

二軸振動実験による MEMS 6 軸地震センサの層間変形角推定精度の検証

東京理科大学 学生員 ○加藤 駿
東京理科大学 正会員 佐伯 昌之

1. 研究背景と目的

著者等は、地震発生直後に構造物の被災度を把握するため、MEMS 加速度・ジャイロセンサを搭載した安価な 6 軸地震センサを用いて、構造物の経験最大層間変形角を計測することを試みている¹⁾。

層間変形角はセンサの姿勢角として推定されるが、これは、角速度の時間積分による。ただし、ジャイロセンサにはバイアス誤差が含まれており、単純に積分すると姿勢角がふらつくという問題がある。そのため、カルマンフィルタを用いてバイアス誤差を逐次補正しつつ、姿勢角を推定する手法が用いられている²⁾。この手法では、角速度を積分することで得られる姿勢角は、加速度センサが計測する重力の分力を説明するように補正され、これを基にバイアス誤差も更新される。しかし、地震時には、重力の分力だけではなく地震による構造物の加速度も計測してしまうため、この加速度外乱がノイズとなる。

この手法を用いて著者の一人は、一軸正弦波振動実験を行うことでテストデータを取得し、ノイズとして地震応答を付加することで層間変形角の推定精度について検証を行った¹⁾。本研究ではさらに、地震時に近い状況を再現するために二軸振動実験を行い、カルマンフィルタを用いた層間変形角の推定精度を検証した。

2. 二軸振動実験によるテストデータの取得

二軸振動実験の様子を図-1 に示す。二軸振動台とフレームに接続した伸縮・傾斜可能な棒に MEMS 6 軸地震センサ (STMicro 社製の LSM6DSLTR を搭載) を固定した。

振動実験では、地震時の構造物の傾斜を再現するため、構造物の地盤に対する相対変位波形を振動台に読み込ませ、二軸方向にセンサを振動させることで、加速度と角速度のテストデータを取得した。それと同時に、層間変形角の真値を得るため、レーザー変位計を用いて振動台の水平変位を計測し、棒の長さで除すことで

層間変形角の真値を算出した。

なお、相対変位波形は、高さ 4m の木造構造物を想定し、1 質点系完全弾塑性モデルを仮定することで Newmark の β 法を用いて応答計算を行うことにより算出した。その際、質点の固有周期は 0.3s と 0.6s、減衰比は 0.05 とし、地震動は、気象庁の WEB サイトよりダウンロードした東日本大震災・熊本地震・大阪北部地震の 19 波形を用いた。これにより、合計で 38 波形の相対変位波形を得ている。

ここで、振動実験では、振動台のストロークが小さいため、加速度センサで本来計測されるはずの加速度外乱を再現できていない。そこで、地震時により近い状況を再現するため、実験後に地震による加速度外乱を加速度センサが計測したデータに付加した。この加速度と実験で得た角速度を用いて、カルマンフィルタにより層間変形角を推定した。

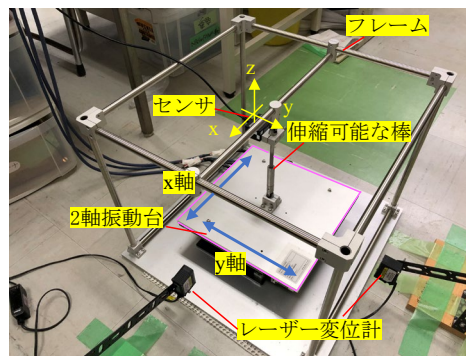


図-1 二軸振動実験の様子

3. カルマンフィルタを用いた姿勢角推定手法

1 章で述べたように、加速度センサは地震による加速度外乱も計測してしまうため、これがノイズとなり、姿勢角の推定精度が悪化する。そこで、2 章で作成した加速度波形に対して漸化式ローパスフィルタをかけ、1Hz 以上の加速度振幅を小さくすることで、加速度外乱を取り除くこととした。しかし、ローパスフィルタをかけても、動加速度成分を完全に除去することができず、カルマンフィルタによる角速度のバイアス補正がうまく

キーワード：二軸振動実験、層間変形角、MEMS、カルマンフィルタ

連絡先：〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 東京理科大学理工学部土木工学科：04-7124-1501

いかない. そこで, 加速度に関する観測ノイズの分散共分散行列 R_t を時間的に変化させ, ノイズが混入した場合には R_t を大きくすることで, 角速度に対する加速度の重みを相対的に小さくし, 角速度の積分によって姿勢角を推定し, ノイズの影響を低減することとした.

4. 姿勢推定の精度検証

応急危険度判定では, 木造構造物の場合, 層間変形角が 1/60rad (約 1deg) を超えると小破と判定される. そのため, 本研究では, 層間変形角の要求精度を 0.1deg とし, ΔP_{max} と RMS を用いて精度検証を行った.

$$\Delta P_{max} = |x_{i_{max}} - y_{i_{max}}| \tag{1}$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \tag{2}$$

ここで, x_i はレーザー変位計により推定した層間変形角の時系列, y_i はカルマンフィルタにより推定した層間変形角の時系列, N は 1 つの時系列波形のデータ数である.

ΔP_{max} の度数分布表を表-1 に, RMS の度数分布表を表-2 に示す. R_t を時間的に変化させることでノイズの影響が低減され, ΔP_{max} , RMS のそれぞれに対し, 多くの地震波形で要求精度を満たした. しかし, 図-3 のように層間変形角が精度良く推定されない波形もあった. 青線はカルマンフィルタにより推定した層間変形角, オレンジ線はレーザー変位計により推定した層間変形角であるが, 全体的に真値に対して過大に推定されており, ΔP_{max} は 0.29deg, RMS は 0.16deg となった. 特に, 比較的大きな加速度の発生後である 120s~140s の姿勢角はふらつきが大きくなっており, 他の地震波形の一部においても同様のことが起きている. このことから, ある程度の加速度に対しては, 精度良く推定することができるが, 大きな加速度に対しては, 観測ノイズの分散共分散行列 R_t の値が適切ではないため, 推定精度が劣化したと考えられる. そのため, R_t の設定方法について検証し, さらに工夫する必要がある.

5. まとめ

MEMS 加速度・ジャイロセンサを搭載した 6 軸地震センサを用いて二軸振動実験を行い, カルマンフィルタを用いて層間変形角を推定した. その結果, 多くの地

表-1 ΔP_{max} の度数分布表

ΔP_{max} [deg]	NS 方向 [波形]	EW 方向 [波形]
~0.1	34	28
0.1~0.2	3	3
0.2~	1	7

表-2 RMS の度数分布表

ΔP_{max} [deg]	NS 方向 [波形]	EW 方向 [波形]
~0.1	35	32
0.1~0.2	2	5
0.2~	1	1

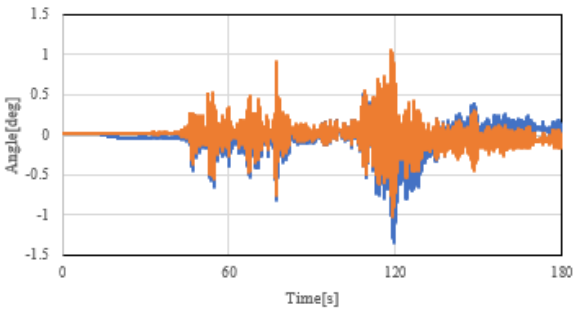


図-3 層間変形角の推定結果の一例

震波形において, 精度良く推定することができた. 今後は, 観測ノイズの分散共分散行列 R_t について更なる検証を行い, 推定精度の向上を図る.

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金 (基盤研究(C) : 18K04328) を得て行いました. また, 地震動記録に気象庁の強震観測を使用させていただきました. ここに記して謝意を表します.

参考文献

1) 石黒広倫, 佐伯昌之: MEMS 加速度・ジャイロセンサを用いた層間変形角の推定, 土木学会論文集 A2, 74 巻, 第 2 号, 2018

2) 鈴木智, 田原誠, 中澤大輔, 野波健蔵: 動加速度環境下における姿勢推定アルゴリズムの研究, 日本ロボット学会誌, Vol26, No.6, pp.626~634, 2008