

カルマンフィルターによる加速度計の動特性の推定と地震記録の補正

京都大学工学部 正員 山田 善一 野田 茂
伊津野 和行
建設省 正員 ○土井 弘次

1. 序論 最近、地震観測のために、デジタル式強震計を用いることが多くなってきた。著者らは、この強震計の長周期領域における精度の評価が一定していないことを報告した。そこで本研究では、カルマンフィルターのアルゴリズムをデジタル式強震計の記録に適用し、強震計の動特性を同定することを試みた。さらに、観測記録に含まれる雑音成分を明らかにし、その除去の必要性を指摘することにより、加速度から変位を漸化的に算出する補正法を提案した。

2. デジタル式強震計SAMTACの構造 この強震計における地動の感知からAD変換器入力までの構成図をFig.1に示す。換振器には速度帰還型サーボタイプの加速度計を有している。換振器からの信号は、ドリフト除去用ハイパスフィルターならびにエリアジングフィルターを通してAD変換器により数値化され、自動校正時刻とともにテープに記録される。Fig.2の換振器ならびにハイパスフィルターにおいて、地動 u と加速度計振子の変位 x と検出信号(電圧) E_s 、 E_u の間には、次の運動方程式が成立する。

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2h\omega_0 \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = -\frac{d^2 u}{dt^2}$$

$$E_s = K \frac{dx}{dt}, \quad \frac{dE_s}{dt} = \frac{1}{RC} E_u + \frac{dE_u}{dt}$$

ただし、 $h=240$, $\omega_0=31.4\text{rad/sec}$,

$K=45$, $1/RC=0.1(\text{Hz})^{-1}$ (公称値)

3. 拡張カルマンフィルターによる動特性の推定

入力として地動を、出力として強震計内部の回路の応答を考える。本研究では、以下の実験ケース(擬似正弦波)を用いて、強震計の動特性を推定した。

- ① A150 : 最大加速度150gal, 周期1秒
- ② A300 : 最大加速度300gal, 周期1秒
- ③ C150 : 最大加速度150gal, 周期1.7秒
- ④ G030 : 最大加速度30gal, 周期5秒

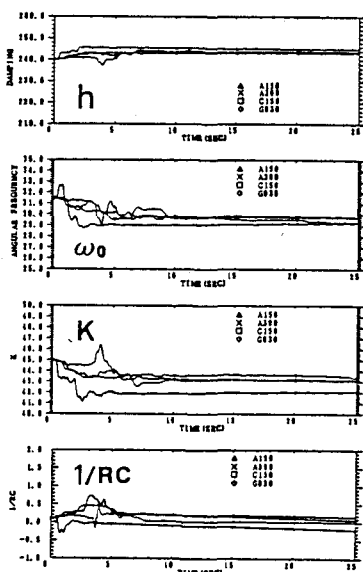
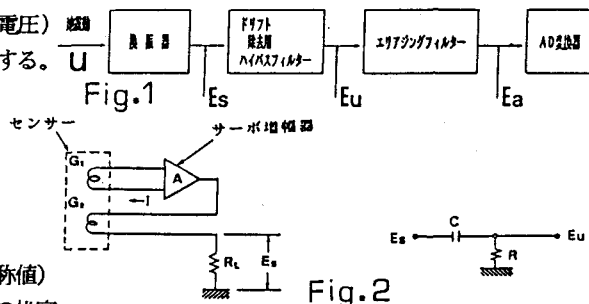
状態変数として次の $x_1 \sim x_7$ を選ぶと、

$$x_1 = x, x_2 = E_s, x_3 = E_u, x_4 = h,$$

$$x_5 = \omega_0, x_6 = K, x_7 = 1/RC$$

次式の状態方程式が得られる。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_2}{x_6} \\ -2x_4 \cdot x_5 \cdot x_2 - x_6 \cdot x_5^2 \cdot x_1 - x_6 \cdot \ddot{u} \\ \dot{x}_2 - x_2 \cdot x_7 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$



Yoshikazu YAMADA, Shigeru NODA, Kazuyuki IZUNO, Hirotsugu DOI

一方、離散化した観測方程式 (k, l はステップ数、 $y(k)$ は観測波を示す) は次式で表わされる。

$y(k) = x_3(k) + w(k)$ $w(k)$: 白色雑音、 $E[w(k) w(l)^T] = R_k \cdot \delta_{kl}$ 、 R_k : 観測誤差の共分散
上記のアルゴリズムを適用することにより、 $h, \omega_0, K, 1/RC$ の動特性は Fig. 3 のように推定される。

4. 入力波形の推定 同定した動特性と強震記録を用いて、カルマンフィルターにより雑音成分を除去し、より確かな入力波形 (地動) を推定することを試みた。ただし、雑音としては白色雑音のみを考えた。状態変数として以下の $x_1 \sim x_8$ を選ぶと、

$$x_1 = \frac{dx}{dt} \quad x_2 = \frac{d^2x}{dt^2} \quad x_3 = E_u \quad x_4 = u \quad x_5 = \frac{du}{dt} \quad x_6 = \frac{d^2u}{dt^2} \quad x_7 = \frac{d^3u}{dt^3} \quad x_8 = \frac{d^4u}{dt^4}$$

状態方程式は次のようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_0 & -2h\omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & K & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1 & & & & \\ & & & & 1 & & 0 & \\ & 0 & & & & 1 & & \\ & & & & & & 1 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{Bmatrix} \rightarrow \frac{d}{dt} x(t) = A x(t)$$

観測値としては、強震計の原記録から求めた電圧 E_u (Fig. 4) を用いた。カルマンフィルターのアルゴリズムに従い、地動の加速度・速度・変位を推定した結果が Fig. 5 である。求めた加速度波と原記録の加速度フーリエスペクトルが Fig. 6 である。図より明らかなように、長周期側に $1/f$ 雑音に相当した成分が確認でき、その影響が速度・変位に及んでいることがわかる。そこで、0.1Hz 以下の成分をハイパスフィルターで除去し、フーリエ逆変換により加速度波を求めた。同時に数値積分により速度・変位を求めた結果が Fig. 7 (a) ~ (c) である。なお図 (d) は、差動トランス型変位計により測定した変位記録である。

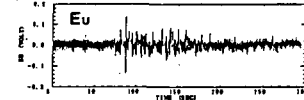


Fig. 4

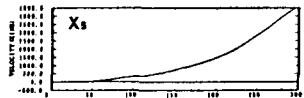
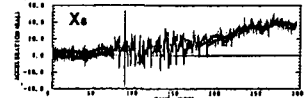


Fig. 5

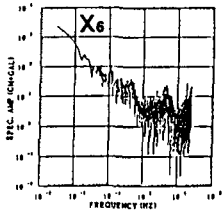
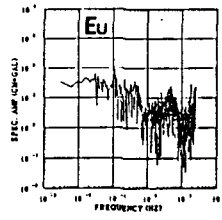


Fig. 6

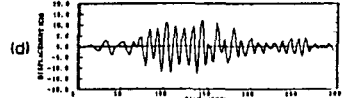
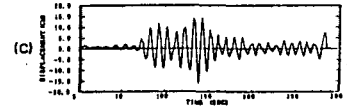
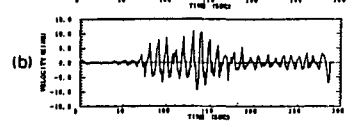
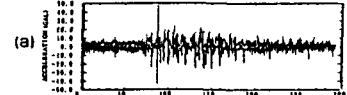


Fig. 7

5. 結論

- 1) 同定するパラメータとしては、換振器における減衰定数 h 、固有円振動数 ω_0 と電気的定数 K およびハイパスフィルター回路における $1/RC$ の4つを選んだ。本ケースにおいては、公称値と比べて、各パラメータには数%から10%程度の誤差が見込まれた。
- 2) 同定したパラメータ値を用いて、強震計の記録からカルマンフィルターにより地動の推定を行った。推定した加速度波には長周期の波が含まれていた。この長周期波に相当する $1/f$ スペクトルの雑音成分が約 0.1Hz 以下の帯域でのフーリエスペクトルに顕著に現れていた。