

MEMS ジャイロセンサを用いた層間変形角の推定

東京理科大 学生員 ○石黒 広倫
元東京理科大 非会員 真田 樹
東京理科大 会員 佐伯 昌之

1. 研究の背景と目的

大地震時には、余震等による被災建築物の倒壊や部材の落下、付属物設備の転倒の可能性を判定するために各地方自治体は応急危険度判定を行っている。東日本大震災の報告では、地震発生後から応急危険度判定が実施されるまでに最大で2か月と20日が経過した地域もあり、早急に欠けているといった問題が指摘されているのが現状である。

そこで、著者らは地震動による建物の応答を計測し、建物の被災度を判定し結果を通知する安価なセンサの開発を行っている。このようなセンサを各建物に事前に設けることで、地震後の建物の被災度を迅速に判定することが可能となる。このようなセンサを実用化させるには、地震時の応答から建物の被災度を判定するような指標をセンサ内で解析し危険かどうか判定できることが重要である。そのため本研究では被害を推定する上で重要な指標の一つである層間変形角を MEMS ジャイロセンサを用いて3次的に推定するアルゴリズムの開発を試みる。

2. 3次元姿勢推定アルゴリズム

既往の研究で確立されている慣性航法アルゴリズム¹⁾のうち、軸の回転を推定する部分を利用して3次元姿勢推定プログラムを作成した。

一般に、慣性航法とは、角速度を積分することでセンサの姿勢を推定し、この結果を基に加速度計の出力を座標変換しながら積分することで速度、位置を推定する手法である。慣性航法の姿勢推定手順について簡単に述べる。オイラー角の定義に従い、オイラー角の3成分 roll, pitch, yaw を $\psi(t) = (\phi, \theta, \psi)$ とする。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 NED 座標系への回転行列を R_{Body}^{NED} とすると、回転行列の時間更新は

$$R_{Body}^{NED}(t) = R_{Body}^{NED}(t - \Delta t) \{I_3 + \Omega_B(t) \Delta t\} \quad (1)$$

で与えられる。ここで Ω_B は

$$\Omega_B(t) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{z,B}(t) & \omega_{y,B}(t) \\ \omega_{z,B}(t) & 0 & -\omega_{x,B}(t) \\ -\omega_{y,B}(t) & \omega_{x,B}(t) & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

と表される交代行列である。 I_3 は 3×3 の単位行列、

$\omega_B(t)$ は時刻 t においてセンサが取得した角速度であり、添え字の x, y, z は roll, pitch, yaw 回りを指す。また、姿勢角は

$$\psi(t) = \psi(t - \Delta t) + R_{Body}^{NED}(t) \omega_B(t) \Delta t \quad (3)$$

により更新される。

3. 1軸振動試験

応急危険度判定では、木造建造物の場合、層間変形角が約 $0.6[\text{deg}]$ を超えると中破と判断される²⁾。そのため要求精度を $0.1[\text{deg}]$ として、姿勢推定アルゴリズムの妥当性を検証した。まず、ジャイロセンサを1軸方向に揺らし、3次元姿勢推定アルゴリズムを用いて回転角を推定した。実験の様子を図1に示す。卓上振動台とフレームに接続した伸縮・傾斜可能な棒にジャイロセンサ(L3G4200D, STMicro製)を固定し、回転角が $1[\text{deg}]$ 程度になるよう単振動させた。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、設置高さで除すことで算出される回転角を真値とした。本実験では、ジャイロセンサの初期バイアス成分の安定性を確保するため、電源投入から $10[\text{min}]$ 程度経過した後に実験を行った。計測時間は $60[\text{s}]$ で $10[\text{s}]$ ~ $55[\text{s}]$ の間、振動させた。一般的な木造構造は1~2秒の比較的短い周期の地震動が起こった際、

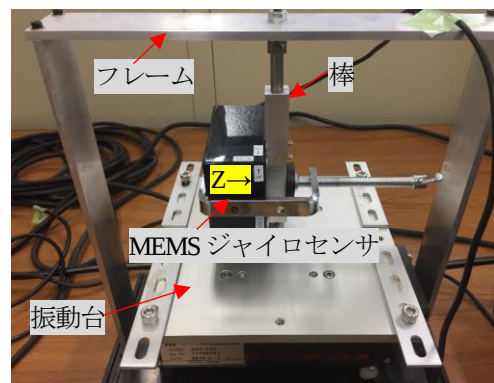


図1 振動実験の様子

キーワード：層間変形角，MEMS，姿勢角推定，慣性航法

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

大きな被害を引き起こすとされている³⁾。そのため周波数は 1.0Hz と 2.0Hz で実験を行うものと、計測の間に 0.5~1.0Hz に周波数を変化させた実験の計 3 回を行った。

4. 1.0Hz での 1 軸振動実験結果

3 次元姿勢推定アルゴリズムを用いて単純に回転角を積分して回転角を推定した。結果を図 2 に示す。レーザー変位計による結果と比べると、静止させている 10 秒までの間に回転している結果となっている。これは角速度に含まれるバイアスにより、回転角の推定結果に傾きが表れているためと考えられる。

そこで、0.1Hz のローカットフィルターを導入することによってバイアスを除去することを試みた。ローカットフィルタを通した後の結果を図 3 に示す。ローカットフィルタによるバイアス除去によりグラフの傾きが大きく改善されたことが分かる。ただし、振動させていない他の 2 軸は発散したままであった。

そのため、次にランダムノイズの除去を試みた。角速度の値が静止状態のときのランダムノイズと同程度の場合、それを 0 に置き換える処理を行った。ランダムノイズは、ジャイロセンサの 10 分間の静置実験を行い、角速度データの標準偏差 σ を算出し、その $\pm 3\sigma$ 区間に含まれる角速度の値とした。ローカットフィルタとノイズ除去を行った際の回転角の推定結果を図 4 に示す。この結果から、レーザー変位計の結果と比較してもグラフの波形は良く一致しており、回転角を精度よく推定できた。

5. 0.5~1.0Hz と 2.0Hz での 1 軸振動実験結果

0.5~1.0Hz と 2Hz で振動実験を行った。ここでは 2.0Hz での振動実験の結果のみを図 5 に示す。どちらの試験でも振動させた 1 軸に関しては精度よく回転角を推定できているものの、振動させていない 2 軸が発散してしまう結果となった。

6. まとめ

ジャイロセンサを用いて層間変形角を算出するため、慣性航法アルゴリズムに基づき 3 次元姿勢推定プログラムを作成した。この精度検証として 1 軸振動実験を行った。その結果、周波数 1.0Hz では回転角を比較的精度よく推定することができた。しかし、0.5~1.0Hz と 2.0Hz での振動実験では振動させていない 2 軸が発散してしまい、振動を追跡できない結果が得られた。ただし、ローカットフィルタにより低周波成分をカットしているため本来知りたい値である経験最大層間変形角は推定できないことに注意が必要である。

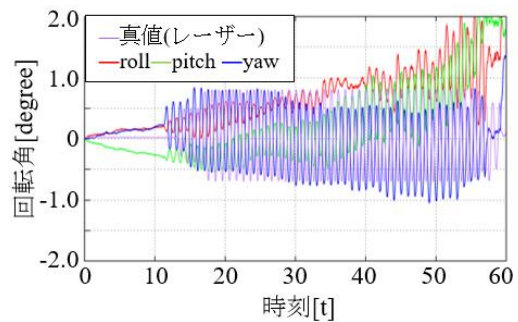


図2 回転角推定結果(1.0Hz)

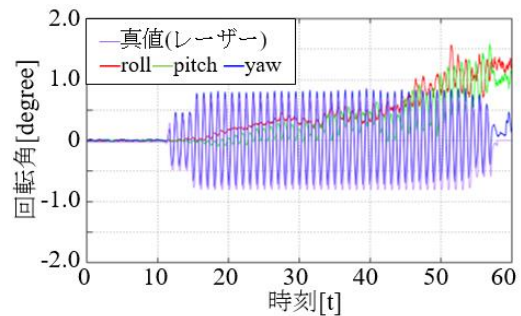


図3 LCF 導入(1.0Hz)

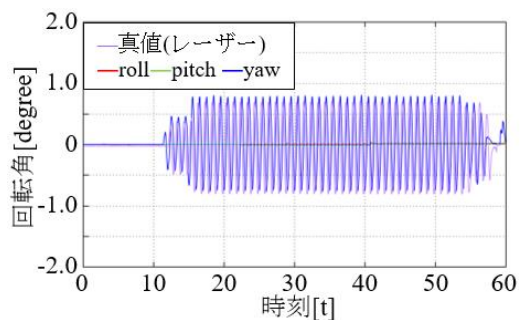


図4 LCF+バイアス除去(1.0Hz)

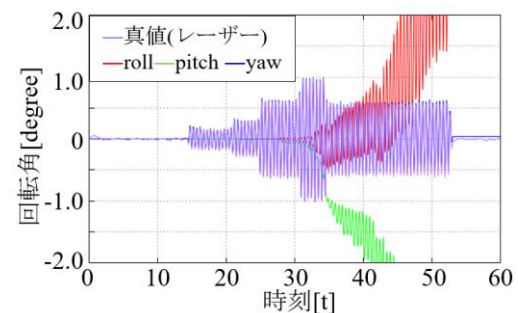


図5 回転角推定結果(2.0Hz)

今後は 1.0Hz 以上での振動でも精度よく推定できることが課題とされる。

参考文献

- 1) P. D. Groves, Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Artech House, Boston/London 2008
- 2) 斜面表層の傾斜変位の多点計測による崩壊予兆の監視
- 3) 特集：地震動の性質と被害—近年の地震からの知見 日本地震工学会誌(第9号 2009年1月)