

多地点に設置された無線センサによる振動の計測とその3次元可視化

愛媛大学大学院 学生員 ○高本龍直，愛媛大学大学院 正会員 中畑和之
愛媛大学大学院 正会員 岡村未対，愛媛大学大学院 正会員 大賀水田生

1. はじめに

社会インフラストラクチャーを持続的に使用するための新しい維持管理技術の研究開発が急ピッチで進められている．特に，データ転送・信号処理等の通信技術の進展や計測器の品質向上によって，遠隔モニタリング技術を土木構造物へ適用する試みが近年盛んに行われている¹⁾．構造物の多点計測による動特性の詳細な把握を，安価に実現する可能性を持っているのが，MEMS(Micro Electro Mechanical System) センサと，無線通信・演算処理機能を組み合わせたスマートセンサである²⁾．数多くのモニタリングの研究はあるが，多点で計測されたデータを一元処理して構造物全体の状態を表示するシステムの構築までは至っていない．そこで，本研究では，計測データを CAD の位置情報に組み入れることによって，構造物に生じた振動の3次元可視化を行う．本研究では，土木橋梁の交通振動のような低い加速度領域 (100Gal 以下) でも，市販のセンサを用いて正確な測定ができるようにキャリブレーションを行い，ノイズの軽減を試みた．また，変形状態を3次元的に可視化するためには3軸の変位が必要であるので，MEMS センサで得られた加速度を変位に変換するためのデジタルフィルタ³⁾を設計した．ここでは，10機の無線センサノードを用いて振動計測および振動の3次元可視化を行った．

2. 複数のセンサノードを用いた波形収集・可視化システム

本研究では，市販されている要素技術を組み合わせて無線計測システムを自作した．土木工学技術者でも容易に作成できるような単純な構成である．システムの概要を図-1に示す．無線センサノードはセンサ部と無線部からなる．MEMS 加速度センサは，汎用品のカイオニクス社製の KXM52-1050 を用いた．このセンサの加速度の測定レンジは $\pm 2.0G$ ，感度は $1.0V/G$ (電圧 $5.0V$) である．センサの大きさは $5.0mm \times 5.0mm \times 1.8mm$ であり，1個の価格は1000円であった．加速度センサは基盤中央部に固定し，基盤はプラスチック容器 (約 $150mm \times 100mm \times 70mm$ のサイズ) で梱包して防塵対策を施した．センサ部は9V形のアルカリ乾電池1個を用いて駆動する．センサ部の重量は，電池を含めて230gである．

無線部では，センサ部から転送された電圧信号のA/D変換を行い，デジタル信号を無線LANによりルータを経てノートPCに送信する．ここでは，ナ

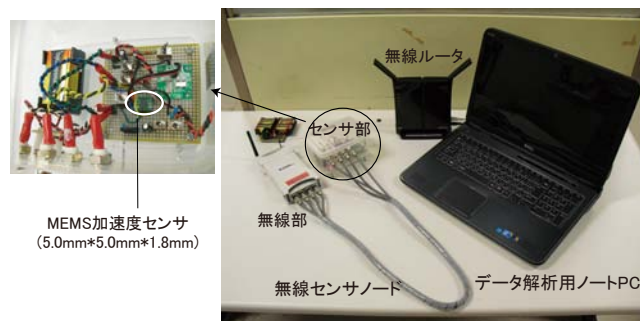


図-1 無線センサノードと基地局

ショナルインスツルメンツ (NI) 社の NI-9215 を用いて A/D 変換を行った．NI-9215 の分解能は 16 ビット，最大サンプリングレートは 1 チャンネル 100kHz，最大アナログ入力電圧は 10V，チャンネル数は 4 つである．デジタル信号は NI 社の WLS-9163 を用いて，基地局まで無線でデータ転送する．無線規格は IEEE802.11g を用いており，無線ネットワークはインフラストラクチャ形態を採用している．基地局で加速度データを変位に変換し，データ解析用のノート PC で 3 次元振動の可視化を行う．リアルタイムで加速度データを変位に変換する方法や，ノイズを減少させるためのデジタルフィルタの設計については，著者らの論文⁴⁾を参照されたい．

3. 構造物の振動計測と3次元振動の可視化

ここでは自作した無線センサノード 10 機を用いて振動の計測実験を行い，構造物の振動を 3 次元的に可視化する．測定対象は，8 階建ての鉄筋コンクリー

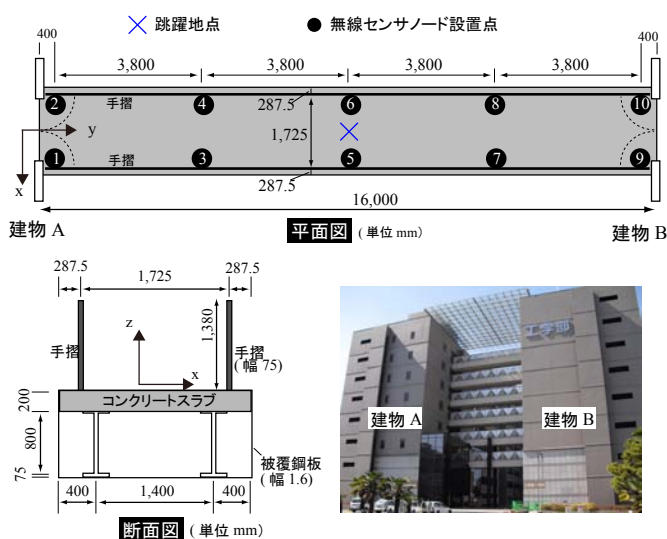


図-2 加速度の計測対象とセンサ配置図

ト建物 A と B を結ぶ連絡通路 (最上階) である。この連絡通路の概要を図-2 に示す。連絡通路のスパンは 16m, 幅は 2.2m である。通路上の 10 点に, 無線センサノード 10 機を配置した。配置位置は図-2 の数字で示している。ここで, 加速度の z 軸は重力の作用する方向, y 軸は連絡通路の長軸方向とする。

連絡通路を加振するために, 図-2 に示すように通路の真ん中で, 体重 75kg の人が 1 回跳躍することによって衝撃を与えることとした。計測は 4.0sec 間行い, その間に人が飛び跳ねたときの, 各無線センサノードでの加速度 (3 軸) を計測する。ここでは, サンプリングレートは 2.0kHz とした。人が飛び跳ねたときに得られる, 計測点 5 (跳躍点から最も近い点) の加速度波形を図-3 に示す。図中の 0.95sec あたりが跳躍開始時刻, 1.61sec あたりが着地時刻 (空中跳躍時間約 0.66sec) である。図-3 は跳躍点から最も近い点であるので, 着地時刻においては x, y, z とともに最大で 100Gal 近い加速度を示している。図-3 の z 軸の加速度をみると, 跳躍開始からすでに 10Gal 程度の加速度が検知されており, 約 0.66sec の空中跳躍の間は振幅も周期もほぼ一定であるため, 自由振動をしていると考えられる。

では, その自由振動における固有周波数を加速度データから抽出してみる。ここではウェーブレット変換による時間周波数解析⁵⁾を用いる。図-4 に, 計測点 5, 7, 9 における z 軸方向の加速度のウェーブレット変換値を示す。各図の横軸が時間, 縦軸は周波数である。計測点 5, 7 の矢印で示したところは, 約 9Hz 付近のスペクトルが跳躍開始から発生し着地後 2.7sec 程度まで継続していることを示している。この約 9Hz

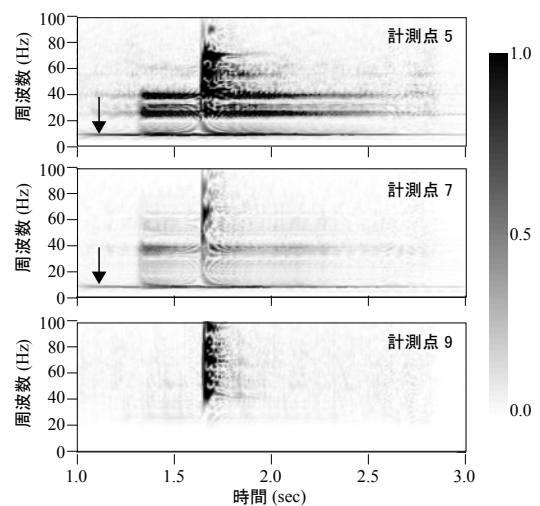


図-4 z 方向の加速度のウェーブレット変換による時間周波数解析結果

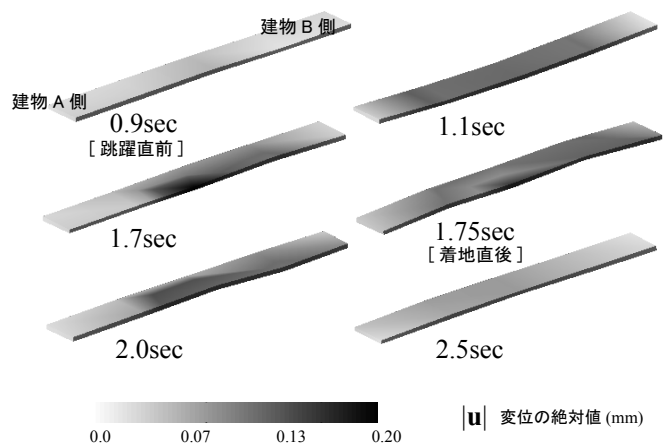


図-5 人が 1 回跳躍したときに発生する連絡通路の振動の 3 次元可視化

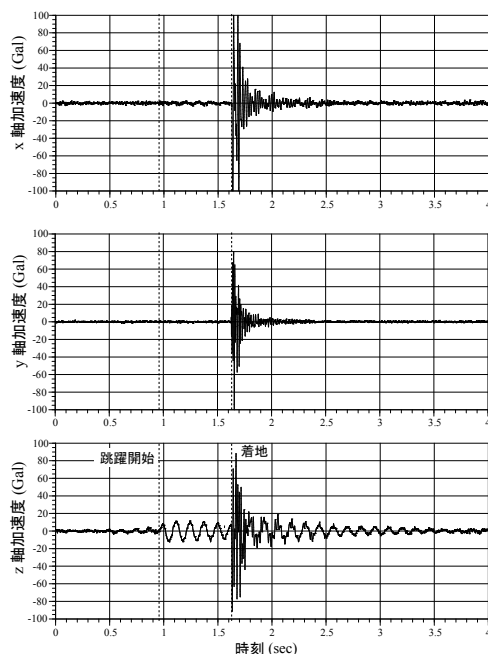


図-3 計測点 5 で得られた加速度波形

が連絡通路の一次固有周波数であると考えられる。

無線センサノード 10 機で得られた 3 軸の加速度から変位を算出し, コンクリートスラブの CAD 上の位置に変位データをマッピングすることによって, スラブの 3 次元変形のアニメーションを作成した。作成したアニメーションのうち, 主要な時間ステップの変形スナップを図-5 に示す。跳躍直後は変形が小さいが, 跳躍 0.2sec 後 (1.1sec) には 0.1mm 程度の変形が見られる。また 1.7sec の着地直後は強い変形を示しており, 最大で約 0.2mm の変形が見られる。また, 2.5sec には振動はほぼ収束している。

参考文献

- 1) 長山智則ら: 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.523-535, 2009.
- 2) 川谷充郎ら: 応用力学論文集, Vol.13, pp.1009-1016, 2010.
- 3) 木村英紀, デジタル信号処理と制御, 昭晃堂, 1982.
- 4) 高本龍直ら: 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学) 特集号, 2011, 投稿・査読中
- 5) Mallat, S.: *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Second Edition, Academic Press, New York, 1999.