

強震動距離減衰式の適応型更新推定

香川大学工学部 フェロー ○野田 茂

香川大学大学院

三崎健司

1. はじめに

地震動の面的な分布は地震被害との相関を検討する上で特に重要視されている。地震被害を最小限に抑えるためには、地震発生直後から時々刻々収集される観測データによって強震動の時空間分布を高精度かつ早期に推定して対応に当たることが求められる。その際、強震動の時空間分布推定に当たっては距離減衰式パラメータの統計量（平均値、共分散）が必要になる。

そこで本研究では、発生地震の観測情報を直接時々刻々取り込みながら、過去の経験式（距離減衰式、空間相関特性を表す共分散関数）を逐次更新する効率的なアルゴリズムを提案する。数値計算例から、提案手法の有効性を検討する。

2. 問題の設定

提案手法を平成13年芸予地震データに適用する。用いた観測データの位置は図1の通りである。

本研究では、1) 全観測データを一括バッチ処理して推定する、いわゆる固定型重回帰分析、2) データが得られるたびにシーケンシャル処理して推定する、いわゆる漸化型（適応型）更新重回帰分析を用いる。後者によれば、新しくデータが得られたときには、今までのデータに拘わることなく、順次改善された強震動距離減衰式を求めることができる。

計算に当たっては、推定すべきパラメータの初期値である事前平均値を規定するパラメータ、事前共分散を規定するパラメータ、ノイズの分散が解析精度にどのように影響するのかを検討する。

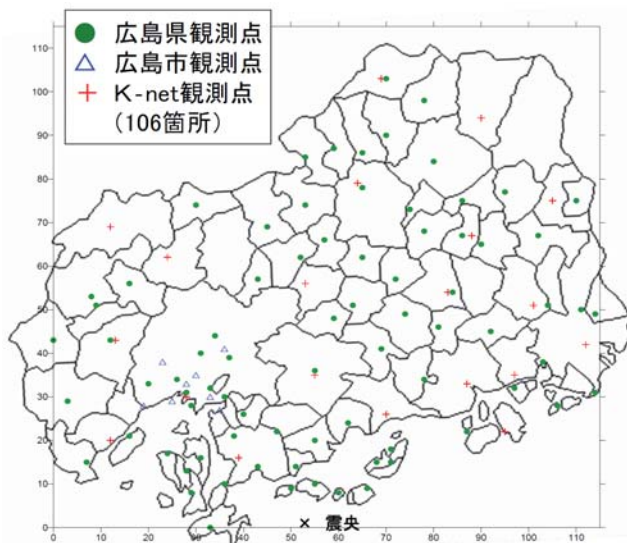


図1 地震動モニタリングのための観測点

3. カルマンフィルタ

カルマンフィルタによれば、地震観測データを直接取り込み、順次処理しながら、統計的推定値を求めることができる。

式(1)は状態方程式、式(2)は観測方程式の基本式である。カルマンフィルタは予測アルゴリズムとフィルタリングアルゴリズムによって構成される。状態量の初期値 $X(t_0|t_{-1})$ と初期誤差共分散 $P(t_0|t_{-1})$ を与えれば、観測データを順次取り込みながら、漸化的に最適状態推定値を算出することができる。

$$\frac{dX_t}{dt} = f(x_t, t) \quad (1)$$

$$y_{t_k} = h(X_{t_k}, t_k) + V_{t_k} \quad (2)$$

本研究では、水平方向最大地震動の距離減衰式算定のためにカルマンフィルタを適用し、求めるべきパラメータが順次逐次的にどのように推定されるのかを明らかにする。

4. 漸化型観測更新アルゴリズム

漸化型観測更新アルゴリズムの計算フローを図2に示す。地震発生からの時間ステップごとにシーケンシャルにデータを取り込みながら、観測更新がなされ、推定誤差分散が減り、最適推定値を漸化的に求めることができる。これより、距離減衰パラメータと空間相関特性を表す共分散パラメータが求まる。

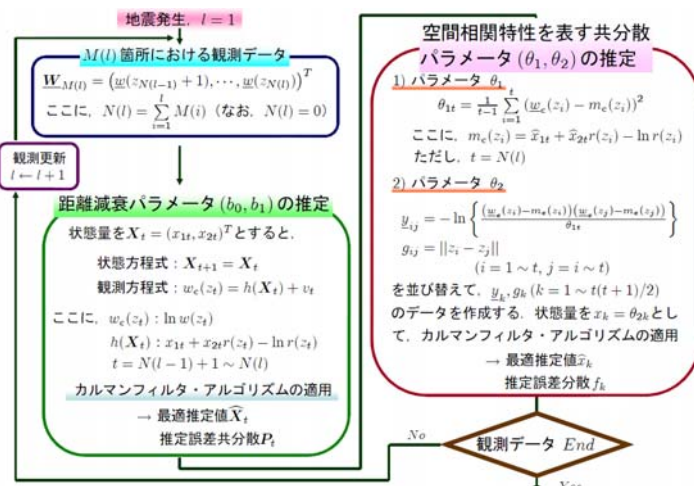


図2 漸化型観測更新アルゴリズム

一括処理方式によると、データ数が増えると、行列等の計算は容易ではなく膨大な計算容量を必要とし、桁落ちなどの問題を生じかねない。一方で、本アルゴリズムによれば、計算容量の大幅な減少により計算上の効率性が上がると考えられる。

5. 数値シミュレーション結果と考察

キーワード 地震動モニタリング, 距離減衰式, カルマンフィルタ, 漸化型観測更新

連絡先 〒761-0396 香川県高松市林町2217-20, Tel & Fax :087-864-2153

計算の対象にした地震データによれば、距離減衰式の事前平均値は式 (3) のように空間座標に依存する。

$$m_e(z) = b_0 + b_1 r(z) - \ln(r(z)) \quad (3)$$

本例の観測データによる一括処理によれば、未知パラメータが $b_0=10.835$, $b_1=-0.0129$ と算定される。事前平均値と観測データ（データ数 $N=106$ ）を用いて正規確率場における共分散を統計的に求めると、 $\theta_1=0.300$, $\theta_2=7.248$ となり、正規確率場における事前平均値と観測値のばらつきは図 3 のようになる。

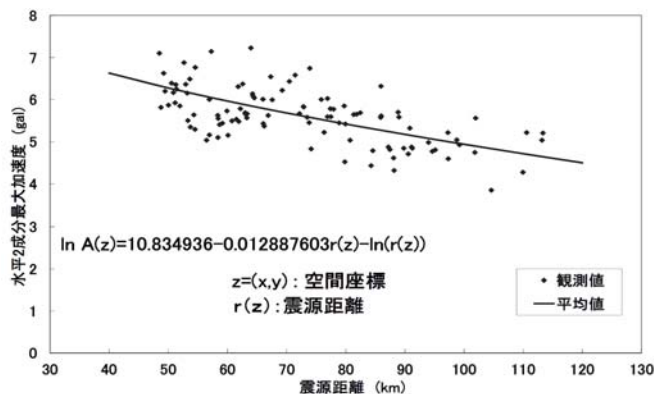
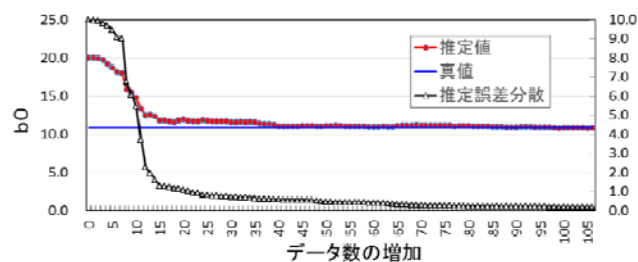
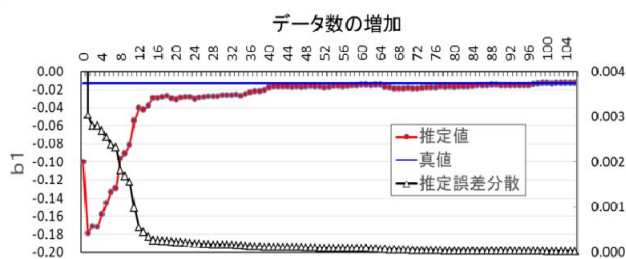


図 3 正規確率場における事前平均値

ある種の観測データの取り込みによれば、距離減衰式におけるパラメータ b_0 , b_1 は図 4 のように推定される。観測データ数が増えるにつれ、推定誤差分散は漸次小さくなり、それに応じて推定値はバッチ処理に基づく推定値（真値）に近づく様子が確認できる。真値への漸近状況は比較的少ない数の観測データにおいて達成されている。このことは全観測データを一括処理して推定することがいかに非効率的であるかを物語っている。なお、観測データの取り込み順番にかかわらず、この傾向については大差な



(a) b_0 の推定結果



(b) b_1 の推定結果

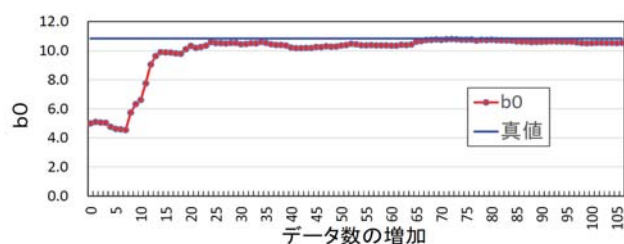
図 4 適応型更新による推定結果の例

かった。

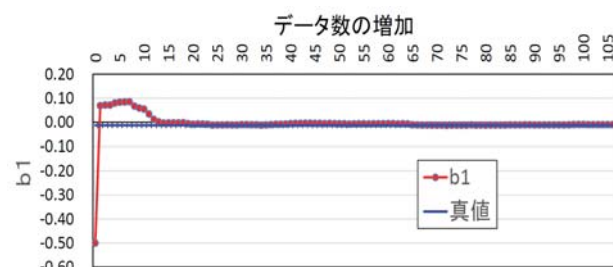
次に、初期条件が推定値に与える影響を分析する。図 5 は図 4 の初期値と異なる条件時におけるパラメータの収束状況である。

図 4 と図 5 の比較で明らかなように、初期値の影響は少ないと言える。他の初期値における分析も行ったところ、初期値の影響は大きくないことが明らかになった。いずれにしても、比較的早い段階でパラメータは収束する傾向にある。このことはリアルタイム地震防災に大きく役立つことを意味する。

パラメータの初期値は既往の距離減衰式に基づいて物理的に与えることが可能である。これによれば、初期値が自動的に決まることになるので、合理的な計算が可能となる。



(a) b_0 の推定結果



(b) b_1 の推定結果

図 5 初期値の相違に伴う推定結果の例

以上のように、本漸化型観測更新アルゴリズムではその精度がかなり高いことが理解されたが、これは式 (3) のように線形式で表されているためである。仮に非線形式で観測方程式が表される場合には重み付きグローバルな繰り返しを伴う EK-WGI 法や繰り返し拡張カルマンフィルタを適用すればよい。

6. おわりに

本研究では、カルマンフィルタアルゴリズムを基本とした適応型重回帰分析が強震動距離減衰式の推定に役立つことを数値計算例によって検証した。シーケンシャル処理の結果は比較的早い段階でバッチ処理の結果に漸近した。

このようなアルゴリズムの提案は過去になく、本研究の新規性・独創性を示している。本提案アルゴリズムを気象庁の緊急地震速報のようなリアルタイム地震防災に適用すれば、さらなる改善・評価・高度化につなげることが期待される。