

MEMS 6 軸地震センサによる層間変形角の推定と誤差モデルの検証

東京理科大学 学生員 ○石黒 広倫
東京理科大学 正会員 佐伯 昌之

1. 研究背景と目的

著者らは、MEMS 加速度・ジャイロセンサを搭載した安価な地震センサにより、地震時における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。

層間変形角はセンサの姿勢角として推定する。姿勢角は、角速度を時間積分することで求めるが、ジャイロセンサのバイアス誤差により、単純に積分すると姿勢角の推定値が発散するという問題がある。そのため、一般的には、カルマンフィルタを用いてバイアス誤差を推定しつつ、姿勢角を補正する手法が用いられる¹⁾。

この手法を用い、1 軸振動実験で得られたデータを解析したところ、姿勢角の時系列を精度よく推定することができた。ただし、状態方程式や観測方程式で仮定しているノイズモデルの妥当性は検証しておらず、本研究で用いた手法が、より一般的な振動状況においても適用可能かは不明である。そこで、角速度のバイアス誤差に着目して、本手法の妥当性を検証した。

2. 1 軸振動実験の概要と姿勢の推定結果

卓上振動台を用いて 1 軸方向にセンサを振動させた。振動台とフレームに接続した伸縮・傾斜可能な棒に MEMS センサ (STMicro 社製の LIS3DSH および L3G4200D を搭載) を固定し、単振動させた。同時に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傾斜角を計測し、これを真値とした。例として 1[Hz]で振動させ、姿勢角を推定した結果を図-1 に示す。この結果から、真値との差は要求精度

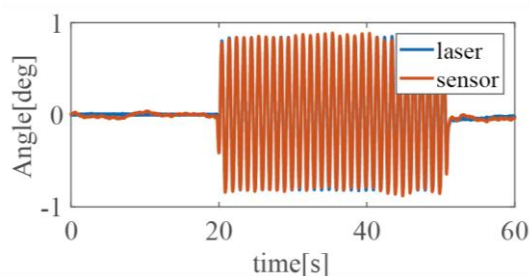


図-1 姿勢角の推定結果の一例 (1[Hz]振動)

の 0.1 [deg]以内となり、既存の解析手法を適用することで姿勢角を精度よく推定できることが分かった。

3. 解析に用いた 3 次元姿勢推定アルゴリズム

1 軸振動実験のデータから姿勢角を推定した手法を説明する。一般に、オイラー角の 3 成分 roll, pitch, yaw を $\psi(t) = [\phi, \theta, \psi]^T$ とすると、姿勢角の状態方程式は

$$\dot{\psi}(t) = \psi(t - \Delta t) + R_{Body}^{NEU}(t) \{ \omega_B(t) - b_g(t) \} \Delta t \quad (1)$$

となる²⁾。ここで R_{Body}^{NEU} はセンサの座標軸である Body 座標系から地上直交座標系である NEU 座標系への回転行列、 $\omega_B(t)$ は時刻 t においてセンサが取得した角速度 $\omega_B(t) = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ 、 b_g は角速度のバイアス誤差 $b_g(t) = [b_{gx}, b_{gy}, b_{gz}]^T$ である。

式(1)の姿勢角と角速度のバイアス誤差は、カルマンフィルタを用いて推定される。 $x = [\psi^T, b_g^T]^T$ を状態量とすると、式(1)は次式のように書き換えられる。

$$x(t + \Delta t) = x(t) + f(x)\Delta t + G\varepsilon\Delta t \quad (2)$$

ここで、既存の手法を参考にすると、各行列は次式のよう²⁾に仮定される。

$$f(x) = \begin{bmatrix} R_{Body}^{NEU}(t) \{ \omega_B(t) - b_g(t) \} \\ \beta b_g \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} -\beta_x & 0 & 0 \\ 0 & -\beta_y & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z]^T$ は角速度のホワイトノイズである。また、 β はセンサ固有のパラメータであり、バイアスの時間変化をモデル化している。

上記の姿勢角と角速度のバイアスは、加速度センサから推定される傾斜角と一致するように補正される。加速度センサの出力値 $y = [a_x, a_y, a_z]^T$ を観測量とすると、観測方程式は式(6)で表される。

$$y(t) = h(x) + v \quad (6)$$

ここで $h(x)$ は、姿勢角を用いて

キーワード：層間変形角, MEMS, 姿勢角, 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

$$h(x) = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \sin \phi \\ \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} g \quad (7)$$

で表される．式中の g は重力加速度の $9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ であり， v は加速度のホワイトノイズである．本研究では，加速度の出力値に 0.05 [Hz] の漸化式ローパスフィルタ³⁾を適用し，動加速度成分を取り除いたものを用いた．

4. 角速度のバイアスモデルの検証

3章の姿勢推定手法では，カルマンフィルタにより推定したバイアスを角速度から引き，時間積分することで姿勢角を推定する．そのため，姿勢角を精度よく推定するためには，バイアスが適切に推定される必要がある．そこで，式(3)-(5)で用いた角速度のバイアスモデルが妥当であるかを調べるために，静置実験を行い，バイアスの時間変化量を調べた．

静置実験ではサンプリング周波数を 200 [Hz] ，計測時間を 60 [s] とし，センサを静止状態にさせて計測した．得られた角速度データのバイアス変化を視認できるようにするため， 1 [s] ごとの平均値を求め，時系列に並べた結果を図-2に示す．式(3)-(5)のノイズモデルは，時間が経過するにつれて指数関数的にバイアスが減少するモデルとなっているが，これに対し図-2では，変動が大きく，ランダムに変化している様に見える．

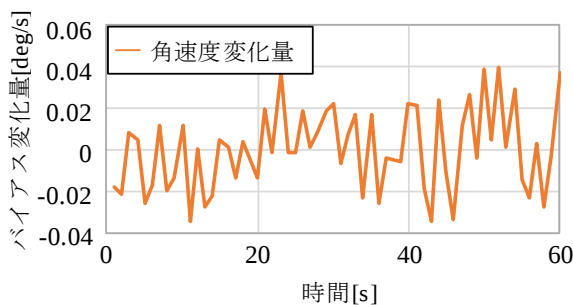


図-2 バイアスの時間変化

5. 分散共分散行列の検証

次に，システムノイズと観測ノイズの分散共分散行列について調べた．1軸振動実験のデータを解析した際には，姿勢角が適切に求まるようにノイズの分散の値を適当に設定して推定した．図-1に示す通り，姿勢角を精度よく推定できているが，分散共分散行列の設定が妥当であるか検討するため，静置実験から得たデータを用い，システムノイズ Q ，観測ノイズ R それぞれの分散共分散を推定した．その結果，次のように設定され

ることが分かった．

$$Q = \begin{bmatrix} 1.4 \times 10^{-5} & 0 & 0 \\ 0 & 9.7 \times 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 1.3 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1.37 \times 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 1.1 \times 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 1.8 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (9)$$

ただし，共分散の値は非常に小さいことから，無相関と判断し，0に置き換えている．式(8)，(9)を用い，1軸振動実験のデータを再解析した結果を図-3に示す．真値と値が大きく異なっており，式(8)，(9)では姿勢角を精度よく推定できないことが分かった．

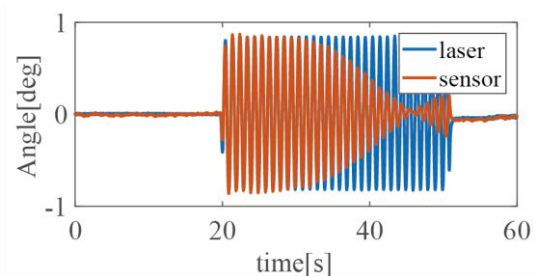


図-3 分散共分散行列を更新して再解析した結果

6. まとめ

MEMS 加速度・ジャイロセンサを搭載した地震センサを用い，カルマンフィルタにより姿勢角を推定した．既往の研究を参考に，状態方程式と観測方程式を3章のように仮定し，分散共分散行列を適当に与えたところ，精度よく姿勢を推定することができた．次に，仮定したノイズモデルの妥当性を検証するために，静置実験を行った．その結果，バイアス誤差の状態方程式は式のような変化をしないことが分かった．また分散共分散を静置実験より算出し，これを代入して姿勢角を推定したが，真値と値が大きく異なってしまった．

参考文献

- 1) P. D. Groves, Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Artech House, Boston/London 2008
- 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，Vol.26，No.6，pp.626～634，2008
- 3) 斎藤正徳：漸化式ディジタル・フィルタ-の自動設計 (コンピュータ-利用の現状<特集>)