、IEEE802.15.4 に準拠する無線機能を持ち、通信速度は 250kbps である。また、32 ビットマイコンを搭載し、128kbyte の RAM を備えており、動作電圧は 2.3 ~ 3.6V、外形寸法は 20mm × 40mm × 3.5mm となっている。また、送信電流および受信電流はカタログ値で 14.6mA、17.2mA (いずれも 3V 時の標準値) となっている。

加速度センサとしては、現時点では安価で入手が容易なカイオニクス社製の 3 軸加速度センサー KXM52-1050 モジュールを使用している。カタログ値で計測レンジは $\pm 2.0G$ 、感度は 660mV/G、ノイズレベルは $\approx$

方向で $65\mu G/\sqrt{Hz}$ となっている。本研究では手法の有効性を検討するために入手が容易な加速度センサを用いているが、今後、さらに実用レベルの検証を重ねる段階においては、より高感度のものを使用する予定である。

3.3 基本動作の確認

精密小型加振機とセンサノードの基本動作を確認するため、簡単なプログラムを各装置の MCU にダウンロードし、動作実験を行った。この実験では、精密小型加振機は一定の周波数 20Hz で回転するように設定し、センサノードは単純に 10 秒間だけ 100Hz で加速度応答をサンプリングするように設定した。また、センサノードは精密小型加振機の台上に固定し、鉛直成分を計測した。観測されたデータは、観測終了後に無線でサーバに回収した。

図-5 にセンサノードにより計測された加速度応答の時系列波形の一例を、図-6 にはそのフーリエスペクトルを示す。ただし、離散フーリエ変換は後処理でパソコン上で計算したものである。

図-5 精密小型加振機により励起された加速度応答波形

図-6 計測された加速度応答波形のフーリエスペクトル

図-5 の時系列波形では、精密小型加振機により励起された 20Hz の振動成分はノイズに埋もれてしまい、明確に視認することはできない。しかしながら、図-6 のフーリエ振幅を見ると、20Hz で加振させた精密小型

加振機による応答のピークがノイズから突出しており、ピーク周辺にエネルギーの漏れ出しもなく、位相が高精度に制御されていることが分かる。このことから、精密小型加振機とセンサノードは異常なく動作していることが確認できる。

4. データ圧縮のためのシステム高度化

前節では、精密小型加振機とセンサノードの基本動作が確認されたが、実際の構造物の応答を精度よく計測するためには、観測時間を十分に長くする必要がある。しかしながら、微弱な無線通信で膨大なデータを送信することは困難であるため、ここでは精密小型加振機の位相精度の高さを利用して、データ量を大幅に圧縮することとする。これはスタッキングと離散フーリエ変換を適用することで可能となる。また、スタッキングと離散フーリエ変換を意味あるものにするためには、まず精密小型加振機とセンサノードが高精度に時刻同期されている必要がある。

4.1 時刻同期手法の実装

無線センサネットワークにおける時刻同期手法では、サーバーからタイムスタンプが無線で送信され、センサノード側でこのタイムスタンプを適切に処理する。このタイムスタンプの処理方法は2つあり、1つはタイムスタンプを計測のトリガーとして使用する方法であり、他はセンサノードの時計に従ってサンプリングを行いつつタイムスタンプがどのデータに対応するかを記録する方法である。後者の場合、サーバーにデータを収録してから計測波形を解析し、再度適切なサンプリング間隔に修正する処理を行う。

本システムでは、加速度応答のシグナル／ノイズ比を改善するために、長時間の計測を行う。そして、それと同時にメモリーを節約するため、長時間の計測データをセンサノード上でスタッキングする。この場合、データサンプリングは見かけ上の時刻同期ではなく、実際に時刻同期している必要がある。そのため、本システムでは前述のタイムスタンプの処理方法のうち、前者を用いることとする。本システムにおける時刻同期手法の動作フローを図-7に示す。

まずサーバーが観測開始の命令を送信し、精密小型加振機がその信号を受信する。精密小型加振機は、偏心錘の回転運動が定常状態になるまで十分に待った後に、センサノードにトリガー信号を送信する。このトリガー信号を送信するタイミングは、周波数変調の1サイクルの開始のタイミングと同時とする。(実際には処理のために数 μ sの遅延が発生するが、この値はいつも同じ値であるため、計測精度には影響しない。) すなわち、周波数変調の周期を T_{FM} 秒とすれば、 T_{FM} 秒に1回トリガー信号を送信する。精密小型加振機は計測終了

図-7 時刻同期手法の動作フロー

までこの動作を繰り返す。

センサノードはトリガー信号を受信したら T_s 秒間サンプリングを行う。ただし、 T_s は T_{FM} の整数倍である。実際には、サンプリング間隔を Δt とすれば、トリガー信号を受信した瞬間から

$$n_s = T_s / \Delta t \quad (1)$$

回だけサンプリングを行う。これはトリガー信号を受信した時刻を0秒とすれば、サンプリングは実際には $T_s - \Delta t$ 秒で終了し、次のトリガー信号を待つことになる。ここでクロックの精度が悪いと、すなわち Δt が大きな誤差を持つ場合には、トリガー信号を受信する瞬間に計測が終わっていないなかったり、逆に早くに終わっている場合も考えられる。しかしながら、センサノードのクロックは水晶振動子であり、その誤差は長時間計測する場合には問題になるが、 T_s 秒(数秒)程度であれば無視できる程度である。そのため、クロック誤差は最後のサンプリングを終えてから、次のトリガーを受信するまでの時間で吸収されることになる。

4.2 スタッキング手法の実装

センサノードではメモリーが限られているため、スタッキング処理はリアルタイムに行う必要がある。すなわち、データのサンプリング間隔を Δt とすると、この Δt 秒間よりも十分に短い時間内に3成分のAD変換、およびスタッキング(メモリー上のデータへの足し込み)を行うことになる。

図-8 トリガーとサンプリングのタイミング

本システムでは、16bit の ADC を用いているため 1 つのデータは 16bit である．これを int 型 (32bit) の変数としてメモリ上に保存する．そのため、オーバーフローしない様に注意すると、スタッキング回数は最大で $2^{16} = 65536$ 回となる．既定のスタッキング回数に達したところで、float 型の加速度応答値に変換しスタッキング回数で除す．

4.3 時刻同期とスタッキングの性能検証

システムに時刻同期手法とスタッキング手法を実装し、実際に精密小型加振機が励起する振動をセンサノードで計測することで、その性能を検証した．実験に使用した装置の概要を図-9 に示す．実験では、比較のために同じ装置を使用して時刻同期なしの場合についても計測を行った．まず時刻同期ありのシステムでは、パルス生成装置に基準クロックを入力し、パルス生成装置はセンサノードのトリガー信号とサーボアンプの制御パルスを生成する．これにより、精密小型加振機とセンサノードの時刻同期をとっている．一方で、時刻同期なしの場合には、基準クロックを 2 つ準備し、サーボアンプへの制御パルスとセンサノードのトリガー信号を別系統としている．基準クロックは Agilent Technology 社製の同機種のファンクションジェネレータを使用している．

加速度応答の計測においては、精密小型加振機は 20Hz の一定周波数で動作させ、センサノードはデータ長 10 秒、サンプリング周波数 100Hz、スタッキング回数 100 回とした．時刻同期ありの場合について、実際に得られた加速度応答のフーリエスペクトルを図-10 に示す．ただし、時刻同期なしの場合についても、ほぼ同様のグラフを得ることができる．

さらに、時刻同期ありの場合となしの場合を詳しく比較するために、表-1 に 20Hz のピークにおける振幅と SN 比の値を示している．表中のスタッキングなしは、図-6 の結果である．また SN 比は 20Hz の信号の振幅を 19.0 ～ 21.0Hz のノイズの振幅の標準偏差で除すことにより求めている．

スタッキングしていない図-6 と 100 回スタッキング

図-9 時刻同期とスタッキング性能の検証のための実験装置

図-10 スタッキングにより得られた周波数応答関数

表-1 時刻同期あり／なしによる加速度振幅の比較

スタッキング	時刻同期	振幅 [m/s ²]	SN 比
なし	-	0.2529	29.6
あり	あり	0.2488	301.9
あり	なし	0.2003	199.9

した図-10 を比較すると、ノイズレベルが 1 オーダーほど低下している様子が分かる．スタッキング回数を N としたとき、理論的には SN 比は $\sqrt{N}$ 倍ほど改善することが知られており、今回の実験ではほぼ理論通りに SN 比が改善していることが分かる．

また、時刻同期ありとなしを比較すると、時刻同期

なしの場合にはスタッキングにより振幅が低下している様子が見える。時刻同期なしの場合では、データ長 10 秒の波形を観測する度に、20Hz の信号の位相が少しずつずれていくために、スタッキング回数を増やす度に信号が低下してしまう。一方で、時刻同期ありの場合は、スタッキングなしと比較して振幅の低下は見られない。(表-1 を見ると振幅の値は若干低下しているように見えるが、SN 比の値から誤差の範囲であることが分かる。) このことから、本研究により実装した時刻同期手法、スタッキング手法はデータ長 10 秒で 100 回程度のスタッキングであれば正常に動作することが確認されたと言える。

4.4 離散フーリエ変換の実装によるデータ圧縮

時刻同期手法とスタッキング手法の実装によりデータ圧縮が行われた。先の例では、データ長 10 秒で 100 回スタッキングしている。ADC の分解能は 16bit であることから 1 データは 2byte であり、100Hz サンプリングしているため 1 秒あたり 200byte のデータが得られる。これを 1000 秒間観測したことになるから、実際には 200kbyte のデータである。これを 100 回スタッキングすることで 2kbyte のデータにまで圧縮している。

本システムでは、精密小型加振機とセンサノードが時刻同期されていることから、観測波形に含まれる信号の周波数が既知として扱えるほど高精度に分かっている。そのため、センサノードに離散フーリエ変換を実装することで、加振振動数に相当する周波数成分だけを抽出することが可能となる。例えば、20Hz の成分の実数部と虚数部の値だけを抽出する場合には、それぞれ 16bit (2byte) のバイナリデータとして、4byte にまで圧縮することができる。

本システムではセンサノードに 32bit のマイコンモジュールを使用しており、離散フーリエ変換を実装することができる。実際にセンサノードの動作プログラムに離散フーリエ変換を実装し、スタッキング後の時系列データに離散フーリエ変換を適用した。そして、時系列データそのものと離散フーリエ変換の結果を PC に回収した後で、PC 上でも離散フーリエ変換を行った。それらの結果と比較したところ、同じ値を得ることができた。

5. 精密小型加振機の周波数変調

ここまでは、精密小型加振機をある一定の周波数で動作させる場合について扱ってきた。しかしながら、実構造物の振動特性を効率的に把握するためには、一度に多くの成分を取得できることが望ましい。そのため、本システムでは精密小型加振機を周波数変調することで、同時に多成分を観測できるようにする。

5.1 周波数変調の制御方法

周波数変調は、図-3 に示すパルス生成装置により、制御パルスの出力間隔を変調することにより行う。例えば、本試作機においては、サーボモーターは 512 パルスで 1 回転するように設定している。そのため、サーボモーターを 10Hz で回転させるためには、5120Hz の制御パルスを入力する必要がある。基準クロックは 128kHz としているので、これをパルス生成装置により 25 分周すれば 5120Hz のパルスを出力することができる。この様に、サーボモーターの回転周波数は基準クロックの分周比を変化させることにより変調させることができる。

ところで、分周比は整数であるため、任意の周波数を作り出すことはできない。例えば、サーボモーターを 20Hz で回転させるためには、上記の設定では 12.5 分周することになり、これは実現不可能である。この場合には、基準クロックを 256kHz に設定するなどの対応をすればよい。

さて、本論文では 10 ~ 20Hz の周波数帯で周波数変調する例を示す。この例では、周波数変調の周期を 10 秒とし、最初の 5 秒で分周数を 25 分周から 13 分周まで 13 段階に分けて変化させ、その後 5 秒間で 13 分周から 25 分周まで変化させる。次に、各分周に対して出力する制御パルス数（これは継続時間に対応する）を設定するのだが、ここで重要となるのは、

- 1) 変調周期を正確な時間に設定すること、
- 2) 精密小型加振機の偏心錘の位置が変調周期開始時に毎回同じ位置にあること

である。今回の設定では基準クロックを 128kHz としているため、10 秒間で 1,280,000 クロックをカウントしてちょうど周波数変調が 1 回完了するように設定する必要がある。さらに、変調開始時に偏心錘が同じ位置に戻るよう設定しなければ、10 秒毎に位相が異なることになり、スタッキングを正常に行えなくなる。これ等の条件から、各分周比を $n_i = \{25, 24, \dots, 13\}$ 、各分周毎の制御パルス数を c_i とすれば、以下の 2 式を満足すれば十分であることが分かる。

$$\sum_{i=1}^{26} n_i c_i = 1,280,000 \quad (2)$$

$$\text{mod} \left(\sum_{i=1}^{26} c_i, 512 \right) = 0 \quad (3)$$

式 (2) と式 (3) は、それぞれ上述の条件 1) と 2) に対応している。

5.2 実証実験により得られた周波数応答関数

式 (2) と式 (3) を同時に満足する $\{c_i\}$ を決定し、制御プログラムを作成してパルス生成装置の MCU にダウンロードした。そして、実際に精密小型加振機を動作させ、加振機の台に固定した加速度計で応答を計測

した．図-11 と図-12 に計測された加速度応答の時系列波形と離散フーリエ変換により計算された周波数応答関数を示す．

図-11 周波数変調時に計測された加速度応答波形

図-12 周波数変調時に計測された周波数応答関数

図-11 では，周波数変調の周期 10 秒で波形が繰り返している様子が分かる．この波形をデータ長 50 秒で離散フーリエ変換して得られるのが図-12 である．得られた周波数応答関数を見ると，10 ～ 20Hz の辺りで応答が大きくなっている様子が見える．さらに，図の右側に 15.0 ～ 15.5Hz の周波数帯域を拡大したものを示しているが，こちらを見ると正確に 0.1Hz 間隔で振幅が大きくなっている様子が分かる．本システムでは，周波数変調の周期を正確に 10 秒で制御しているために，加振機は 0.1Hz 刻みの力を励起している．（ T 秒で正確に繰り返す波形に含まれる波形には n/T Hz の成分しか含まれないため．）一方で，加速度応答の計測ではデータ長 50 秒としていることから，周波数成分の分解能は 0.02Hz となっている．周波数変調の精度が低い場合や，加振機と加速度計測の時刻同期精度が低い場合には，エネルギーが他の周波数成分に漏れ出すためにノイズとシグナルを完全に分離することができないが，本システムでは 1 つの基準クロックに加振機と加速度計測を高精度に時刻同期しているために，ノイズとシグナルを完全に分離することに成功している．

尚，図-12 の 15Hz 付近では特に振幅が大きくなっているが，これは精密小型加振機と加速度センサを設

置した台の固有振動数に対応しているものと考えている．ただし，本手法以外のもので検証を行っている訳ではないので，今後，システム自体の固有振動数である可能性も含めて，検証を行うものとする．

5.3 周波数変調における振源関数

一定の周波数で偏心錘を回転させる場合には，起振力は $mr\omega^2$ により容易に求めることができる．ただし， mr は偏心錘の慣性 1 次モーメント， ω は角振動数である．周波数変調の場合には，偏心錘の回転を加速させたり減速させたりするために，偏心錘の回転は必ず制御パルスに対して位相遅れをもってしまう．そのため，加振機が励起する力は，実際に偏心錘が回転した情報を計測し，そこから振源関数を計算して求めることになる．

周波数変調により励起される力の時系列データは次式により計算することができる．

$$\begin{aligned} F(t) &= mr\omega(t)^2 \exp \left[i \int_0^t \omega(s) ds \right] \\ &= mr \left(\frac{d\phi(t)}{dt} \right)^2 e^{i\phi(t)} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに $\phi(t)$ は時刻 t における位相（モータの回転角）である．図-3 に示すパルスカウンタにより位相 $\phi(t)$ を離散的に計測し，これを式 (4) に代入して振源関数の時系列を得る．そして，この時系列データを離散フーリエ変換することで各周波数における励起力と位相を知ることができる．図-13 に，計測された位相から計算した振源関数のフーリエスペクトルを示す．

図-13 計測された位相から計算した振源関数

図を見ると，主に 10 ～ 20Hz の周波数帯で力を励起している様子が分かる．また，力は周波数が大きくなるに従って大きくなる傾向が見られる．これは励起力が遠心力であるために，周波数の二乗に比例するためである．ところで，今回の周波数変調の設定では，得られた振源関数は周波数によって大きく励起力が異なっている．ある周波数では非常に力が弱くなっていたり，また全体的にも 1 オーダー程度で励起力がふらついて

いる．この励起力の差のために，周波数応答関数においても幾つかの周波数成分で非常に SN 比が悪化するという現象が見られている．本来であれば，できるだけ励起力をそろえる様に工夫しなければならないが，現時点では試作機において分周比を制御する能力が足りず，きめの細かい制御ができていない．今後，周波数変調の制御装置を改善していく予定である．

6. まとめ

本論文では，構造物の振動特性を高精度に把握することを最終目的として，精密小型加振機と無線センサネットワークを結合した構造センシング手法の基礎的検討を行った．実際に精密小型加振機とセンサノードを試作し，それらを時刻同期することで高精度に応答を計測できることを確認した．さらに，スタッキング・離散フーリエ変換により大幅なデータ圧縮に成功している．また，精密小型加振機を周波数変調することにより，多くの振動数成分のデータを取得できることを示した．

謝辞

本研究は科学研究費補助金（若手研究 (B) : 22760347）の助成を受けたものである．

参考文献

- 1) 豊福俊泰，尼崎省二，中村一平：入門維持管理工学，森北出版株式会社，2009.
- 2) 山本鎮男：ヘルスマニタリング，共立出版株式会社，2008.
- 3) J. P. Lynch et al. : Power-efficient wireless structural monitoring with local data processing, Proceedings of the International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokyo, Nov., Vol. 1, 331-338, 2003.
- 4) Xu, N. et al. : A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring, SenSys '04, November 3-5, 2004.
- 5) 長山智則，B.F.Spencer, Jr., 藤野陽三：スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのミドルウェア開発，土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.523-535, 2009.
- 6) 古川愛子：未知の加振力によるフーリエ振幅比を利用した損傷同定手法の実橋梁による検証，構造工学論文集, vol.53A, p258-267, 2007.
- 7) 後閑哲也：電子工作のための PIC16F 活用ガイドブック，技術評論社，2004.

(2011 年 3 月 8 日 受付)