

MEMS加速度センサによる住宅構造診断システム

Structural Health Monitoring System for Houses Constructed with MEMS Acceleration Sensor

佐田 貴浩
Takahiro Sada

岸本 和貴
Kazuki Kishimoto

藤野 崇史
Takafumi Fujino

野村 建太郎
Kentarō Nomura

要 旨

高層ビルなどの大規模建築物で既に実用化されている構造ヘルスマニタリング技術を戸建て住宅に普及展開するため、安価なMEMS（Micro Electro Mechanical Systems）型3軸加速度センサと無線通信（Wi-Fi^(注1)）を用いた簡易な地震計システムを開発した。宅内の各階層で計測した振動データの時刻ばらつきを補正するための新たな手法として、収録波形の相関に基づく同期補正法を提案し、試作品の加振実験によりその有効性を確認した。また、収録波形に含まれるノイズレベルと解析精度（加速度の2階積分で求めた層間変位波形）の関係から、住宅構造診断システムとしての適用性を確認した。

Abstract

We developed a simple earthquake measurement system with a low-cost triaxial microelectromechanical system (MEMS) acceleration sensor and wireless communication (Wi-Fi) for the deployment of a structural health monitoring system already practiced in skyscrapers to houses. As a new method for synchronizing multiple waveforms measured at each layer in the house, we proposed a synchronization correction method based on correlation of waveforms. Vibration experiments confirmed its effectiveness, and the relationship between the noise level in the recorded waveform and the analysis accuracy showed the applicability of this system.

1. はじめに

近年、建物の適正な維持管理や災害時の迅速な被災度診断などを目的として、構造ヘルスマニタリング（SHM：Structural Health Monitoring）技術に関する研究・開発が進められている。SHMとは、地震、風などによる建物の振動をセンサで計測し、収録データに基づき対象建物の変形量や振動特性変化を解析することで、構造体の損傷の有無・程度を診断する技術であり、各種技術ガイドラインや実建物への適用事例が公開されている[1][2]。

SHMシステムの採用実績は現状、橋梁（きょうりょう）やトンネルなどのインフラ構造物や高層ビルなどの大規模建築物が中心であるが、近年、戸建て住宅などの小規模建物においても構造体の損傷度に応じて資産価値を適正に判断することが重視され、SHM技術導入への期待が高まりつつある。

一般的なSHMシステムの多くは、建物各階層に設置された複数台の高感度振動計（サーボ加速度センサなど）と収録装置を有線で接続し、振動計間で同期をとりながらデータ収録を行っているが、費用の制約が厳しい個々の住宅にまでSHM技術を普及させるためには、より簡便かつ安価な計測システムの実現が望まれる。

そこで筆者らは、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）型3軸加速度センサと無線通信（Wi-Fi^(注1)）を

用いた地震計システムを開発した。各地震計は小型かつ安価なMEMS加速度センサを搭載し、複数地震計の連動・収録データ転送を無線化することで、建物各階にわたる大がかりなケーブル敷設を不要とした。

このような簡易な地震計システムを住宅構造診断に適用するにあたり、主な検討課題は、①無線化された複数センサ間のデータ収録時刻ばらつき補正、②センサノイズの影響評価（収録データの解析精度）の2点である。

本稿では、まず①について、無線センサネットワークの時刻同期に関してはハードウェア主体で種々のシステム構成が提案されているが[3]、複数収録波形の相関に基づきソフトウェア処理で同期ずれの補正を行う新たな手法を提案する[4]。次に②について、ノイズレベルと収録データの解析精度（ここでは加速度波形の2階積分で求めた建物各層の層間変位波形）の関係について解析的に検討し、適用条件を明確にする。最後に、試作品システムの加振実験を行い、各検討結果の妥当性を検証する。

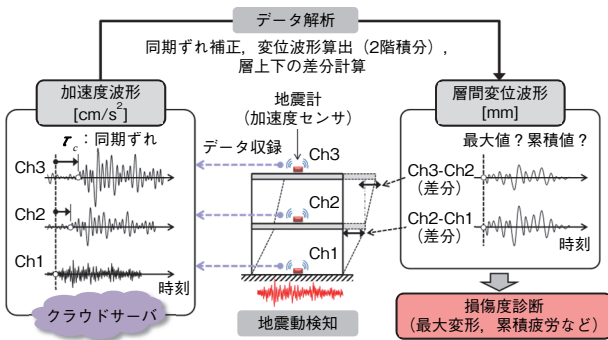
2. 地震計システムの構成と検討課題

2.1 システムの概要

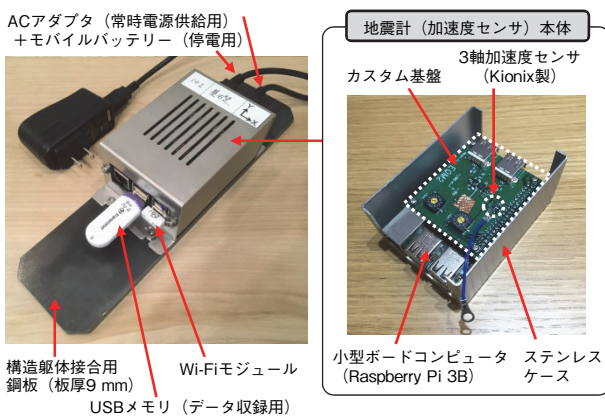
第1図にSHMシステム全体の概要図を示す。地震時の建物振動を各階に設置した加速度センサで計測し、水平方向の加速度波形を2階積分して得られた各階変位波形の差分から建物各階の水平ひずみ（層間変位）を求め、層間変位波形の最大値や累積値などに基づき建物各階の損傷有無・程度を診断する。

(注1) Wi-Fi Allianceの登録商標。

第2図に開発した地震計（加速度センサ）の構成を示す。本地震計では、安価なMEMS型3軸加速度センサを使用し、小型ボードコンピュータ（Raspberry Pi 3B^(注2)）で信号処理やデータ収録を行う。後述の建物基礎に設置した地震計からのトリガ信号やクラウドサーバへの計測データ転送は、Wi-Fiモジュールにより無線化している。基礎に設置した地震計が10 cm/s²以上の加速度を計測した場合、トリガ信号を発生させることで、ローカルネットワーク内にある全地震計の連動データ収録を可能としている。また、停電などでネットワークが正常に機能しない場合は、Raspberry Piの駆動電圧（3.3 V）を下回らないようにモバイルバッテリーからの電力供給に切り替わり、各地震計がローカルトリガにより個別にデータ収録を行うことで、SHM機能の連続性を担保する。各地震計は、（一社）日本建築学会編「強震観測の手引」[9]記載の要求仕様に基づき、計測レンジ±4 G（3920 cm/s²）、分解能16 bit、サンプリング周波数100 Hzにて、全300秒間（トリガ検知前30秒から検知後270秒）の加速度波形を収録する。



第1図 構造ヘルスマニタリング (SHM) システムの概要図
Fig. 1 Outline diagram of the structural health monitoring system



第2図 地震計（加速度センサ）の構成
Fig. 2 Structure of seismograph (acceleration sensor)

SHM用地震計の周波数特性は、一般的に高振動数側で20 Hzまでカバーできればよいことから[9]、周波数特性がDC~22 Hzとなるように、加速度センサの帯域設定を行った。本設定条件下でのセンサ単体のノイズレベルは、RMS値（Root Mean Square：全振幅の2乗平均値の平方根）で0.78 cm/s²程度と予測される（当センサメーカー提供の簡易シミュレータを用いた解析結果）。また、センサの温度特性により、収録波形に原点±0.2 (cm/s²)/°C程度のずれ（温度ドリフト）を生じる可能性がある。

安価なMEMS加速度センサを用いた本地震計では、上述のノイズ成分を含む加速度波形が収録されることになる。収録された加速度波形を2階積分して変位波形を求める際に、収録データに含まれるノイズレベルに応じて変位波形に誤差が生じる。特に低振動数域のノイズ成分は、積分により飛躍的に波形振幅が増大するため、対象建物の振動応答評価に影響しない範囲で低振動数域のノイズを適切に除去し、住宅構造診断に適用可能な層間変位の解析精度を確保する必要がある。本システムでは、収録波形のフーリエスペクトルに(1)式のバンドパスフィルタBPF(f) (Butterworth Filter) [5]を乗じて、f_L以下およびf_H以上の振動数成分を減衰させる。

$$BPF(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_H}\right)^{2n}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{f_L}{f}\right)^{2n}} \dots \dots \dots (1)$$

f: 対象とする振動数 [Hz]
n: 次数 (本システムでは=4に固定)
f_L: ローカット遮断振動数 [Hz]
f_H: ハイカット遮断振動数 [Hz]

2.2 住宅構造診断への適用のための課題と工夫

[1] 複数センサ間の収録データ時刻補正

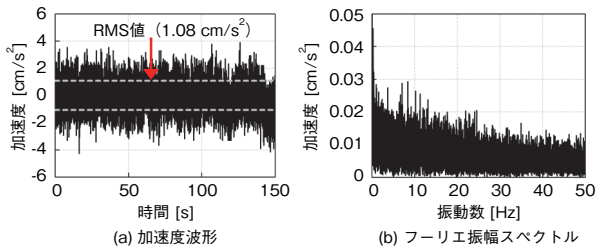
地震計間の時刻情報にばらつき（以下「同期ずれ」と記す）（第1図に示すτ_c）がある場合は、各階変位波形の差分から層間変位波形を適切に求めることができず、損傷の有無・程度が誤って評価される。実用上τ_c=1/100秒以下におさえる必要があるため、本システムでは、NTP (Network Time Protocol) サーバにアクセスすることで各地震計の時刻情報の補正（以下「同期補正」と記す）を都度行っている。これにより、ネットワークの状態が安定している環境では、数ミリ秒以下の同期精度を期待できる[3]が、停電などでネットワークが正常に機能しない場面では、NTPサーバによる同期補正処理が適用されない。

そこで、本システムでは上記機能に加えて、複数収録波形の相関に基づき事後処理により同期補正を行う新たな手法も適用した。第3章に提案手法の詳細を示す。

(注2) Raspberry Pi はRaspberry Pi財団の商標。

[2] センサノイズの影響 (収録データの解析精度)

第2図に示す地震計試作品で収録された、静止状態での加速度波形および当該波形のフーリエスペクトルの一例を第3図に示す。実振動時の収録データには、広い振動数帯域に同程度の強度をもつノイズ成分 (ホワイトノイズ) が含まれることが予測される。複数の試作品で確認した結果、本システムのノイズレベルは前述 (2.1節) の予測値よりも若干大きく、最大で $3 \text{ cm/s}^2 \sim 6 \text{ cm/s}^2$ 程度、RMS値で $1 \text{ cm/s}^2 \sim 2 \text{ cm/s}^2$ 程度であった。また、恒温槽を用いた試作品の評価では、前述 (2.1節) のとおり、 $\pm 0.1 (\text{cm/s}^2)/^\circ\text{C} \sim 0.2 (\text{cm/s}^2)/^\circ\text{C}$ 程度の温度ドリフトの発生が確認された。



第3図 静止状態における収録データ例 (ノイズ波形)

Fig. 3 Example of recorded data in the stationary state (noise waveform)

これらの確認結果に基づき、本システムでは、(1)式で $f_L=0.5 \text{ Hz}$ に設定し、層間変位波形振幅の解析誤差を $\pm 1 \text{ mm}$ 以下におさめる。本設定根拠として、ノイズレベルと層間変位波形の誤差の関係について解析的に検討した結果を第4章に示す。

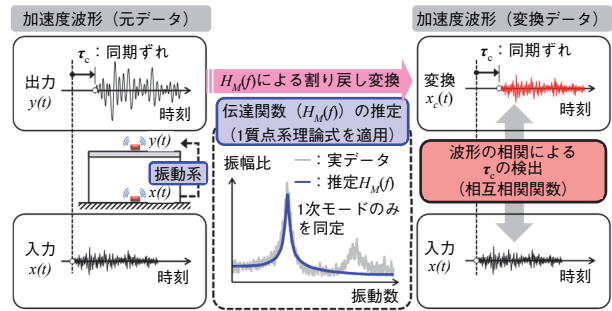
3. 波形の相関による同期補正法の提案

3.1 提案手法

ある振動系に対して入出力関係にある加速度波形 (第1図の例では、入力=Ch1, 出力=Ch2・Ch3の関係) が非同期収録されている場合に、同期補正を精度良く行うための簡便な手法を提案する。第4図に処理手順を示す。

入力 $x(t)$ に対して、変換出力 $x_c(t)$ を時間軸方向にシフトしながら波形間の相関を求め (相互相関関数)、相関が最大となるシフト時間を同期ずれ τ_c として検出する。

一時的なネットワーク不具合による同期ずれ (2.2節 [1] 項の観点) は、数秒程度 (10秒以下) におさまると仮定して、今回は最大シフト時間 (同期ずれの探索範囲) を ± 20 秒に設定したが、その妥当性については今後検証が必要である。原理的には、相互相関関数の計算範囲が入出力波形の時間長を超えない範囲で、探索範囲を任意に拡張することができる。



第4図 提案する同期補正法の処理手順

Fig. 4 Synchronization correction method procedure

なお、本手法は、層間変位波形の評価に影響を及ぼす波形間の“相対的な”同期ずれを対象とした同期補正法であり、絶対時刻に対する補正が目的ではないことに注意されたい。

3.2 本手法の特徴

同期ずれの検出に相互相関関数を用いる点は既往研究[6]と同じだが、本手法の主な特徴は、振動系の振動特性 (伝達関数 $H_M(f)$: 波形に含まれる各振動数成分について、出力/入力の振動増幅率 (振幅比) と振動伝達の遅れ (位相差) を表す関数) を加速度記録から同定し、出力波形側を当該伝達関数により割り戻す処理が介在する点にある。本処理により、原理的には両波形の形状が等しくなることで、波形間の相関評価の精度、つまりは同期ずれの検出精度を向上することができる。

また、伝達関数 $H_M(f)$ の推定において、実データから求めた振幅比をターゲットとした点も本手法の特徴である。これは、入出力データ間に同期ずれがある場合、位相差は同期ずれの影響により大きく乱れる一方で、振幅比への影響は比較的少ないためである。同期ずれにより失われた実データの位相差情報が、 $H_M(f)$ を介して復元されることで、出力波形を適切に割り戻すことができる。

$H_M(f)$ の推定には1質点系モデルの理論式を適用し、低振動数域 (1次モード) のみを対象にモデルパラメータを同定する。そのため、相互相関関数評価時には、各波形に (1) 式の $BPF(f)$ を適用し、 $H_M(f)$ 推定範囲外である高振動数成分を除去する。今回は、 $H_M(f)$ の1次固有振動数 f_0 に対して、 $f_L=0 \text{ Hz}$ 、 $f_H=\sqrt{2} \cdot f_0 \text{ Hz}$ を設定した。

なお、本提案理論の妥当性は、別途文献[4]のなかで、数値例題と実建物の地震観測データを用いて検証しており、今回開発した地震計システムの仕様限定されることなく適用可能な手法である。

4. ノイズレベルと解析精度の関係評価

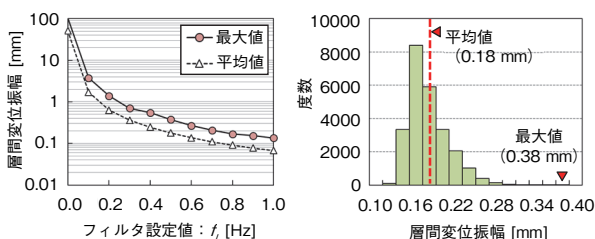
4.1 検討方法

収録された加速度波形を2階積分して得られた各階変位波形の差分から層間変位波形を求める際に、収録データに含まれるノイズレベルに応じて層間変位波形に誤差が生じる。各加速度波形は、実振動波形とノイズ波形の足し合わせで表すことが可能であるため、前述の誤差レベルを確認するには、実振動成分を除いたノイズ成分のみの各加速度波形に一連の処理を行って得られる層間変位波形の振幅の大きさに着目すればよい。

第3図に示す実波形に基づき、本検討ではホワイトノイズを擬似的なノイズ波形として用いる。位相特性の異なる100波のホワイトノイズ（RMS値=1.0 cm/s²、時間長=81.92秒（0.01秒ピッチ））のなかから2つの波形を選択し、層間変位波形を解析する。その際、一方の波形は振幅レベルを1.0倍、0.5倍、0.25倍と変化させることで、センサ間のノイズレベルの違いも考慮する。波形および振幅レベルの組み合わせが異なる24750パターン（=4950（100波から2波を選択する組み合わせ）×5（一方が1.0倍、他方が1.0～0.25倍の振幅レベルの組み合わせ））で検討を行う。また、積分時に適用する（1）式のBPF(f)は、 $f_H=20$ Hz（固定：2.1節の周波数特性より）、 $f_L=0$ Hz～1.0 Hz（変動）に設定する。

4.2 検討結果

本検討で得られた、設定 f_L と層間変位振幅の最大値（全24750パターンの最大値および平均値）との関係を第5図(a)に示す。例えば、縦軸の値を2倍にすると、RMS値=2 cm/s²の層間変位振幅に対応する。



(a) 全24750パターンの最大値・平均値 (b) $f_L=0.5$ Hzの場合（ヒストグラム）

第5図 ノイズ波形（RMS値=1.0cm/s²）による層間変位振幅
Fig. 5 Interlayer displacement amplitude by noise waveform
(RMS = 1.0 cm/s²)

低振動数成分を減衰させなければ、層間変位振幅の乱れが飛躍的に増大するため、本来の振動特性を損なわない範囲で極力 f_L を高めに設定することが望ましい。日本の大部分の建物（木造、鉄筋コンクリート造（ぞう））の

弾性周期が0.2秒～0.5秒（2 Hz～5 Hz）であり、かつ建物の大きな被害（全壊・大破）と相関をもつ地震動の周期帯が1秒～1.5秒（0.7 Hz～1 Hz）である[7]ことを受けて、本システムでは $f_L=0.5$ Hzに設定した。これにより、前述（第2章）のノイズレベル（RMS値=1 cm/s²～2 cm/s²）から推定される層間変位振幅の誤差は最大で±0.38 mm～0.76 mmとなり、±1 mm以下（層高さ=2.5 mの場合、層間変形角=1/2500 rad）におさまることが第5図から推定できる。層の降伏変形角（弾性限界）が1/400 rad～1/200 rad程度である[7]ことを考えると、住宅用SHMシステムにおける損傷度診断精度にほとんど影響のない誤差レベルである。

なお、本検討では、前述（第2章）の温度ドリフトを考慮していないが、ドリフト成分はフィルタ処理（ f_L ）によって、0 Hz（DC）の振動成分として同時に除去されるため、上述の検討結果には影響しない。

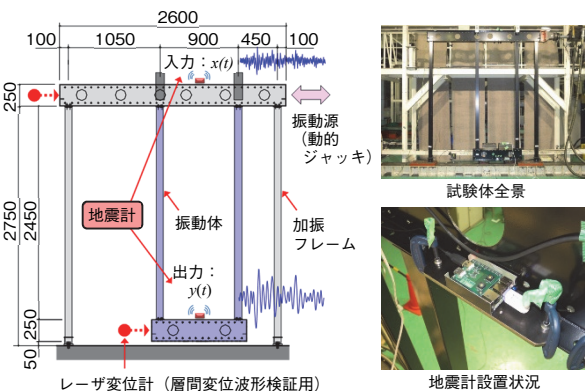
また、ノイズレベル-積分時フィルタ条件-層間変位解析誤差の対応関係を明らかにした本検討結果は、今回開発した地震計システムの仕様限定されることなく適用可能な知見である。

5. 実験による検証

本地震計システムの試作品（第2図）を用いた加振実験を行い、前章までの提案内容の妥当性を検証する。

5.1 実験概要

第6図に試験体と実験方法の概要を示す。本試験体は、加振フレーム、振動体ともに角形鋼管柱（□-80×80×3.2 mm）の鉛直材とH形鋼梁（H-250×100×4.5×6.0 mm）の水平材で構成される。振動体下部の梁には約120 kgの錘（おもり）を設置する（振動体の固有振動数=約4 Hz



第6図 地震計システムの加振実験方法

Fig. 6 Excitation experiment method of earthquake measurement system

(実測値))。

加振フレーム上部に接合した動的ジャッキによる加振を振動源(入力波形 $x(t)$)として、振動体下部が応答(出力波形 $y(t)$)する。本地震計システムで入出力波形を収録し、前述の方法により層間変位波形(以下「積分変位」と記す)を求めるとともに、加振フレーム上部および振動体下部にはレーザ変位計を設置し、層間変位波形を直接的に計測する(以下「計測変位」と記す)。積分変位と計測変位の比較により、解析精度を確認する。

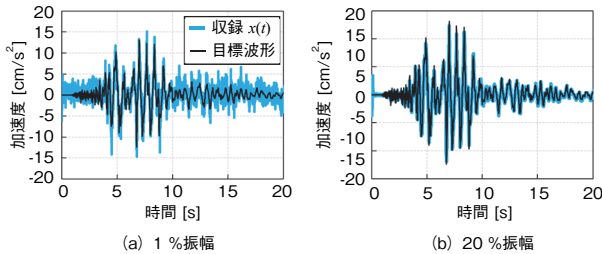
入力波形には、2004年10月23日の新潟県中越地震発生時にK-NET小千谷[8]で観測された東西方向の地震波を採用し、原波形の1%または20%振幅にて加振を行う。

本実験では、地震計間の時刻同期を事前に確認することで、同期ずれ τ_c がないデータを収録する。第3章の同期補正法を検証するため、出力側の時刻をシフトし、 $\tau_c=0$ 秒~10秒(1秒ピッチ)の擬似データを生成する。

5.2 実験結果

[1] 地震計システムの波形データ記録精度

目標入力波形と収録波形 $x(t)$ の比較を第7図に示す。前述(第2章)のとおり、収録データにはノイズ成分が混在するものの、波形全体としては良好に適合しており、実振動の特性が正確に記録されていることがわかる。



第7図 入力波形 (K-NET小千谷観測波 (EW方向))
Fig. 7 Input waveform observed at K-NET Ojiya (EW direction)

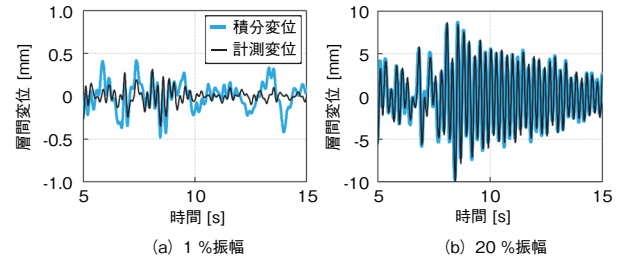
[2] 層間変位波形の解析精度

積分変位と計測変位の比較を第8図に示す。20%入力時(同図(b))の誤差(最大振幅時)は0.41 mmであり、波形全体の形状も良好に適合している。1%入力時(同図(a))の波形を見ると、全体的に ± 0.5 mm以下の乱れが生じていることがわかる。層間変位波形振幅の解析誤差は目標の ± 1 mm以下におさまっており、前述(第4章)の検討結果の妥当性が確認された。

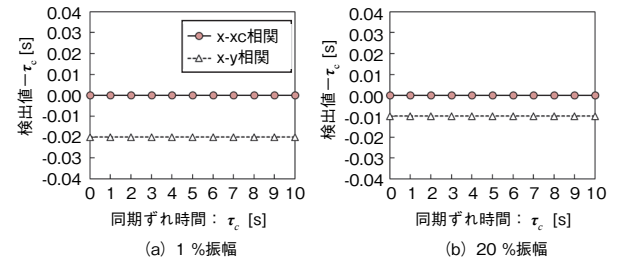
[3] 同期ずれ時間の検出精度

第9図に、第3章の手法を適用して検出された同期ずれ時間と正解値 τ_c との差異を示す(図中の $x-x_c$ 相関)。比較のため、出力波形の変換を行わずに検出した結果(図中

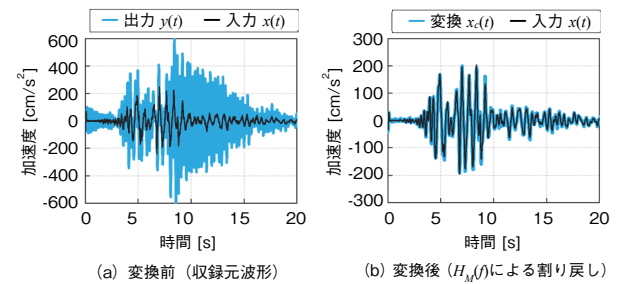
の $x-y$ 相関:文献[6]の手法に該当)も併せて示す。本提案手法により、同期ずれ時間の検出精度が向上したといえる。第10図に変換処理前後の出力波形の比較例を示す。伝達関数による割り戻し処理が、入出力波形間の相関評価の向上に効果を発揮していることがわかる。



第8図 層間変位波形
Fig. 8 Interlayer displacement waveform



第9図 同期ずれ時間の検出結果(正解値(τ_c)との差異)
Fig. 9 Detection result of synchronization deviation time (difference from τ_c)



第10図 変換前後の出力波形(20%振幅入力, $\tau_c=0$ 秒)
Fig. 10 Output waveform before and after conversion (20% input, $\tau_c=0$ s)

6. まとめ

安価なMEMS型3軸加速度センサと無線通信(Wi-Fi)を用いた簡易な地震計システムを開発し、加振実験により住宅構造診断への適用性を確認した。

本稿では、ローカルエリアネットワーク内の地震計がもつ時刻情報ばらつきを精度良く補正するための新たな手法として、収録波形の相関に基づく同期補正法を提案

した。また、収録波形に含まれるセンサノイズの影響について解析的に検討を行い、ノイズレベル-積分時フィルタ条件-層間変位解析誤差の対応関係を明らかにした。これらの知見を活用すれば、今回開発した地震計システムの仕様に限定されることなく、費用の制約が厳しい個々の住宅にまで普及可能な、簡便かつ安価なSHMシステムの実現が期待できる。

今後は、本システムの試作品を複数の実住宅（全国住宅展示場など）に設置し、実フィールドの地震データ収集と長期的な動作検証を行うことで、実用化に向けた課題抽出とさらなる簡易化への改善検討を進める予定である。

本研究では、(国研)防災科学技術研究所「強震観測網(K-NET, KiK-net)」の公開データ[8]を利用させていただきました。ここに感謝の意を表します。

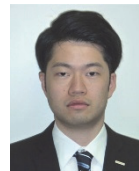
参考文献

- [1] 国土技術政策総合研究所(多世代利用総プロ管理技術WG), 多世代利用住宅の維持管理・流通を支える構造ヘルスマonitoring技術の利用ガイドライン(案), 国土交通省, 2011.
- [2] シンポジウム「建物の構造・機能評価に関するモニタリング技術の現状」, (一社)日本建築学会, Feb. 2017.
- [3] 鈴木誠 他, “無線センサネットワークにおける時刻同期技術の研究動向,” 東京大学先端科学技術研究センター, 森川研究室 技術研究報告書, no. 2008001, Apr. 2008.
- [4] 佐田貴浩 他, “構造ヘルスマonitoringにおける複数振動波形記録の事後同期補正法,” 日本建築学会構造系論文集, 第82巻, 第742号, pp. 1873-1883, 2017.
- [5] 楠浩一 他, “リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発のための加速度積分法,” 日本建築学会構造系論文集, 第68巻, 第569号, pp. 119-126, 2003.
- [6] 上部達生 他, “大水深フィルタイプ防波堤の強震観測, 動水圧観測とその記録の解析,” 土木学会論文集, 第362号/I-4, Oct. 1985.
- [7] 境有紀, “地震動の性質と建物被害の関係,” 日本地震工学会誌, 第9号, pp. 12-19, Jan. 2009.
- [8] (国研)防災科学技術研究所, “強震観測網(K-NET, KiK-net),” <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>, 参照 Oct. 20, 2018.
- [9] (一社)日本建築学会強震観測小委員会, “強震観測の手引,” <http://wiki.arch.ues.tmu.ac.jp/KyoshinTebiki/>, 参照 Oct. 20, 2018.

執筆者紹介



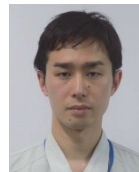
佐田 貴浩 Takahiro Sada
パナソニック ホームズ (株)
R&Dセンター
R&D Center, Panasonic Homes Co., Ltd.



岸本 和貴 Kazuki Kishimoto
パナソニック ホームズ (株)
R&Dセンター
R&D Center, Panasonic Homes Co., Ltd.



藤野 崇史 Takafumi Fujino
エコソリューションズ社 技術本部
Engineering Div.,
Eco Solutions Company



野村 建太郎 Kentaro Nomura
エコソリューションズ社 技術本部
Engineering Div.,
Eco Solutions Company