

I-588

逐次型同定手法を用いた地震波初動の自動検出

鳥取大学工学部 正 野田 茂

1. まえがき

最近、ライフラインの地震時制御システムとの関連で、震源の概略推定が試みられている¹⁾。これは、供給地域内の多数のSIセンサーの観測値とSI値の距離減衰特性を用いて、迅速に地震情報を決定するものである。本研究では、地震計ネットワークの波形記録を用いて、地震諸元（震源位置やマグニチュード）を高精度でかつ即座に推定するシステムを提案し、実用に供することを目的とする。このようなシステムを開発することは、ライフラインの被害評価を含む地震時緊急遮断システムを構築する際に合理的である。ここでは、震源推定システムの全体像を説明し、研究の第一段階として実施した地震波初動の検出法とその適用例について報告する。

2. 震源推定システムの概略

図1には、本研究で開発する震源推定システムのフローを示す。このシステムは、次に示すように、3つの段階よりなる。

①P波・S波の初動読み取り

3.で述べるように、ノイズまたは地震波の表現にARモデルを適用し、位相の検出判断にAICを用いる。その結果、P波とS波の初動時刻、すなわちSP時間が得られる。なお、処理の際には、異常な読み取り値を除いたり、複数の地震波が各観測点に到達する場合、それら読み取り値のグループ分けをする。

②震源の決定

水平成層の地盤構造を仮定して求めた理論走時と観測走時の残差2乗和を小さくするように、最小2乗解を用いて、震源位置（緯度、経度、深さ）を反復計算により求める。なお、深さが負にならないように、変数変換を施す。また、走時残差の大きい検出値の影響を小さくするために、残差に応じた重みをかける。震源計算の初期値としては、均質構造による最適解や、文献1)で示されている概略推定法の結果を用いる。

③マグニチュードの決定

②より、センサーの観測位置と震央間の距離が計算できる。そこで、SI値（あるいは最大加速度）の回帰モデル（説明変数；マグニチュード、震央距離、震源深さ）を活かして、マグニチュードを決定する。

3. 逐次型同定アルゴリズムによる地震波初動の自動検出

ARモデルや対数尤度比関数を基本にした地震波の自動検出の方法は、既に、いくつか提案されている。ここでは、カルマンフィルターによってAR係数を逐次的に同定し、AICを用いて初動時刻を判定する方法を提案する。

時刻 t の地震加速度は、時刻 t 以前の加速度情報に基づき、次のようなARモデルによって表わす。

$$x_t = \sum_{i=1}^m a_i x_{t-i} + v_t$$

ここに、 a_i はARの係数で、 m はその次数である。 v_t は、 $N(0, R_t)$ のホワイトノイズである。

今、状態量 $\theta = (a_1, a_2, \dots, a_m)^T$ と観測係数ベクトル $\phi_t = (x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-m})$ とおくと、状態方程式と観測方程式は次式で定義できる。

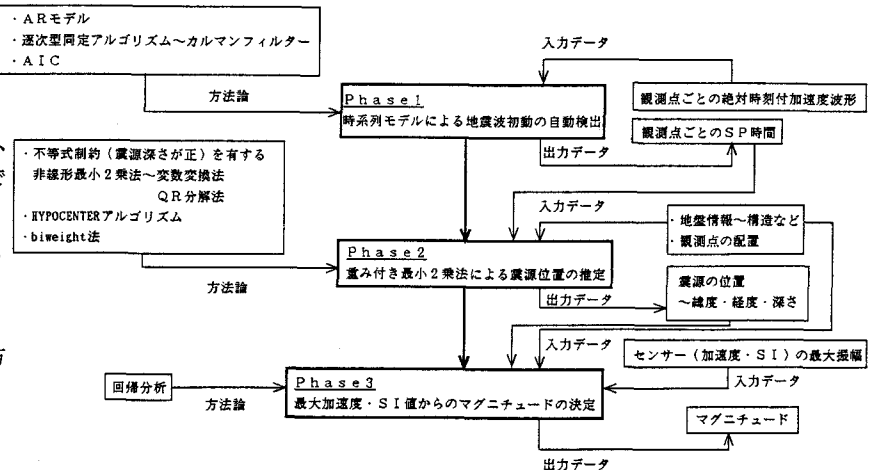


図1 震源推定システムの開発フロー

$$\theta_{t+1} = \theta_t, \theta_0 = 0; \quad x_t = \phi_t \theta_t + v_t$$

上式にカルマンフィルターのアルゴリズムを適用すれば、加速度 x_t を観測した時点で、AR係数の推定値 $\hat{\theta}_t = (\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m)^T$ がリアルタイムに計算可能である。

次に、上記の方法で求めたAR係数を用いて、P波・S波の初動時刻を計算する。初動時刻を含む時間区間 ($t_1 \sim t_n$) を任意にとり、その区間を2つに分ける。区間1 ($t_1 \sim t_k$) と区間2 ($t_{k+1} \sim t_n$) におけるAR係数から、AICを次式で計算する。

$$AIC(k) = n \log 2\pi + k \log \sigma_1^2 + (n-k) \log \sigma_2^2 + n + 4m + 8$$

ここに、 σ_1^2 と σ_2^2 は、それぞれ、区間1と2にARモデルをあてはめたときの予測誤差の分散である。

上式から、AIC(k)を最小にする点 k_{min} を探し、 k_{min} を分割点とする。このような分割法を適用すれば、初動時刻は $t_{k_{min}}$ として求まる。

4. 地震波初動の検出結果

上述の検出アルゴリズムを、東大生研千葉実験所で観測された強震加速度記録(図2)に適用した。同地震のマグニチュードは6.1、震源深さは78km、観測点までの震央距離は28kmである。図2を見れば、P波は0~3秒、S波は10~13秒の時間区間に到着していることが予想できる。

AR係数(次数5)の時系列変化は図3のようになる。図2と図3を対比させれば、相の変化に応じてAR係数がステップ状に変化していることがわかる。AR係数の変化は、S波到着の強震部以降、それほど大きくない。むしろ、P波到着前後の時間において、AR係数の変化が激しい。詳細に分析すれば、AR係数の物理的解釈を行うことも可能であろう。

P波に対しては時間区間0~6秒、S波は8~16秒の時間区間を対象にして、AICの計算を行った。図4に示すAICの時系列変化の最小時間点より、P波初動時刻は強震計のトリガーから1.32秒後に、S波初動時刻は11.67秒後と検出される。これらの値は人間が目視で判定した場合の結果と大差ない。また、これらの時刻はAR係数の時刻歴変化ともよく対応している。

本システムの採用により、P時刻およびS時刻を十分に良い精度で読み取ることが可能である。観測点網の拡がりに見合った範囲で本システムを稼働させれば、震源を十分な精度で決定できるものと考えられる。

5. あとがき

本研究では、震源推定システムの開発の第一段階として、ARモデルとカルマンフィルターアルゴリズムに基づき、P波とS波の初動時刻の検出方法とその適用例を示した。震源位置とマグニチュードの推定精度などについては次の機会に報告する。

謝辞 本研究は、「地震時緊急遮断システムに関する研究」(委員長・東大片山恒雄教授)の一環として実施したものである。貴重なデータを提供して頂いたり、討議に参加して頂いた、片山先生を始めとする関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 永田 茂・片山恒雄・池田鉄哉・伊藤弘勇: SIセンサーを用いた震源の概略推定法、第8回日本地震工学シンポジウム(1990)論文集、第2分冊、pp. 2109~2114、1990年12月。

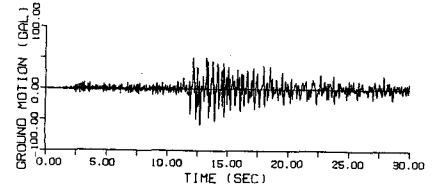


図2 対象とした地震加速度

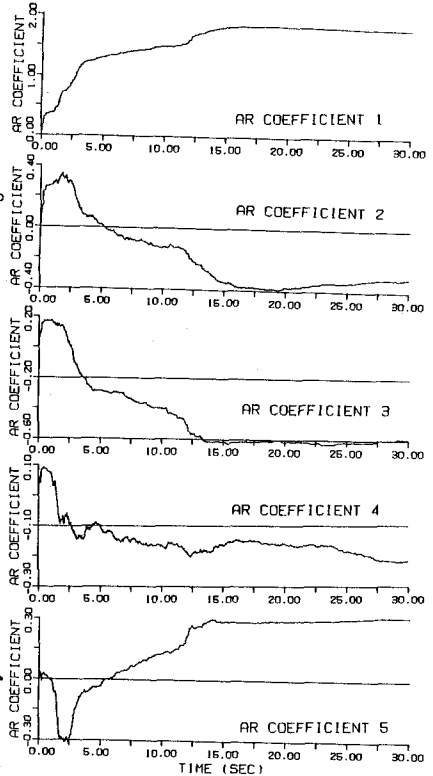


図3 AR係数の時系列変化

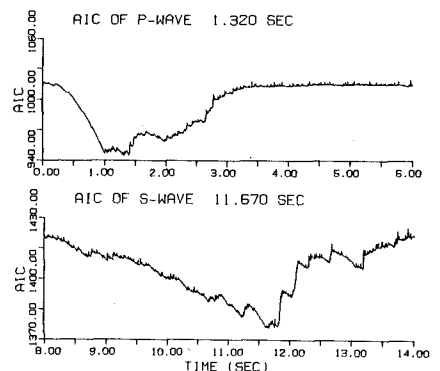


図4 P波・S波の初動時刻の決定