I－643　条件付時空間地震動のリアルタイム予測

ITEC（株）　正会員　大霜正樹
鳥取大学工学部　正会員　野田　茂

1. はじめに

近年のアレー地震観測の結果、地震動は、時間だけでなく場所の関数として、波形変形を伴うことがわかってきた。そこで、本研究では、地震動モニタリング地点において地震動が観測されたとき、その記録を拘束条件として、未観測点における地震動をオンラインで推定する方法を示す。これは、条件付確率場の推定理論と拡張カルマンフィルター理論をハイブリットしたものである。これより、地震動の補間問題が解明されるとともに、時空間特性を表すパラメーターをリアルタイムに同定することができる。なお、推定誤差分散を用いて精度をも評価できることは本手法の特徴である。

2. 地震動特性のパラメーター同定

問題の設定のため、次の条件を仮定する。
1) 複数地点（N箇所）で、地震動記録は完全に得られる。
2) 時空間場における地震動の平均値は０である。

時空間の地震動分布の特性は相互相関関数によって表せる。この関数のパラメーターを同定するのが本研究の第一の目的である。本研究では、パラメーター同定のために、拡張カルマンフィルターを用いる。ここで取り扱う相互相関関数 $C(x_0,\tau)$ は、式 (1) のように、時間差τと２点間の相関距離 x_0の関数で表す。

地震記録からモデル化できる相互相関関数の観測方程式を次式で表す。

$$\left\{\begin{array}{c}\vdots\\ C(x_0,\tau)\\ \vdots\end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{c}\vdots\\ a_1\exp(-a_2\tau)cos(a_3\tau)\exp(-a_4x_0)\\ \vdots\end{array}\right\} + \epsilon \quad (1)$$

ただし、$a_1\sim a_4$は同定すべきパラメーター、ϵは平均値０の観測ノイズ（ホワイトノイズ）である。

パラメーターを状態量にとると、k時点での状態方程式は式 (2) のようになる。

$$X_k^T = X_{k-1}^T + \delta \quad (2)$$
$$X_k = \{a_1, a_2, a_3.a_4\}$$

ここに、δは平均値０のホワイトノイズである。

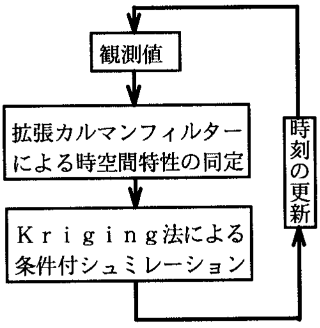

図１　本手法のフロー

3. 地震動の条件付シミュレーション

本研究では、地震動の時空間的な相関性を表すパラメーターを拡張カルマンフィルタで同定すると同時に、記録地震波形を内外挿して、任意地点の地震動をシミュレートする。このためには未観測点における地震波形の推定誤差を評価しておく必要がある。

地震動は、震源から対象都市域に、時間とともに伝播する。k時点における未観測点 X_rの地震動 $z^*(X_r,k)$ は、式 (3) のように、観測データの線形補間項$\underline{\hat{z}}(X_r,k)$(式 (4)) に、推定誤差分散から得られる誤差項$\underline{\epsilon}(X_r,k)$（ノンホワイトノイズ、式 (5)）を加えてシミュレートする。ただし、これらの諸量を求める際には不偏性かつ最小誤差分散推定の条件を満足しなければならない。

k時点に注目したとき、波動場の相関性を考え、過去および将来の観測データを反映させ、$k+j$時点 ($j=-\alpha\sim\beta$) に対して、未観測点 X_rの地震動を予測する。地震動のシミュレーションは、式 (3) のように、推定項$\underline{\hat{z}}(X_r,k)$ と誤差項$\underline{\epsilon}(X_r,k)$ の和で表せる。式 (5) のように、$\underline{\epsilon}(X_r,k)$ は、ARモデルで表せるが、ノンホワイトノイズとなる。推定誤差分散σ_ϵ^2は、式 (8) のようになり、重み$\lambda_{ij}(X_r)$ によって表せる。

地震動の条件付シミュレーションは、平均値０で分散１の正規乱数 r_k を発生させると、式 (6) ～ (8) によって実施できる。その結果、X_r地点の k時点における地震動$\underline{z}^*(X_r,k)$ は、N地点の観測記録$\underline{z}(X_i,k)$ を用いると、容易に求めることができる。

$$\underline{z}^*(X_r,k) = \underline{\hat{z}}(X_r,k) + \underline{\epsilon}(X_r,k) \quad (3)$$

$$\underline{\hat{z}}(X_r,k) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=-\alpha}^{\beta}\lambda_{ij}(X_r)\underline{z}(X_i,k+j) \quad (4)$$

$$\begin{aligned}\underline{\epsilon}(X_r,k) &= \underline{z}(X_r,k) - \underline{\hat{z}}(X_r,k)\\ &= Q_1\underline{X}_{\hat{Z}_k} + Q_2\underline{X}_{\epsilon_k} + Q_3 r_k\end{aligned} \quad (5)$$

ただし、

$$\left.\begin{aligned}Q_1 &= B_1({A_1}^{-1} + PS^{-1}P^T) - B_2S^{-1}P^T\\ Q_2 &= -B_1PS^{-1} + B_2S^{-1}\\ Q_3 &= {\sigma_\epsilon}^2 - B_1({A_1}^{-1} + PS^{-1}P^T){B_1}^T\\ &\quad +2B_2S^{-1}P^T{B_1}^T - B_2S^{-1}{B_2}^T\\ P &= {A_1}^{-1}{A_2}^T\\ S &= A_3 - A_2P\end{aligned}\right\} \quad (6)$$

$$\left.\begin{aligned}A_1 &= E[X_{\hat{Z}_k}{X_{\hat{Z}_k}}^T]\\ A_2 &= E[X_{\epsilon_k}{X_{\hat{Z}_k}}^T]\\ A_3 &= E[X_{\epsilon_k}{X_{\epsilon_k}}^T]\\ B_1 &= E[\epsilon(X_r,k){X_{\hat{Z}_k}}^T]\\ B_2 &= E[\epsilon(X_r,k){X_{\epsilon_k}}^T]\end{aligned}\right\} \quad (7)$$

$${\sigma_\epsilon}^2 = E[\epsilon(X_r,k)^2] \quad (8)$$

上式において、式 (7) と (8) の理論的内容については文献 1) を参照されたい。

式 (4) の重み係数$\lambda_{ij}(X_r)$ は、確率場の相互相関関数 $C(\cdot,\cdot)$ を用いると、次式によって求められる。ただし、ここでは定常確率場を仮定している。n は時間ステップを、d_{rm}は未観測点 rと観測点 m 間の相関距離を表す。

$$C(d_{rm},-n) \;=\; \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=-\alpha}^{\beta}\lambda_{ij}(X_r)C(d_{im},j-n) \tag{9}$$

4. 計算結果および考察

図2に示される10地点のうち、7地点(●印) の観測データが与えられた条件下で、未観測点(■印) の地震動波形をシミュレートする。相互相関関数(式(1)) のパラメーターとしては、$a_1=2.0$、$a_2=4.0$、$a_3=6.0$ と $a_4=0.9$ を与えた。この相互相関関数に基づいた無条件シミュレーションにより、観測波形を得た。図 3 は $(1,-1)$ 地点の観測記録の一例である

本研究では、7 つの観測波形記録より、パラメーターの同定と条件付シミュレーションをリアルタイムに行った。図 4 よりわかるように、同定されたパラメーターは、初期には大きく変動してしるが、徐々に真値に近づいている。各パラメーターの推定誤差分散は、図 5 のように、漸次小さくなっている。このことから、観測情報が増えるに従い、パラメーターの同定精度が向上していることがわかる。

図 6 は $(1,-1)$ 地点における補間波形$\hat{z}(X_r,k)$ を、図 7 はその誤差波形$\epsilon(X_r,k)$ を、図 8 は式 (3) から求められたサンプル波形$z^*(X_r,k)$ である。サンプル波形は、図 3 の観測記録にほぼ近い形状であり、観測記録の特徴を表した波形となっている。観測点と未観測点の配置状況も勘案して検討を加えなければならないが、このことは本手法の有効性を示唆しているものと考えられる。図 7 の誤差波形は小さな値を示しており、サンプル波形に大きな影響を与えていない。

図 9 は 3 つの未観測点における推定誤差分散σ_ϵ^2の時系列変化を示したものである。情報が増えるにつれて、分散は小さくなっている。同時に、外挿地点に比べて、内挿地点ほど、誤差分散が小さいことも理解できる。

5. おわりに

結果をまとめると、次のようになる。

1) 本手法を用いると、相互相関関数のパラメーター同定と地震波形の条件付シミュレーションをリアルタイムに実施できる。地盤などの情報が未知であっても、地震波形の記録から、未観測点における揺れなどを定量的に評価できる。
2) パラメーターの推定誤差分散を評価することにより、同定精度の評価を容易に行うことができる。
3) 未観測点の誤差分散を求めることにより、条件付地震動シミュレーションの精度を定量的に評価できる。

以上の結果を活用すれば、地震直後あるいは地震最中の被害予測を早期に実施することが容易になると考えられる。

参考文献

1) 野田 茂・星谷 勝・大霜正樹：クリッギングによる地盤震動の条件付シミュレーション，第 9 回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, pp.379〜384, 1994 年 12 月.

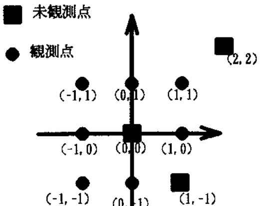

図 2　観測点の配置

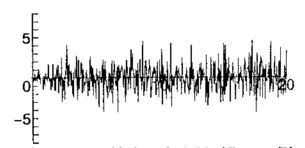
図 3 (1,-1) 地点の観測記録の一例

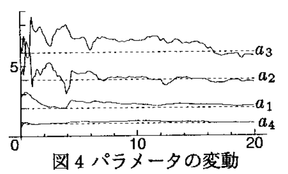
図 4 パラメータの変動

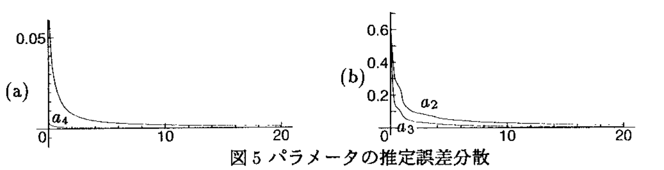
図 5 パラメータの推定誤差分散

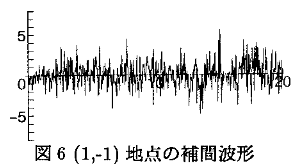
図 6 (1,-1) 地点の補間波形

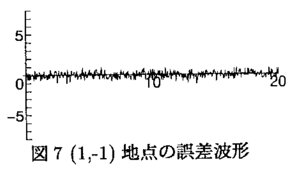
図 7 (1,-1) 地点の誤差波形


図 8 (1,-1) 地点のサンプル波形

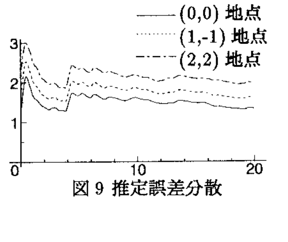

図 9 推定誤差分散