

震源地同定への PSO の適用

防衛大学校 学生会員 ○白谷 英大 学生会員 片出 亮 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地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、効率的な震源地同定手法の開発を試みた。

2 震源地同定問題

現在行われている震源地同定はグリッドサーチ法(以下 GS 法)と呼ばれるもので、図-1 のように、全国に設置された地震計が震源の P 波を感知した時刻の早いもの 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。

$$\begin{aligned} \text{Given: } & t_i^o, x_i^o, y_i^o, z_i^o, (i=1, n^o) \\ & x_j^G, y_j^G, z_j^G, (j=1, n^G), V_p. \\ \text{Find: } & x_j^o, y_j^o, z_j^o, t_{ini} \\ \text{Objective: } & Z = \sum_{i=1}^{n^o} (t_i^o - t_{ij}^p)^2 \rightarrow \min \end{aligned} \quad (1-a)$$

Where :

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

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代わりに計算負担も大きい。

修正 PSO は、図-1 の探索空間上に、仮想粒子 k を n_k 個設け、これらの粒子の位置を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。

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_k^{S+1} &= \mathbf{L}_k^S + \Delta \mathbf{L}_k^{S+1} \quad (k=1, n_k) \\ \Delta \mathbf{L}_k^{S+1} &= w \Delta \mathbf{L}_k^S + c_1 r_1 (\mathbf{L}_{Gbest}^S - \mathbf{L}_k^S) + c_2 r_2 (\mathbf{L}_{Pbestk}^S - \mathbf{L}_k^S) + c_3 \mathbf{D}_r \end{aligned} \quad (2-b)$$

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

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)、 $\mathbf{L}_{Gbest}^S$: 粒子群の S ステップにおける

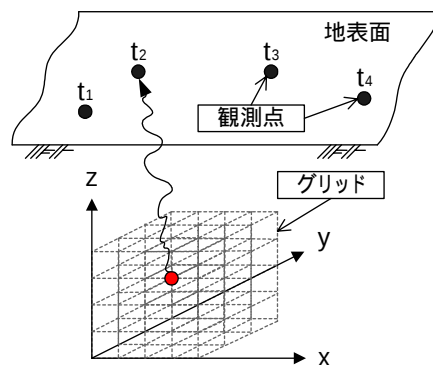


図-1 グリッドサーチ法

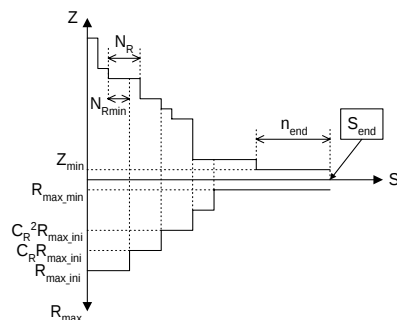


図-2 収束制御パラメータ

表-2 PSO パラメータ

項目	数値
n_k	10
w	0.9
c_1	2
c_2	2
c_3	0.05
R_{max_ini}	0.87
C_R	0.5 ~ 1.0
N_{Rmin}	5 ~ 30
R_{max_min}	0.05 ~ 0.35
n_{end}	10 ~ 200

表-1 過去の地震例

地震No.	地震名	発生日時	北緯(度)	東経(度)	深さ(km)
1	十勝沖地震	2003年 9月26日 4時50分	41.78	144.07	42
2	鳥取県西部地震	2000年10月 6日13時30分	35.28	133.35	11
3		2005年 8月16日11時46分	38.15	142.28	42
4	十勝沖地震	2003年 9月26日 6時 8分	41.71	143.69	21
5		2004年11月29日 3時32分	42.95	145.27	48
6		2003年 5月26日18時24分	38.81	141.68	71
7	能登半島沖地震	2007年 3月25日 9時42分	37.22	136.69	11
8	新潟県中越地震	2004年10月23日17時56分	37.29	138.87	13
9	新潟県中越沖地震	2007年 7月16日10時13分	37.56	138.61	17

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 1-10-20 防衛大学校 建設環境工学科 TEL046-841-3810 FAX : 046-844-5913

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_i^k : 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にした.

3 計算例と考察

計算例として, 表-1 に示す 9 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⁾を参考に表-2 の値を用いるものとした. 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-3, 4, 5 に示す. これより $C_R = 0.8$, $N_R = 25$, $R_{max_min} = 0.3$ とした.

図-6 は, 終了条件となる試行回数 n_{end} の長短によって最終解が GS 法の最適値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 回の試行で全ての最終解が GS 法と一致するのは, $n_{end} = 90$ 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大きさ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.

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, 提案手法の探索精度と時間に及ぼす効果を検討した結果を表-3 に示す. 提案手法の評価値は地震 No.3,4 を除き, 10 回中 10 回の GS 法の同定地点を探索できている. 地震 No.4 では, 10 回中 1 回, No.3 では, 10 回中 4 回 GS 法と異なっている. しかし, これも GS 法の同定地点から最大で 32km 離れた地点を探しているものである. そのうえで探索時間は GS 法が $0.12 \sim 0.25$ 秒に対して, 提案法が $0.05 \sim 0.09$ 秒と明らかに早く探索できている.

4 結言

PSO を用いることによって, 粒子の移動速度を逐次減衰させることにより, GS 法よりも短時間で震源地を同定することができることを示した.

謝辞

本研究を進めるにあたり, K-NET より貴重なデータを頂いた.

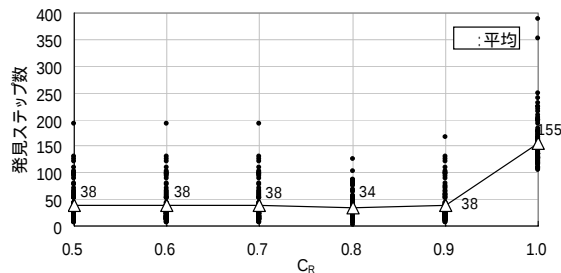


図-3 C_R の影響

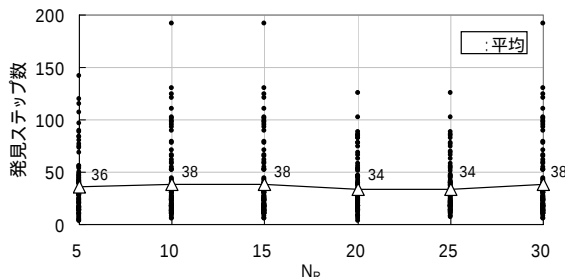


図-4 N_R の影響

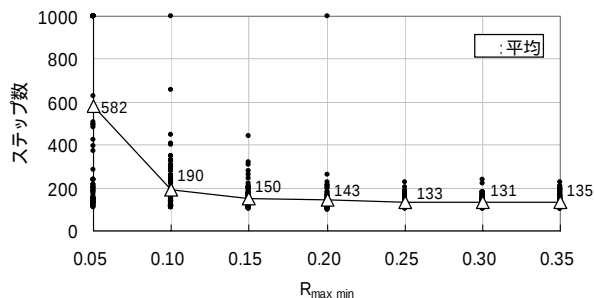


図-5 R_{max_min} の影響

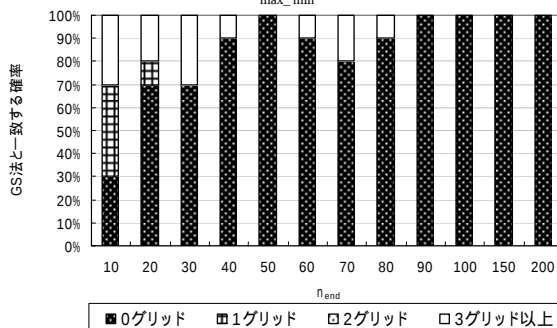


図-6 PSO の同定誤差に及ぼす n_{end} の影響

表-3 GS 法と提案手法の比較

地震No.	試行終了時間(s)		GS法との一致回数
	GS法	提案手法	
2	0.21	0.08	10
3	0.19	0.08	6
4	0.19	0.07	9
5	0.25	0.09	10
6	0.12	0.07	10
7	0.23	0.05	10
8	0.25	0.09	10
9	0.24	0.07	10

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.