

京都大学工学部 正 員 伊津野和行
 京都大学工学部 正 員 山田 善一
 鳥取大学工学部 正 員 野田 茂
 建設省 正 員 土井 弘次

1. はじめに 近頃では、地震観測にディジタル式強震計を用いることも多くなってきた。著者らは、以前ディジタル式強震計SAMTAC17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ィ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検討した。

2. ディジタル式強震計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、自動較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)の 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、 $h=240$, $\omega_0=31.4\text{rad/sec}$,

$K=45$, $1/RC=0.1(\text{F})^{-1}$ (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、

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

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

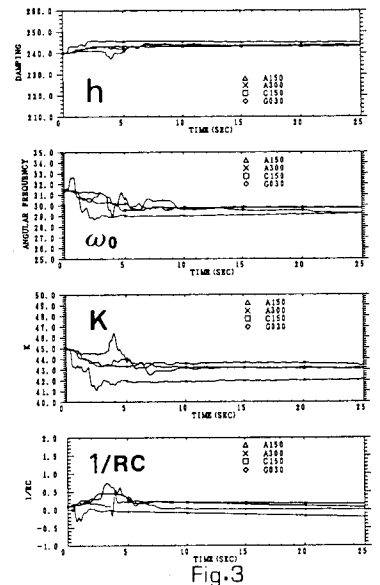
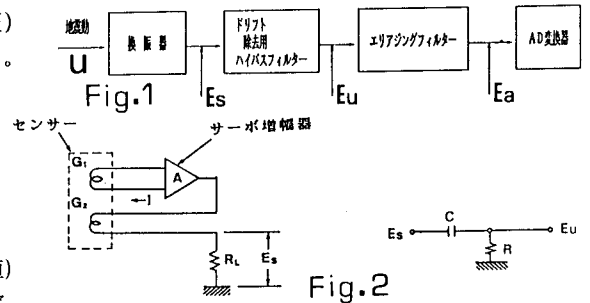
次式の状態方程式が得られる。

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

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。

$$y(k) = x_3(k) + w(k) \quad w(k): \text{白色雑音}, \quad E[w(k)w(l)^T] = R_k \cdot \delta_{kl}, \quad R_k: \text{観測誤差の共分散}$$

上記のアルゴリズムを適用することにより、 h , ω_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、

$$x_1 = \frac{d x}{d t} \quad x_2 = \frac{d^2 x}{d t^2} \quad x_3 = E u \quad x_4 = u \quad x_5 = \frac{d u}{d t} \quad x_6 = \frac{d^2 u}{d t^2} \quad x_7 = \frac{d^3 u}{d t^3} \quad x_8 = \frac{d^4 u}{d t^4}$$

状態方程式は次のようになる。

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

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。

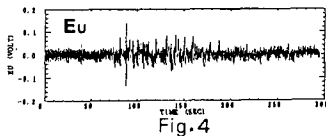


Fig. 4

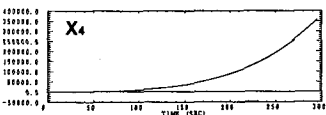
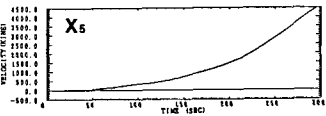
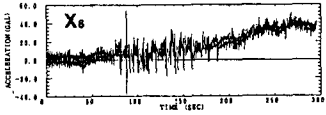


Fig. 5

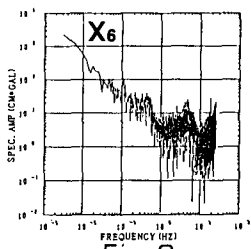
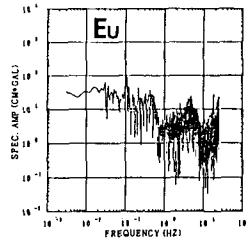


Fig. 6

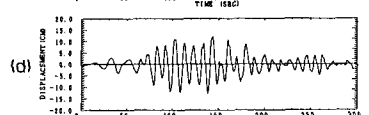
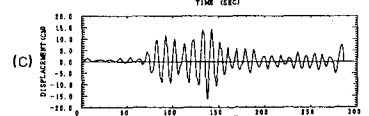
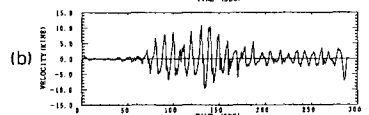
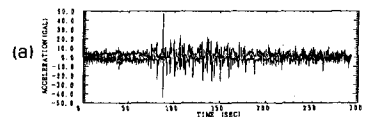


Fig. 7

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。
- 3) 本研究では、雑音成分として白色を仮定した。これは高周波数領域の雑音の除去に有効であったが、低周波領域に現れた雑音を除去するには至らなかった。
- 4) 状態変数に組み入れた速度・変位は、加速度の数値積分により逐次求められるため、その推定は加速度の推定に依存しており、特にドリフトが与える影響の大きいことが明らかになった。