

オープンソースハードウェアを用いた構造モニタリングに関する研究

実大3層鉄骨構造物計測実験におけるジャイロセンサ計測結果の補正方法の検討

○古泉 一希*¹ 谷 明勲*²
山邊 友一郎*³

キーワード:

ジャイロセンサ 性能モニタリング フィルタ処理 オープンソースハードウェア 加速度センサ

1. はじめに

日本は世界有数の地震大国である。1995年の阪神・淡路大震災や、2011年の東日本大震災も記憶に新しい。

大地震発生直後には、建築構造物の余震等による二次災害防止のため、各種調査¹⁾³⁾が行われるが、その調査方法は主に目視によるものであり、天井裏や仕上げ材等で被覆された構造部材の調査には多くの人手と時間を要する。また、被災建物に残留変形が無く建物使用に支障が無い場合でも、構造部材が損傷している場合があることが考えられる。このような建築構造物の被災度診断を行う構造的モニタリングシステムが開発⁴⁾⁷⁾されているが、まだ一般の建築物に普及する状況には至っていない。

近年、情報通信技術(ICT)の発展に伴い、センサや種々のシステムを用いた建築構造物の性能モニタリングに関する研究が、計画・構造・環境の各分野で活発に行われている⁸⁾¹¹⁾。このような状況を踏まえ、既報¹²⁾では、被災建物の構造部材の損傷を、短時間で容易に検出できる手法として、比較的安価で容易に入手可能なセンサとオープンソースハードウェア(Open Source Hardware:以下 OSHW)を用いて、無線通信機能を備えた建築構造的モニタリングシステムを構築し(以下試作システム)、実大鉄骨構造物の振動台実験に試作システムを設置し、床面の加速度、梁端部材回転角の計測を行った。さらに、計測結果を基に、試作システムによる建物損傷度合の経過や、H形鋼梁端部の破断検出能力に関する検討を行うとともに、試作システムの構造的モニタリングへの適用可能性の検討を行った。

本研究では、既報¹²⁾で課題となったジャイロセンサの計測結果の補正方法に関して追加検討を行い、その適用性を検討した。

2. 計測装置

2.1 OSHW

本研究では、OSHWの一つである Arduino 使用する。表1に Arduino 基板上に配される主なピンの種類と機能を示す。Arduino では、Arduino 独自のプログラミング言語と Processing をベースとした Arduino 開発環境を用いて、専門知識の少ない一般の人でも比較的容易にプログラミングを行うことができる。

なお、Arduino は、アナログとデジタルの入出力ポートを有しており、各種センサを容易に接続できるが、本シ

テムでは I2C 接続によるデジタルセンサを用いて試作システムを構築した。

表1 Arduino 基板上のピンの種類と機能

ピン	機能
デジタル IO ピン (pin 0-13)	HIGH、LOW のデジタル値の入出力ポートとして任意に設定可。
アナログ IN ピン (pin 0-5)	アナログ入力値 = {入力電圧(0~Vdd)/Vdd}×1024
Vdd	電圧出力 5V or 3.3V
GND	基準電位 0V

2.2 ジャイロセンサ(IMU Fusion Board)

IMU Fusion Board¹³⁾は、3軸ジャイロセンサ(IMU3000)を搭載した IMU(慣性計測装置)で、デジタル加速度センサと I2C マスターポートのインターフェースを有する Digital Motion Processor™ (DMP™)のハードウェアアクセラレータエンジンで、プライマリ I2C に接続した 3軸ジャイロセンサ(IMU3000)と 3軸加速度センサ(ADXL345)のデータを融合し、6軸のデータとして出力をする機能を備えている。IMU Fusion Board の特性を表2に示す。

表2 IMU Fusion Board の特性¹³⁾

測定軸	・3軸加速度 ・角速度	レートノイズ (dps/√Hz)	0.01
出力	I2C	消費電力(mW)	12
感度 (LSB/°/sec)	131 65.5 32.8 16.4	フルスケールレンジ (°/sec) / (g) 任意に選択可	±250/±2 ±500/±4 ±1000/±8 ±2000/±16
クロック誤差(%)	1.0	電源電圧(VDC)	2.1~3.6

3. 実大3層鉄骨ラーメン構造物加振実験概要

図1に示す実大3層鉄骨構造物に、鷹取波 60%、80%、100%、想定南海トラフ波 50%、100%、150%の加振波を入力し計測を行った。

図2にジャイロセンサの配置位置を示す。ここでは、梁端回転角(ジャイロセンサ G01~G08)の 8箇所の計測を行った。図3にセンサの設置方法とジャイロセンサの計測角速度の詳細を示す。なお、試作システムのサンプリング時間は 33ms とした。



図1 実大3層鉄骨構造物

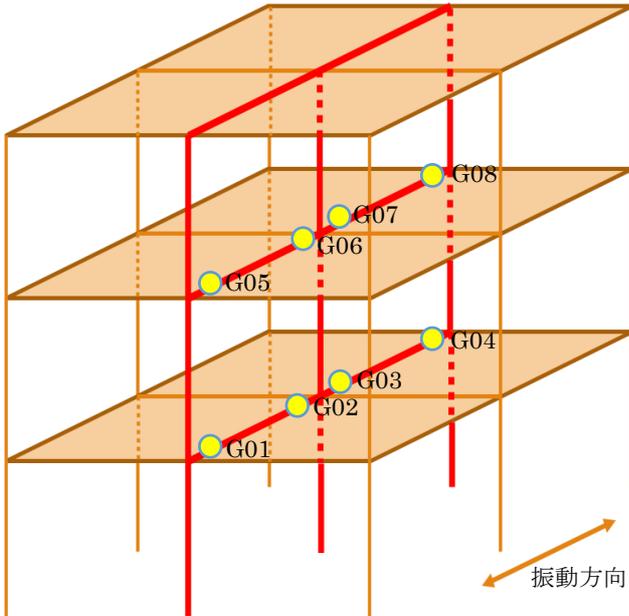


図2 ジャイロセンサの設置位置

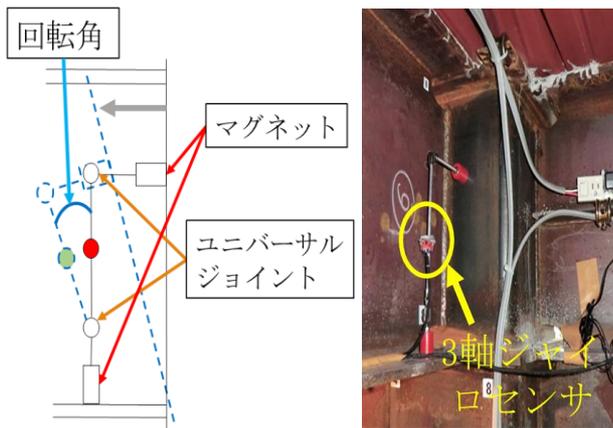


図3 センサ設置方法

4. 補正方法

4.1 最小二乗法

図4に示すように、ジャイロセンサの計測結果には基線のドリフトが見られる。このため、既報では表計算ソフトを用いて最小二乗法により直線式 $y=ax+b$ で時刻歴波形のドリフトの傾きを求め補正を行った。図4に、既報¹²⁾で行

った最小二乗法による補正例を示す。

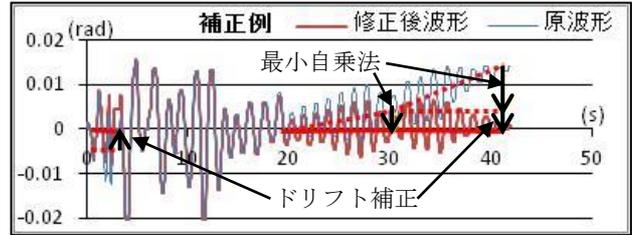


図4 基線補正方法

4.2 フィルタ処理

本研究では、ジャイロセンサによって計測した角速度を積分することで角度を算出しているが、ジャイロセンサの持つ計測特性などによる影響で角速度にノイズが生じるため、ハイパスフィルタ（高域通過フィルタ）とローパスフィルタ（低域通過フィルタ）を用いて角速度応答結果のもつ長周期成分と短周期成分をカットする。使用するフィルタは、式(1)で表される Butterworth Filter¹⁴⁾を用いる。Butterworth Filter は、通過帯域では平坦な振幅特性を持ち、位相特性も線形に近いという特徴を持つ。

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega_H}{\omega}\right)^{2N}} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_L}\right)^{2N}} \dots (1)$$

式(1)中の N はフィルタの次数で、 ω_H 、 ω_L は遮断周波数と呼ばれ、 ω_H はハイパスフィルタの遮断周波数、 ω_L はローパスフィルタの遮断周波数である。これらのパラメータで Butterworth Filter は形状が変化し、次数が高次になるに従って遮断周波数へ向かう傾斜が急になる特徴を有している。しかし、過去の検討¹⁵⁾で Butterworth Filter の形状は、遮断周波数に大きく影響されることが分かったため、本研究では、既報¹⁵⁾と同様に次数 $N=4$ で一定値と設定し、遮断周波数 ω_H 、 ω_L についてのみ検討を行う。

5. 実験結果

5.1 建物損傷状況及び梁端回転角計測結果

図5、6に梁端回転角の時刻歴波形を、表3にG01~G08の既報の修正方法¹²⁾による最大計測誤差を示す。なお、比較対象として、別途設置されたワイヤ式変位計による計測角度を用いている。また、計測誤差は式(2)で算定した。

鷹取 100%加振時に G01、G04、G08 の部分の大梁フランジが破断し、G05 の部分の大梁フランジに亀裂が生じた。

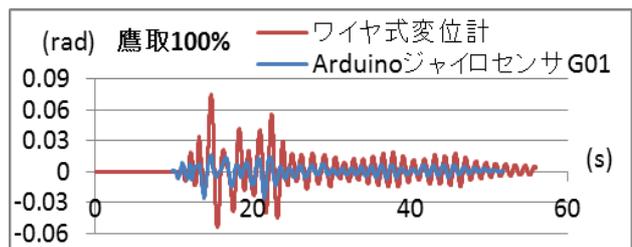


図5 鷹取 100%加振時 G01 計測角度¹²⁾

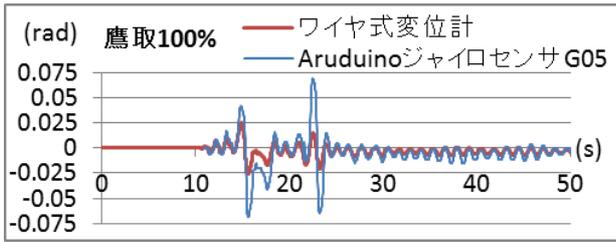


図6 鷹取 100%加振時 G05 計測角度¹²⁾

表3 梁端回転角最大計測誤差¹²⁾

G01	G02	G03	G04
65%	38%	50%	75%
G05	G06	G07	G08
229%	35%	33%	141%

$$\text{梁端回転角最大計測誤差} = \frac{|A. \text{MAX}| - |W. \text{MAX}|}{|W. \text{MAX}|} \dots (2)$$

A.MAX: A01~A03, G01~G10 計測値の絶対値の最大値

W.MAX: ワイヤ式変位計の計測値の絶対値の最大値



図7 損傷時センサ状況

表3に示すように、既報の修正方法では計測誤差が最大で229%と大きな誤差が見られた。一方、破断の生じていない部分に設置したセンサでは、比較的誤差は小さかった。しかし、図5、6に示すように、試作システムとワイヤ式変位計による計測角度の位相はほぼ一致しているが、試作システムの計測結果で振幅が小さい場合(図5)と大きい場合(図6)が混在し、破断を検出することが困難であると思われる。この差は、図7に示すように梁フランジ部の座屈によるセンサ設置部のずれによるものと考えられる。

5.2 フィルタ処理の結果

以下に、本報で提案したフィルタ処理を行った角速度と、その角速度を積分して算出した梁端回転角の結果を示す。

まず、図8にG01で計測した角速度(G01)と、その角速度をフィルタ処理した結果(wh=0.2 wl=2Hz)を比較した時刻歴波形を示す。また、図9~12に各センサのフィルタ処理前の計測角速度を積分した梁端回転角(図9, 10:G01, 図11:G04, 図12:G06)と、フィルタ処理を行った計測角速度を積分して算出した梁端回転角(図9:wh=0.2 wl=1Hz, wh=0.15 wl=3Hz, 図10: wh=0.2 wl=2Hz, 図11: wh=0.1 wl=2Hz, wh=0.2 wl=2Hz 図12: wh=0.5 wl=0.8Hz, wh=0.6 wl=0.8Hz)、さらにワイヤ式変位計から算出した梁端回転角(図9~12:ワイヤ式変位計)を比較した時刻歴波形を示す。

なお、フィルタ処理の有効な遮断周波数については、フィルタ処理をした角速度を積分して算出した梁端回転角のドリフト

が無くなり、かつ、オフセットが最も小さくなった場合を有効な遮断周波数とした。

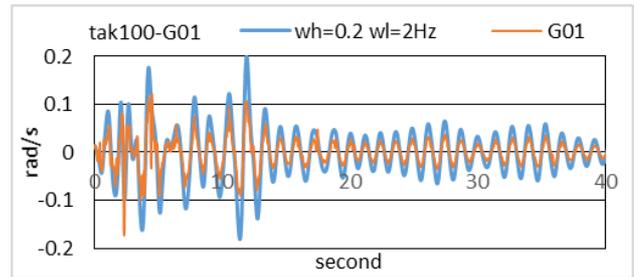


図8 鷹取 100%加振時 G01 計測角速度(遮断周波数 wh=0.2Hz, wl=2Hz の場合)

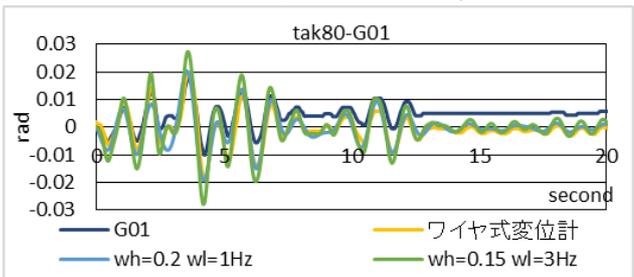


図9 鷹取 80%加振時 G01 計測角度(遮断周波数 wh=0.2Hz, wl=1Hz, 及び遮断周波数 wh=0.15Hz, wl=3Hz の場合)

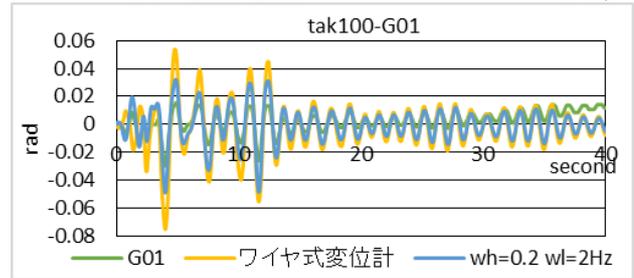


図10 鷹取 100%加振時 G01 計測角度(遮断周波数 wh=0.2Hz wl=2Hz の場合)

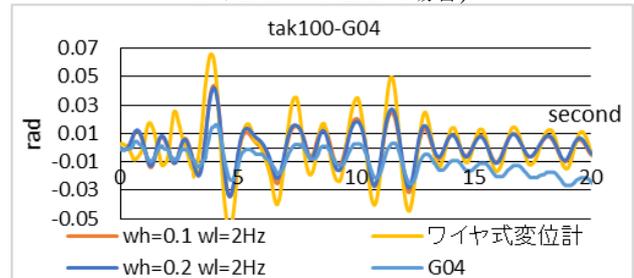


図11 鷹取 100%加振時 G04 計測角度(遮断周波数 wh=0.1Hz, wl=2Hz, 及び遮断周波数 wh=0.2Hz, wl=2Hz の場合)

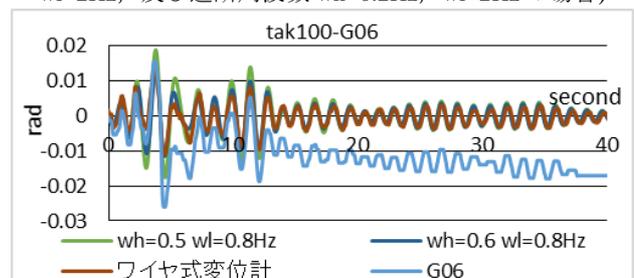


図12 鷹取 100%加振時 G06 計測角度(遮断周波数 wh=0.5Hz wl=0.8Hz, 及び遮断周波数 wh=0.6Hz, wl=0.8Hz の場合)

5. まとめ

本研究では、実大鋼構造物の振動台実験で OSHW を用いた試作システムのジャイロセンサを用いた梁端回転角の計測値のフィルタ処理を用いた補正方法について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 角速度に関しては、図 8 からわかるように、提案手法で計測結果の補正が適切に行えることがわかった。
- ② 各センサにおいて、フィルタ処理した角速度を積分して算出した梁端回転角では、図 9～12 からわかるように、ドリフトは生じず、適切に補正されていることがわかる。最小二乗法では手作業の補正となるため、個人差が出やすいが、その点今回のフィルタ処理はプログラムで実行可能で、容易にかつ安定した補正が可能であることがわかった。
- ③ 遮断周波数ごとにフィルタ処理した角速度では、加振波の種類やセンサ設置位置によって有効な遮断周波数が異なる結果となったが、傾向として 2 階梁に設置した G01～G04 のセンサにはハイパスフィルタの遮断周波数は 0.2Hz～0.3Hz、3 階梁に設置した G05～G08 のセンサにはハイパスフィルタの遮断周波数は 0.5Hz～0.6Hz が有効であることがわかった。
- ④ ドリフトに関しては、ハイパスフィルタのみで処理することができることがわかったが、オフセットの処理に関してはハイパスフィルタとローパスフィルタの遮断周波数の組み合わせによるため、多くの検証が必要となった。さらに、図 9 を拡大した図 13 のように鷹取波 60%、80% の波形ではローパスフィルタの遮断周波数が 1Hz 以下になると 2～3s の波形の位相がワイヤ式変位計から求めた梁端回転角の位相と異なる場合も見られ、ローパスフィルタの遮断周波数は 1Hz よりも大きい方がよいと考える。

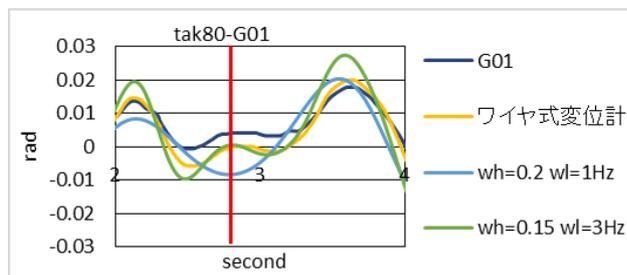


図 13 ローパスフィルタの遮断周波数による位相の差

以上より、本報で提案したフィルタ処理を行うことでジャイロセンサの計測結果のドリフト補正が容易にできることがわかった。しかし、有効なフィルタの遮断周波数の特定には、今後更なる検証が必要と考えられる。

また、上記の遮断周波数の問題に加え、振幅の値の妥当性と、そこからの破断の判断基準についても、今後さらに検討する必要がある。

[謝辞]

本実験は、兵庫県と防災科学技術研究所の共同研究として実施した。また、本研究の一部は、日本学術振興財団科学研究費補助金基盤研究(C)：課題番号 23510201、及び課題番号 25420581 の援助の下に行われた。

[参考文献]

- 1) 日本建築防災協会、全国被災建築物応急危険度判定協議会：被災建築物応急危険度判定マニュアル、1998.1.
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課監修、日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針(各種構造)、2001.9.
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課監修、日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針(木造編)、2003.1.
- 4) 谷明勲、山邊友一郎、河村廣：センサ付き無線 IC タグ応用のユビキタス建築構造ヘルスマonitoring 構想—加速度センサ実験に基づく応用システムの構築—、日本建築学会、総合論文誌、No.4, pp.111-116, 2006.2.
- 5) 飯場正紀、阿部秋男、花井勉、皆川隆之：低コスト・小型地震計の性能確認と戸建て住宅の地震時挙動観測への適用、日本地震工学会論文集、第 7 巻、第 2 号(特集号：震度計と強震計データの利活用)、pp.57-67, 2007.3.
- 6) 熊谷仁志、岡田敬一：層間変位モニタリングによる地震後の建物健全性診断、日本コンクリート工学協会、コンクリート工学、Vol.45, No.4, pp.10-15, 2007.4.
- 7) 倉田成人、鈴木誠、猿渡俊介、森川博之：ユビキタス構造モニタリングシステムの実建物での実証実験、日本建築学会、学術講演梗概集 A-2, 防火、海洋、情報システム技術、pp.495-496, 2008.7.
- 8) 日本建築学会 情報システム技術委員会：ユビキタス技術で実現する性能モニタリングの展望、2007 年度日本建築学会大会(九州) 情報システム部門研究協議会資料、2007.8.
- 9) 日本建築学会 情報システム技術委員会：スマートな情報通信技術で実現する建築性能モニタリングの未来像、2010 年度日本建築学会大会(北陸) 情報システム部門研究協議会資料、2010.9.
- 10) 日本建築学会 情報システム技術委員会：東日本大震災から情報システム技術を考える—情報共有、復旧・復興からスマートシティまで—、2012 年度日本建築学会大会(東海) 情報システム部門研究協議会資料、2012.9.
- 11) 日本建築学会 情報システム技術委員会：建築におけるセンシングからビッグデータまでを考える、2013 年度日本建築学会大会(北海道) 情報システム部門研究協議会資料、2013.8.
- 12) 古泉一希、谷明勲、山邊友一郎：オープンソースハードウェアを用いた実大構造物の建築構造モニタリングに関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集、Vol.54, 構造系、pp.161-164, 2014.6
- 13) <http://datasheet.octopart.com/IMU-3000-InvenSense-datasheet-11764422.pdf> (2015 年 10 月 9 日アクセス)
- 14) 加川幸雄：アナログ/デジタル・フィルタ、科学技術出版社、1981.
- 15) 宇賀治元樹、谷明勲、山邊友一郎：センサ付き RFID を用いた建築構造性能モニタリングシステムに関する研究、一計測された加速度波形の積分による変位算出—、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp.527-528, 2009.8.

- *1 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生
- *2 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 教授
- *3 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授