

緊急地震速報の震源同定への PSO 適用の基礎的検討

防衛大学校 学生会員 ○片出 亮
防衛大学校 正会員 香月 智

1 緒言

地震大国と称される我が国は、地震被害を低減するための一方策として、早期に地震情報を知らせるための緊急地震速報を開始した。このシステムにおいて、任意地点に対する震度やS波到達時刻を推定するためには、極めて短時間に震源を同定する必要がある。そこで本研究では、最適化手法の1つである PSO¹⁾を用いて、効率的な震源同定手法の開発を試みた。

2 震源同定問題

現在、震源同定法にはグリッドサーチ法(以下 GS 法)がよく用いられており、図-1のように、全国に設置された地震計がP波を感知した時刻の早いもの3~5点ほどの近傍空間を、適当な間隔で離散化した地点座標を表すグリッドを設け、グリッド上の各地点からP波が発信されたと仮定した場合のP波到達時刻と実感知時刻との誤差が最小となる点を探すものである。これを最適化問題として定式化すると、次のようになる。

Given: $t_i^o, x_i^o, y_i^o, z_i^o, (i=1, n^o)$

$x_j^G, y_j^G, z_j^G, (j=1, n^G), V_p$

Find: $x_j^o, y_j^o, z_j^o, t_{ini}$

Objective: $Z = \sum_{i=1}^{n^o} (t_i^o - t_{ij}^p)^2 \rightarrow \min$ (1-a)

Where:

$t_{ij}^p = \frac{1}{V_p} \sqrt{(x_i^o - x_j^G)^2 + (y_i^o - y_j^G)^2 + (z_i^o - z_j^G)^2} + t_{ini}$ (1-b)

ここで、 t_i^o :観測点*i*におけるP波検知時刻、 x_i^o, y_i^o, z_i^o :観測点*i*の緯度、経度、高度(深度)、 x_j^G, y_j^G, z_j^G :設定されたグリッド上の*j*点の緯度、経度、高度(深度)、 V_p :P波伝達速度、 x_j^o, y_j^o, z_j^o :同定されるグリッド上の最適緯度、経度、高度(深度)、 t_{ij}^p :設定されたグリッド上の*j*点におけるP波到達時刻、 t_{ini} :地震発生時刻。GS法では、概ね緯度、経度方向に222km×183km範囲に緯度、経度方向それぞれ11kmおよび9km間隔でグリッドを設け、また、深さ方向に130km範囲に10km間隔でグリッドを設ける。そのうえで、全てのグリッドについて、式(1-a)の計算を行い、誤差最小値を求める。これは確実に誤差最小値を探索できる一方で計算負担も大きい。

PSOは、図-1の探索空間上に仮想粒子*k*を n_k 個設け、これらの粒子にランダム性を有する次の規則で移動させ、各粒子の位置座標による式(1-a)を計算し、最適値を求めるものである。

$\mathbf{L}_k^{S+1} = \mathbf{L}_k^S + \Delta \mathbf{L}_k^{S+1} \quad (k=1, n_k)$ (2-a)

$\Delta \mathbf{L}_k^{S+1} = w \Delta \mathbf{L}_k^S + c_1 r_1 (\mathbf{I}_{Gbest}^S - \mathbf{L}_k^S) + c_2 r_2 (\mathbf{I}_{Pbestk}^S - \mathbf{L}_k^S) + c_3 \mathbf{D}_r$ (2-b)

$|\Delta \mathbf{L}_k^{S+1}| \leq R_{max}$ (2-c)

ここで、 $\mathbf{L}_k^S$:粒子*k*の*S*ステップにおける位置ベクトル(x_k, y_k, z_k)、 $\mathbf{I}_{Gbest}^S$:粒子群の*S*ステップにおける

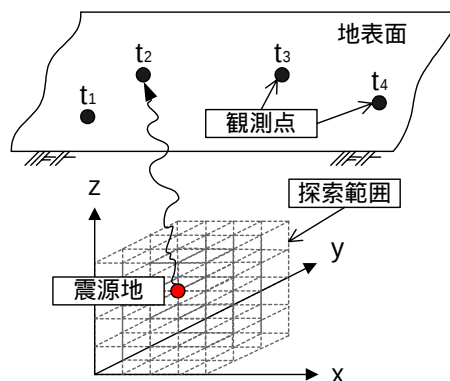


図-1 グリッドサーチ法

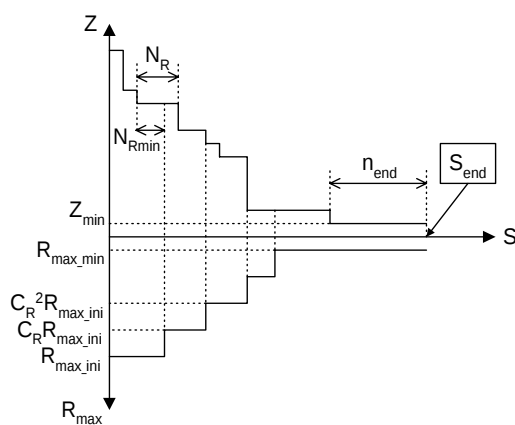


図-3 収束制御パラメータ

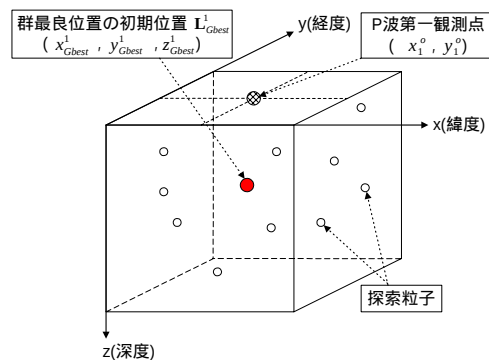
図-4 $\mathbf{I}_{Gbest}^1$ と各粒子初期位置

表-1 過去の地震例

No	地震名	年月日	時刻	M	震源		
					緯度	経度	深度
1	十勝沖地震	2003.9.26	04:50	8.0	41.78	144.07	42
2	鳥取県西部地震	2000.10.6	13:30	7.3	35.28	133.35	11
3	宮城県沖地震	2005.8.16	11:46	7.2	38.15	142.28	42
4	十勝沖地震	2003.9.26	06:08	7.1	41.71	143.69	21
5	釧路沖地震	2004.11.29	03:32	7.1	42.95	145.27	48
6	宮城県沖地震	2003.5.26	18:24	7.0	38.81	141.68	71
7	能登半島沖地震	2007.3.25	09:42	6.9	37.22	136.69	11
8	新潟県中越地震	2004.10.23	17:56	6.8	37.29	138.87	13
9	新潟県中越沖地震	2007.7.16	10:13	6.8	37.56	138.61	17
10	芸予地震	2001.3.24	15:28	6.4	34.12	132.71	51

キーワード PSO, 震源地同定, グリッドサーチ法, 緊急地震速報

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-20-20 防衛大学校 建設環境工学科 TEL 046-841-3810

る最良位置ベクトル, L_{Pbestk}^S : 粒子 k の S ステップにおける最良位置ベクトル, ΔL_k^S : 粒子 k の S ステップにおける速度ベクトル, w : 粒子の慣性係数, c_1 : 自身の既往最良値へ戻ろうとする強度係数, c_2 : 群最良値へ近づこうとする強度係数, c_3 : 乱数項パラメータ, r_1, r_2 : $0 \sim 1$ の一様乱数, D_r : 平均値が 0 で標準偏差値が 1.0 の n 次元正規確率変数ベクトル, R_{max} : 移動ベクトルの最大制約値. 式(2-c)において最大制約値については図-2 に示すように, 目的関数の収束が進むにつれて, 徐々に小さくすることとした. また, 図-3 に示すように群最良位置の初期位置 L_{Gbest}^1 をあらかじめ指定することにより, 探索初期段階に最適値へと早く近づくことができるようにした.

3 計算例と考察

計算例として, 表-1 に示す 10 事例を用いる. また, PSO のパラメータについては過去の研究²⁾を参考値として用いるものとした. ただし, 図-2 のパラメータについては, 探索効率と正確さのバランスについて検討が必要である. そこで, 地震 No.1 を用いた検討結果を図-4, 5, 6 に示す. これより $C_R=0.8, N_R=25, R_{max_min}=0.30$ とした.

図-7 は, 終了条件となる試行回数 n_{end} の長短によって PSO の同定値(以下提案値と呼ぶ)が GS 法の同定値(以下最適値と呼ぶ)とどの程度離れた地点を同定したかを示したものである. これより, 10 回の試行で全提案値が最適値と一致するのは, $n_{end}=90$ の場合であることがわかる. ただし, 緊急地震速報の目的である地震到達時刻とその規模を予測するうえでは, 1 グリッド程度の誤差はあまり予測値に大きな影響は及ぼさない.

図-8 は, L_{Gbest}^1 の有無が最適値発見ステップ数に及ぼす影響について示している. L_{Gbest}^1 を指定しない時, 地震 No.3, 10 では, 発見ステップ数が 300 回以上であるが, L_{Gbest}^1 を P 波第一観測点直下としたうえで, その深度を解空間の中心である 60km または, 過去 12 年間の地震の統計をもとに 30km とすると, 多くは 130 回以内に最適値を発見していることがわかる. 両者に大きな差異はないが, ここでは 30km に設定した.

以上のように, 決定したパラメータを用い, 表-1 に示す過去に発生した地震を対象として, 提案値と最適値の探索時間と誤差を表-2 に示す. 提案値は最適値に概ね一致しているが, 地震 No.3, 9, 10 は PSO の探索終了条件により誤差が生じている. そのうえで探索時間は GS 法が 0.19 ~ 0.25 秒に対して, 提案手法が 0.02 ~ 0.03 秒と 10 倍早く探索できている.

4 結言

震源同定に対し PSO を用いる際, 粒子移動速度の減衰, 群最良初期位置の指定などの改良を加えることにより, 現行の GS 法よりも短時間で震源を同定することができることを示した.

参考文献

- 1) Kennedy, J. & Eberhart, R. Particle Swarm Optimization, Proc. The 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, vol. , pp.1942-1948, 1995.
- 2) 坊原尚紀・作田健・香月智・嶋丈示: PSO を用いた鋼製砂防えん堤の最適断面設計, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.3, pp.681-692, 2006. 7.

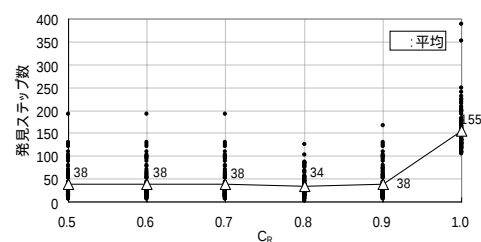


図-5 最大制約適正值低減係数(C_R)の影響

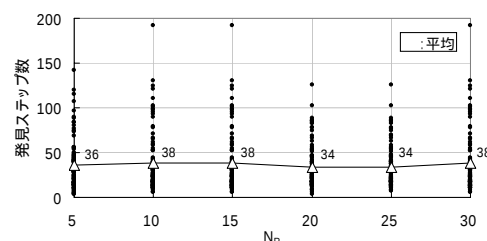


図-6 評価値不変回数(N_R)の影響

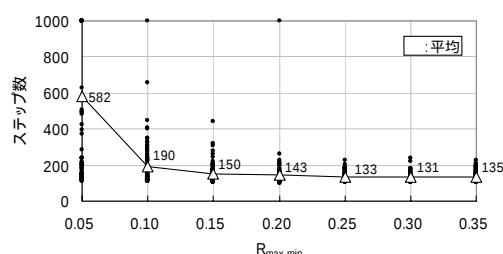


図-7 最大制約適正值(R_{max_min})の影響

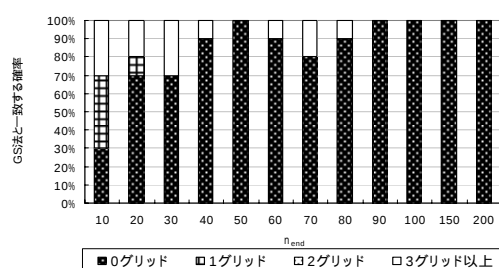


図-8 提案値の誤差に及ぼす探索終了条件(n_{end})の影響

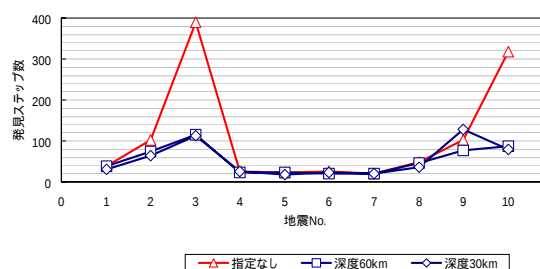


図-9 最適値発見ステップ数に及ぼす L_{Gbest}^1 の深さの影響

表-2 同定結果

No	同定時間(s)		最適値 発見確率	誤差発生確率(%)		
	G.S.法	PSO		北緯	東経	深度
1	0.23	0.02	100%	0	0	0
2	0.21	0.03	91%	1	0	8
3	0.19	0.02	73%	0	0	27
4	0.19	0.02	100%	0	0	0
5	0.25	0.02	100%	0	0	0
6	0.12	0.02	100%	0	0	0
7	0.23	0.02	100%	0	0	0
8	0.25	0.03	100%	0	0	0
9	0.24	0.03	76%	0	7	17
10	0.24	0.02	80%	0	0	20